

РАДИАЛНА СТРУКТУРНА НЕЕДНОРОДНОСТ, ХИМИЧЕН СЪСТАВ И ТВЪРДОСТ НА ЦЕНТРОБЕЖНО ЛЯТА ВТУЛКА ОТ CU-AL-ZN-FE СПЛАВ

Доц. д-р инж. Ярослав Аргиров

Технически университет - Варна

Ас. инж. Николай Вълчев

Технически университет - Варна

Инж. Апостол Учърджиев

Технически университет - Варна

Резюме: Изследвана е радиалната структурна и механична нееднородност на центробежно лята втулка от многокомпонентна медна сплав за ходово колело. Анализът съчетава макроструктурно наблюдение, химичен анализ с четири повторения, оптична металография при $\times 50$ – $\times 800$ и измервания на твърдост по Бринел и Рокуел В. Установени са дендритна зона към външната повърхност и зона с равноосни кристали към вътрешната повърхност, без видими макродефекти. Средният състав е 77,0% Cu, 8,50% Zn, 6,45% Al, 4,63% Fe, 1,00% Ni и 0,871% Pb при сума на отчетените стойности 99,95 мас.%. Микроструктурата е интерпретирана като α -Cu матрица, β' -подобни области и Pb-богати включения, чието присъствие нараства към средната и вътрешната част на стената. Средната твърдост е $115 \pm 2,65$ HBW 5/250 и $58,5 \pm 0,78$ HRB. Резултатите показват добра повторяемост на химичните данни и твърдостта и радиална структурна нееднородност, съвместима с насочено кристализиране и центробежна ликвация. Поради недокументираното радиално положение на химичната проба съставът не може да бъде екстраполиран към цялата втулка. Фазовият състав и експлоатационната пригодност следва да се потвърдят чрез XRD, SEM-EDS, радиално химично картиране и механични и трибологични изпитвания.

Ключови думи: центробежно лееене; медна сплав; α -Cu, β' -фаза; оловна ликвация, твърдост; втулка

RADIAL MICROSTRUCTURAL HETEROGENEITY, CHEMICAL COMPOSITION, AND HARDNESS OF A CENTRIFUGALLY CAST CU-AL-ZN-FE ALLOY BUSHING

Assoc. Prof. Dr. Eng. