

Исследование влияния отжига на механические свойства латуни Л63

А.В. Симолкин^{1а}, О.Н. Стародубцева^{1б}, С.Я. Алибеков^{1,2с}, Н.П. Сютлов^{1д}, А.А. Маргина^{1е}

¹ Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина 3, Йошкар-Ола, Россия

² Марийский государственный университет

^а mr.sav9@mail.ru, ^б StarodubcevaON@volgatech.net, ^с AlibekovSY@volgatech.net, ^д SyutovNP@volgatech.net,

^е MarginaAA@volgatech.net

^б <https://orcid.org/0009-0001-0410-0696>, ^с <https://orcid.org/0009-0009-8994-4481>,

^д <https://orcid.org/0009-0007-9473-2796>, ^е <https://orcid.org/0009-0003-5810-5921>

Статья поступила 15.01.2026, принята 08.05.2026

В статье рассматривается повышение эффективности производства проката при термической обработке латуни до мягкого состояния путём совершенствования режимов обработки. Рассмотрен отжиг для снятия внутренних напряжений прутков, полученных холодным деформированием из латуни Л63, подвергавшихся самопроизвольному растрескиванию в процессе хранения. Изучены внутренние напряжения в двойных латунях, которые могут стать причиной возникновения коррозионного растрескивания. Обоснована необходимость производства отжига, позволяющего значительно снизить остаточные напряжения и выровнять их по всему объёму изделия. Изучена гипотеза об изменении состояния твёрдости латуни при проведении термической обработки. Описаны проведённые исследования влияния термической обработки на изменение состояния твёрдости и микроструктуры материала. В результате проведённых исследований установлено, что растрескивание обусловлено наличием внутренних напряжений под действием условий хранения в складских помещениях. Описаны проведённые отжики латуни Л63 для снятия внутренних напряжений при температуре 270, 300, 400 и 600 °C продолжительностью 1 час с последующим охлаждением на воздухе. В итоге исследования показали, что отжига при температуре до 300 °C достаточно для снятия внутренних напряжений без изменений механических свойств. Проведённые исследования по отжигу заготовок из латуни Л63 показали, что с повышением температуры от 270 до 600 °C твёрдость уменьшается почти в три раза. Выявлено, что балл зерна латуни также меняется почти в 2 раза от 7–8 до 4–5. Установлено, что растрескивание деформированных прутков обусловлено присутствием остаточных напряжений при прокатке и хранении.

Ключевые слова: латунь; отжиг; состояние твёрдости; микроструктура; коррозионное растрескивание.

Investigation of the influence of annealing on the mechanical properties of L63 brass

A.V. Simolkin^{1а}, O.N. Starodubtseva^{1б}, S.Ya. Alibekov^{1,2с}, N.P. Syutov^{1д}, A.A. Margina^{1е}

¹ Volga State Technological University; 3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Russia

² Mari State University; 1, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Russia

^а mr.sav9@mail.ru, ^б StarodubcevaON@volgatech.net, ^с AlibekovSY@volgatech.net, ^д SyutovNP@volgatech.net,

^е MarginaAA@volgatech.net

^б <https://orcid.org/0009-0001-0410-0696>, ^с <https://orcid.org/0009-0009-8994-4481>,

^д <https://orcid.org/0009-0007-9473-2796>, ^е <https://orcid.org/0009-0003-5810-5921>

Received 15.01.2026, accepted 08.05.2026.

The article examines the improvement of rolled product production efficiency during the heat treatment of brass to a soft state by optimizing processing regimes. Annealing for relieving internal stresses of rods obtained by cold deformation from brass L63, which were subjected to spontaneous cracking during storage, is considered. The internal stresses in double brass, which can cause corrosion cracking, have been studied. The necessity of annealing is justified, which makes it possible to significantly reduce residual stresses and align them throughout the entire volume of the product. The hypothesis of a change in the hardness state of brass during heat treatment has been studied. The conducted studies of the effect of heat treatment on changes in the hardness and microstructure of the material are described. As a result of the conducted research, it has been found that cracking is caused by the presence of internal stresses under the influence of storage conditions in warehouses. The annealing of brass L63 for relieving internal stresses at temperatures of 270, 300, 400 and 600 °C for a duration of 1 hour followed by air cooling is described. As a result, studies have shown that annealing at temperatures up to 300 °C is sufficient to relieve internal stresses without changing mechanical properties. Studies conducted on the annealing of brass L63 blanks have shown that with an increase in temperature from 270 to 600 °C, the hardness decreases by almost three times. It has been revealed that the brass grain score also varies almost 2 times from 7–8 to 4–5. It has been established that the cracking of deformed rods is caused by the presence of residual stresses during rolling and storage.

Keywords: brass; annealing; hardness state; microstructure; corrosion cracking.

Введение. Основными способами достижения долговечности и надёжности деталей являются оптимальные конструктивные улучшения эксплуатационных свойств и выбор соответствующего материала. Подбор материалов базируется на теоретических и эксплуатационных исследованиях в области физико-механических процессов, протекающих при эксплуатации изделий.

Для изготовления деталей, подверженных износу, работающих в условиях повышенных нагрузок, трения и перепадов температур используют медные сплавы.

Латунь представляет собой сплав меди с цинком. Известно, что медь с цинком образуют, кроме основного, α -растворы, ряд фаз электронного типа α , β , γ и ϵ . У наиболее часто применяемых латуней структура состоит из α или $\alpha+\beta$ фаз, α -фаза – это твёрдый раствор цинка в меди с кристаллической решёткой меди границентрированного куба. Предельное растворение цинка в меди составляет 39 %. При содержании цинка более 40 % согласно диаграмме Cu-Zn, его структурное состояние в двухфазной области является $\alpha+\beta$. При появлении в структуре сплава β -кристаллов его твёрдость возрастает, а пластичность резко снижается. При дальнейшем увеличении содержание цинка выше 45 %, прочность и твёрдость также резко снижаются. Как известно, с увеличением содержания цинка механические свойства латуней повышаются, а стойкость уменьшается. Поэтому при использовании латуней, содержащих более 40 % цинка, их износ происходит неравномерно и более интенсивно. Преимущество латуней перед другими материалами заключается в хорошей обрабатываемости, способности принимать самую сложную форму благодаря своей эластичности. Она не только не ржавеет с годами, но и хорошо выдерживает воздействие агрессивных сред и окружающей среды, обладает стабильностью при низких температурах, долговечностью и обладает хорошими антифрикционными свойствами.

Латуни широко используются в различных отраслях промышленности: машиностроении, лесном машиностроении, электротехнике, электронике, приборостроении, строительстве и в других. Латунь используют в изготовлении втулок, подшипников, фитингов, кранов вентиляционных труб, электрических контактов, в часовых механизмах.

Втулки, подшипники, прессы обеспечивают хороший контакт с низким коэффициентом трения в механических узлах лесных машин, работающих в тяжёлых условиях, благоприятно влияет на ресурс работы сдвигаемых механизмов. Также хорошо сопротивляется воздействию влаги при работе во влажной окружающей среде.

Правильный выбор латуней по критериям: рациональное конструирование узлов, деталей и оптимизация условий эксплуатации могут существенно повысить их надёжность при незначительных увеличениях затрат [1, 2].

Двойное деформирование латуни чаще используют для изготовления деталей, работающих при значительных перепадах температур и при значительных внешних нагрузках.

Для изготовления чаще всего используют деформированные холоднотянутые (ДКРНП) по ГОСТ 2060-2006

«Прутки латунные. Технические условия» прутки различных видов сечения, специально предназначенные для обработки резанием на станках автоматах [3].

Согласно ГОСТ 2060-2006 в прутках не допускаются внутренние дефекты в виде раковин, неметаллические включения, пресс-утяжины, т. е. напряжения.

Одной из часто принимаемой маркой двойной латуни является Л63, занимающее первое место по объёму производства изделий, из-за этого она получила название торговой. Подвержение латуни деформированию, в частности холодному, приводит к существенному повышению их прочности, что выражается в виде наклепа, но при этом отмечается снижение пластичности. Для снятия остаточных напряжений и поклепа латуни подвергают отжигу при температурах более 400 °С.

К отрицательным свойствам латуни можно отнести склонность к растрескиванию. Растрескивание может быть вызвано двумя факторами – внутренними напряжениями и коррозионным воздействием. В первом случае латунные изделия с большим внутренним напряжением будут подвержены образованию различных трещин (продольных и поперечных).

Во втором случае коррозионное растрескивание происходит во влажной атмосфере при сохранении в сплаве после деформирования остаточных напряжений. Растрескивание происходит из-за межкристаллической коррозии латуни по границам зёрен в зоне неравномерного распределения напряжений. Растрескивание усиливает наличие в атмосфере следов аммиака, аммонийных солей, сернистых газов и др. Коррозионное растрескивание усиливается с увеличением содержания цинка и стремительно прогрессирует при содержании цинка более 30 %. Латунь марки Л63 наиболее чувствительна к коррозионному растрескиванию (больше, чем латунь марки Л60). Эти латуни сравнительно устойчивы, если напряжения в них меньше 1,0 кг/мм². Чтобы избежать коррозионного растрескивания, изделия перед длительным хранением подвергают низкотемпературному отжигу при температурах 250–330 °С и выдержке в печи в пределах от 1 до 2 ч. При таком отжиге основные внутренние напряжения снимаются без заметного снижения механических свойств и устойчивость латуней в отношении коррозионного растрескивания значительно повышается. Для некоторых деталей необходимо сохранить полутвёрдое состояние прокатного полуфабриката, что ставит под сомнение проведение отжига во избежание размягчения [4, 5].

Целью работы является снятие наклепа, определение изменения твердости и размера зёрен после проведения отжига при различных температурах.

На предприятии для изготовления форсунок, работающих при значительных перепадах температур и внешних механических воздействий, используют латунь Л63. Латунь марки Л63 относится к простым (двойным) латуням, состоящим в среднем из 63 % меди и 37 % цинка. При введении в медь до 39 % цинка повышается прочность и значительно увеличивается пластичность.

Предметом исследования служат образцы, отрезанные от латунных тянутых прутков ДКРНП марки Л63 сечением Ø30 мм и длиной 15 мм по ГОСТ 2060-2006 «Прутки латунные. Технические условия».

Практические исследования. Образцы подвергались неполному отжигу при различных температурах с выдержкой 60 минут и охлаждением на воздухе. Неполный отжиг, продолжительность которого определяется степенью предварительной деформации, проводят в интервале 250–400 °С. Чаще всего неполный отжиг используют для снижения остаточных напряжений, которые могут способствовать коррозионному растрескиванию. Данное растрескивание встречается в латунях с содержанием цинка более 1 %. При нём происходит

постепенное увеличение межкристаллитных трещин с одновременным воздействием напряжений, влажности и химических реагентов в атмосфере. Такая чувствительность латуней к коррозионному растрескиванию больше связана с неоднородностью напряжений, нежели с их абсолютной величиной [4, 6, 7].

Изначально на образцах № 1 и № 2 были измерены состояния твёрдости, что составили 127,4 кгс/мм² и 125,2 кгс/мм² по шкале НВ соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Твёрдость образцов в исходном состоянии

Наименование показателя	Измерительная шкала	Технические требования по ГОСТ 2060-2006	Результаты испытаний		Соответствие ГОСТ 2060-2006	Метод (методика) испытаний
Твёрдость	НВ (шарик ø5 нагрузка 750 кгс)	НВ 100–130 полутвёрдое состояние	Образец № 1	127,4	Соответствует полутвёрдому состоянию	ГОСТ 9012-59
			Образец № 2	125,2		

Образец № 1 подвергли неполному отжигу при температуре 270 °С, после остывания, которого была измерена твёрдость образца, что составила 123,5 кгс/мм² по шкале НВ. Получившаяся твёрдость соответствует полутвёрдому состоянию латуни марки Л63 по ГОСТ 2060-2006. После чего образец № 1 был подвержен повторному отжигу при температуре 400 °С. Измеренная твёрдость составила 77,1 кгс/мм², что соответствует мягкому состоянию материала. Образец № 2 был подвержен не-

полному отжигу при температуре 300 °С, после остывания которого была измерена твёрдость образца, что составила 128,4 кгс/мм² по шкале НВ. Получившаяся твёрдость соответствует полутвёрдому состоянию латуни. После чего образец № 2 был подвержен повторному отжигу при температуре 600 °С. Измеренная твёрдость составила 49,4 кгс/мм², также соответствует мягкому состоянию. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2. Твёрдость образцов после термической обработки

Наименование показателя	Твёрдость			
Измерительная шкала	НВ (шарик ø5 нагрузка 750 кгс)			
Режим термической обработки	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 1	Образец № 2
	t = 270 °С выдержка 60 мин. Охлаждение на воздухе	T = 300 °С выдержка 60 мин. Охлаждение на воздухе	T = 400 °С выдержка 60 мин. Охлаждение на воздухе	T = 600 °С выдержка 60 мин. Охлаждение на воздухе
Результаты испытаний (кгс/мм ²)	123,5	128,4	77,1	49,4
Соответствие ГОСТ 2060-2006	Соответствует полутвёрдому состоянию	Соответствует полутвёрдому состоянию	Соответствует мягкому состоянию	Не соответствует

Перед проведением испытаний, помимо контроля состояния твёрдости, были проверены исходные состояния микроструктуры образцов с целью определения изменения размера зёрен в результате отжига при различных температурах. Исходные образцы латуни имели в своём составе в основном α-фазу, состоящую из твердого раствора цинка в меди (светлая составляющая) и незначительное количество β-фазы, состоящую из упрочнённого твёрдого раствора CuZn (тёмная составляющая) (рис. 1). В α-фазе атомы меди располагаются упорядоченно и плотно, от этого латунь приобретает хорошую обрабатываемость, в то же время β-фаза более твёрдая и хрупкая.

Дополнительно после проведения термической обработки при различных температурах на образцах № 1 и № 2 была определена микроструктура и размер зёрен при 100^x увеличении. Как видно на рис. 2, 3, соотношение фаз изменилось после термической обработки. Количество β-фазы возросло. Данные по размерам зёрен представлены в табл. 3 и на рис. 2 и 3. Температура начала рекристаллизации латуни Л63 изменяется в интервале от 250 до 480 °С. Наиболее мелкозернистая структура в сплаве Л63 получается после отжига при температурах 300–400 °С.

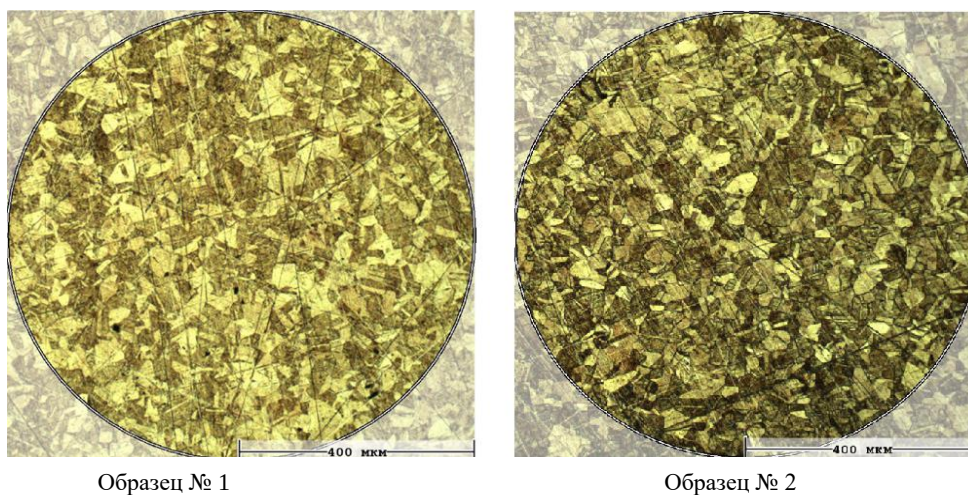


Рис. 1. Микроструктура исходного состояния

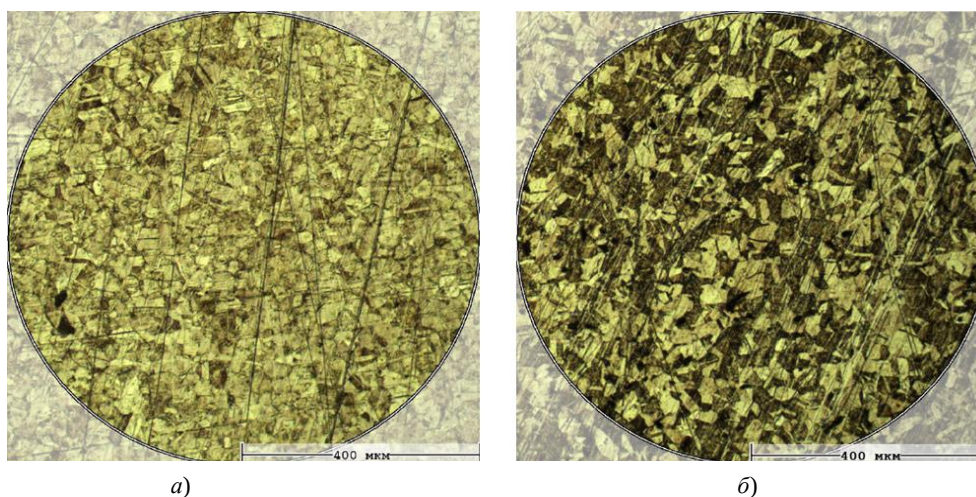


Рис. 2. Микроструктура после проведения отжига при $t = 270\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) образец № 1 $t = 270\text{ }^{\circ}\text{C}$ выдержка 60 мин. охлаждение на воздухе; б) образец № 2 $t = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ выдержка 60 мин. охлаждение на воздухе

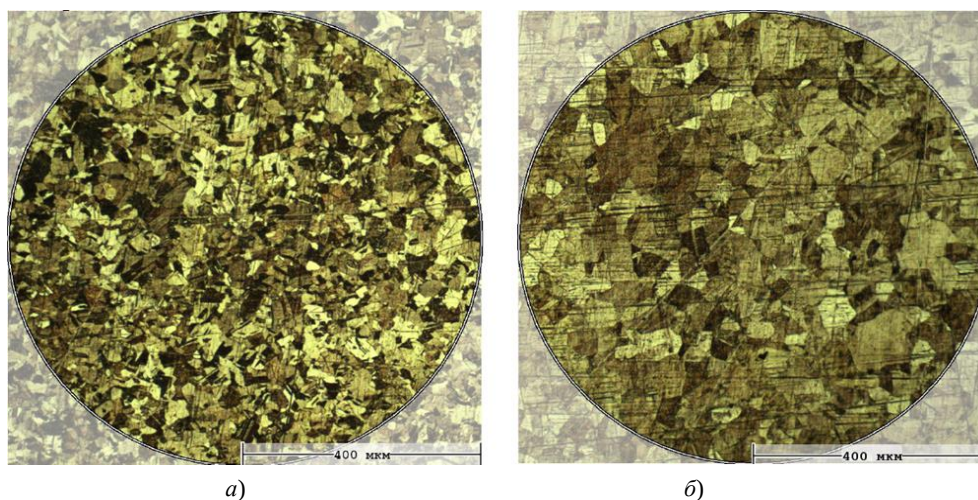


Рис. 3. Микроструктура после проведения отжига при $t = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) образец № 1 $t = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ выдержка 60 мин. охлаждение на воздухе; б) образец № 2 $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ выдержка 60 мин. охлаждение на воздухе

Таблица 3. Микроструктура образцов в исходном состоянии и после термической обработки

Наименование показателя	Единицы измерения	Режим термической обработки	Результаты испытаний		
			№ образца	Размер зерен по ГОСТ 21073.1-75	№ рисунка
Величина зерна по шкале 1 ГОСТ 21073.1-75	Балл №	Исходное состояние	№ 1	Балл № 7	Рис. 1
			№ 2	Баллы № 6–7	
		t = 270 °С выдержка 60 мин. Охлаждение на воздухе	№ 1	Баллы № 7–8	Рис. 2
		t = 300 °С выдержка 60 мин. Охлаждение на воздухе	№ 2	Баллы № 6–7	
		t = 400 °С выдержка 60 мин. Охлаждение на воздухе	№ 1	Баллы № 6–7	Рис. 3
		t = 600 °С выдержка 60 мин. Охлаждение на воздухе	№ 2	Баллы № 4–5	

Микроструктура латуни Л63 образца № 2 после отжига при температуре 600 °С отличается крупнозернистостью, а по границам крупных зёрен расположены мелкие зерна. Формирование подобной микроструктуры вероятно можно объяснить следующим образом (рис. 4). После прокатки и последующего рекристаллизационного отжига образовывались крупнозернистые структуры [8–15]. Обычно снижение температуры отжига приводит к росту небольших зерен вокруг границ крупных исходных зёрен вещества.

Из-за увеличения содержания β -фазы при термической обработке происходит ухудшение механических свойств латуни. Увеличение и упорядочивание β -фазы связано с распадом перенасыщенной α -фазы при проведении термической обработки при температуре 270 °С. Дальнейшее увеличение температуры обработки рекристаллизационного отжига увеличивает разницу количественных показателей по механическим свойствам.

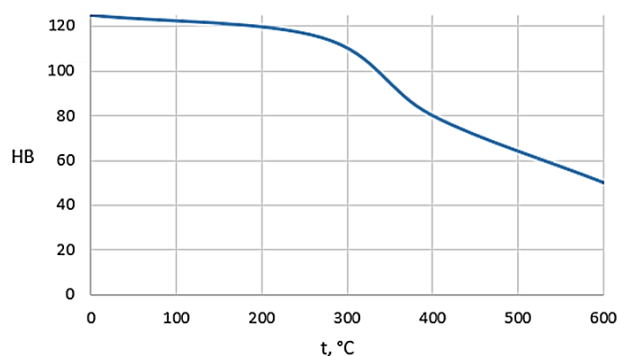
Так, например, при проведении термической обработки с повышением температуры от 270 до 600 °С твёрдость уменьшается в 2,9 раза. При отжиге 270 °С для образцов № 1 и № 2 оптимальным временем выдержки является 60 минут. При дальнейшем увеличении времени твёрдость образцов практически не изменяется.

Последующий высокотемпературный нагрев до 600 °С обеспечивает получение однофазной структуры латуни. Образование однофазной структуры происходит из-за распада пересыщенного β -фазы с образованием из неё дисперсных частиц α -фазы [16–20].

Для определения твёрдости после отжига использовали метод Бринелля по ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю» с применением шарика Ø5 мм и усилием 750 кг (7355 Н) (рис. 4) [7]. Как видно из рис. 4, с повышением температуры отжига твёрдость латуни уменьшается. Латунь из полутвёрдого состояния переходит в мягкое.

Для определения величины зерна использовали стандарт ГОСТ 21073.1-75 «Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур». Предварительно необходимо было подготовить контролируемую поверхность шлифованием и полированием с последующим травлением поверхности. Для установления размера зерна поверхность полученного шлифа осматривают в разных местах и останавливаются на трех показательных местах.

В случае, когда величина зерна неравномерна выбирают не менее пяти показательных мест. Для измерения величины зерна согласно ГОСТ 21073.1-75 используют три шкалы. При таком методе устанавливается соответствие микроструктуры шлифа с эталонами шкал.

**Рис. 4.** Зависимость твердости от температуры отжига

Для того, чтобы установить максимально точную величину зерна, используют различные увеличения микроскопа. Величина зерна при всех увеличениях в такой ситуации должна быть сопоставима с микроструктурами на эталонных фотографиях шкал. Такое сопоставление дает номер балла величины зерна. [13].

В нашем случае первоначальный размер зерен составлял 6–7 балла. Сильные изменения размера зерен произошли у образца № 2, подвергнутому отжигу при температуре 600 °С, размер зерен получил 4–5 баллов (табл. 3). Использовалась шкала 1 ГОСТ 21073.1-75.

Закключение. Проведённые исследования по снятию напряжений в образцах латуни Л63 показали, что напряжения полностью снижаются, повышается обрабатываемость. Установлено, что после проведения низкотемпературного отжига по режимам температур 270 °С и 300 °С с выдержкой 60 минут с последующим охлаждением на воздухе твёрдость образцов практически не изменилась и соответствует полутвёрдому состоянию по ГОСТ 2060-2006 НВ 123,5 и НВ 128,4 соответственно. Исходя из полученных данных низкотемпературный отжиг, проводимый для снятия внутренних напряжений, не влияет на твердость и структуру материала. Наиболее мелкозернистая структура получается после отжига при температурах 300–400 °С, о чём свидетельствуют полученные результаты. Проведённый отжиг при температуре 400 °С с выдержкой

60 минут с последующим охлаждением на воздухе показал, что твердость образца уменьшилась до мягкого состояния материала НВ 77,1. Более высокотемпературные виды отжига значительно влияют на изменение состояния твердости, что соответствует рекристаллизационному отжигу. Для латуни марки Л63 температура начала рекристаллизации варьируется от 250 до 480 °С. Проведенный повторный отжиг при температуре 600 °С с вы-

держкой 60 минут с последующим охлаждением на воздухе показал, что твердость образца значительно уменьшилась до НВ 49,4, что не соответствует ГОСТ 2060-2006. Наиболее мелкозернистая структура в сплаве Л63 получается после отжига при температурах 300–400 °С. Размер зёрен согласно шкале 1 ГОСТ 21073.1-75 изменялся от 6–7 балла до минимального 4–5 балла у образца № 2, подвергнутому отжигу при температуре 600 °С.

Литература

1. Бастраков В.М., Алибеков С.Я., Стародубцева О.Н., Юнусов Г.С. Влияние химического состава латуни на износостойкость изделий // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 4 (20). С. 7–13. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.4.7
2. М.А. Филиппов, Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении: учебное пособие: в 2 т. Т. II. Цветные металлы и сплавы / М.А. Филиппов, В.Р. Бараз, М.А. Гervashev. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 236 с.
3. А.П. Смирязин, Н.З. Днестровский, А.Д. Ландихов, Н.Н. Крейндин, Г.Н. Кручер, В.А. Головин, Б.Л. Урин, В.Н. Гольдрейер, Справочник по обработке цветных металлов и сплавов. М.: Металлургиздат, 1961.
4. Влияние качества материала на эксплуатационные показатели замков / В. М. Бастраков, И. А. Бербасов. Труды ПГТУ. Серия технологическая. Йошкар-Ола. ПГТУ, 2017. С. 105–109.
5. Wiser I.F., Mannens R., Feuerhack A., Trauth D. et al. An analytical approach for the determination of the temperature distribution in the cross section of a sheet metal caused by inductive heating. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 29. pp. 353–360.
6. ГОСТ 2060 – 2006 Прутки латунные. Технические условия.
7. ГОСТ 9122 – 59 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.
8. Feng Li, Jinqiang Ning, Steven Y. Liang. Analytical modeling of the temperature using uniform moving heat source in planar induction heating process. *Applied Sciences*. 2019. No. 9. 1445.
9. Tomita H. Industry applications of small induction heater. In *Proceedings of the 2012 9th France-Japan and 7th Europe-Asia Congress on and Research and Education in Mechatronics*, Paris, France, 21–23 November 2012.
10. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. М.: Высшая школа. 2000. 638 с. ил.
11. Нацкий М.В., Равич И. Г. Изучение причин самопроизвольного растрескивания музейных экспонатов, полученных обработкой давлением из латунных листов // Культурологический журнал. 2021. № 4 (46). 2021/4(46) DOI 10.34685/НЖ.2021.84.38.001
12. Сургаева Е.С., Якубович Е.А. Исследование микроструктуры кремнистой латуни марки ЛК75В после отжига // Современные материалы, техника и технологии. 2020. № 5 (32). С. 92–96. DOI: 10.47581/2020/30.10.2020/SMTT/32.5.016
13. ГОСТ 21073.1 – 75 Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур.
14. Карева Н.Т., Пелленен А.П., Хабибуллин А.А., Галимов Д.М. Исследование влияния отжига на строение и свойства биметаллических лент латунь алюминий латунь // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2014. № 1 (14). С. 54–61.
15. Карева Н.Т., Хабибуллин А.А., Пелленен А.П. Исследование отжига биметаллической ленты латунь - алюминий в протяжной печи // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2015. № 4 (15). С. 89–97.
16. Yan C., Wang Y., Liu C., Wu S. Influence of transverse flux induction heating excitation parameters on steel strip temperature and heater optimization. *Heat Treatment of Metals*. 2021. Vol. 46, Iss. 5. pp. 87–94.
17. Anders Persson, Sture Hogmark, Jens Bergström Temperature profiles and conditions for thermal fatigue cracking in brass die casting dies. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 152(2). pp. 228–236. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.241
18. Harun Mindivan. Microstructures and wear properties of brass synchronizer rings. *Wear* 254. 2003. pp. 532–537.
19. George Pantazopoulos. Fracture analysis and embrittlement phenomena of machined brass components. 2nd International Conference on Structural Integrity. 2017. pp. 4–7.
20. Holmes D. Synchronization Rings. Composable Synchronisation for Object-Oriented Systems. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000.

References

1. Bastrakov V.M., Alibekov S.Ya., Starodubtseva O.N., Yunusov G.S. The influence of the chemical composition of brass on the wear resistance of products // *Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Materials. Constructions. Technologies*. 2021. № 4 (20). Pp. 7–13. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.4.7
2. M.A. Filippov, Methodology of selection of metal alloys and hardening technologies in mechanical engineering: textbook: in 2 volumes. Vol. II. Non-ferrous metals and alloys / M.A. Filippov. Filippov, V.R. Baraz, M.A. Gervasyev. Yekaterinburg: Ural Publishing House. University, 2013. 236 p.
3. A.P. Smiryagin, N.Z. Dnestrovsky, A.D. Landikhov, N.N. Kreindlin, G.N. Krucher, V.A. Golovin, B.L. Urin, V.N. Goldreyer, Handbook of processing of non-ferrous metals and alloys. Moscow: Metallurgizdat, 1961.
4. The influence of material quality on the performance of locks / V.M. Bastrakov, I.A. Berbasov. *Proceedings of the PSTU. The series is technological*. Yoshkar-Ola. PGTU, 2017. pp. 105–109.
5. Wiser I.F., Mannens R., Feuerhack A., Trauth D. et al. An analytical approach for the determination of the temperature distribution in the cross section of a sheet metal caused by inductive heating. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 29. pp. 353–360.
6. GOST 2060 – 2006 Brass rods. Technical specifications.
7. GOST 9122 – 59 Metals. Brinell hardness measurement method.
8. Feng Li, Jinqiang Ning, Steven Y. Liang. Analytical modeling of the temperature using uniform moving heat source in planar induction heating process. *Applied Sciences*. 2019. No. 9. 1445.

9. Tomita, H. Industry applications of small induction heater. In Proceedings of the 2012 9th France-Japan and 7th Europe-Asia Congress on and Research and Education in Mechatronics, Paris, France, 21–23 November 2012.
10. Materials science and technology of metals / G.P. Fetisov, M.G. Karpman, V.M. Matyunin et al. Moscow: Higher School. 2000. 638 p. ill.
11. Natsky M.V., Ravich I. G. Study of the causes of spontaneous cracking of museum exhibits obtained by pressure treatment from brass sheets // Cultural Journal. – 2021. – № 4 (46). – 2021/4(46) DOI 10.34685/HI.2021.84.38.001.
12. Surgaeva E.S., Yakubovich E.A. Investigation of the microstructure of siliceous brass of the lc75b brand after annealing // Modern materials, machinery and technologies. 2020. № 5 (32). Pp. 92–96. DOI: 10.47581/2020/30.10.2020/ SMTT/32.5.016
13. GOST 21073.1 – 75 Non-ferrous metals. Determination of grain size by comparison with the scale of microstructures.
14. Kareva N.T., Pellenen A.P., Khabibullin A.A., Galimov D.M. Investigation of the effect of annealing on the structure and properties of bimetallic tapes brass aluminum brass // Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy. 2014. № 1 (14). Pp. 54–61.
15. Kareva N.T., Khabibullin A.A., Pellenen A.P. Investigation of annealing of brass-aluminum bimetallic tape in a broaching furnace // Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy. 2015. № 4 (15). Pp. 89–97
16. Yan C., Wang Y., Liu C., Wu S. Influence of transverse flux induction heating excitation parameters on steel strip temperature and heater optimization. Heat Treatment of Metals. 2021. Vol. 46, Iss. 5. pp. 87–94.
17. Anders Persson, Sture Hogmark, Jens Bergström Temperature profiles and conditions for thermal fatigue cracking in brass die casting dies. Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 152 (2). pp. 228–236. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.241
18. Harun Mindivan. Microstructures and wear properties of brass synchronizer rings. Wear 254. 2003. pp. 532–537.
19. George Pantazopoulos. Fracture analysis and embrittlement phenomena of machined brass components. 2nd International Conference on Structural Integrity. 2017. pp. 4–7.
20. Holmes D. Synchronization Rings. Composable Synchronisation for Object-Oriented Systems. Journal of Materials Processing Technology. 2000.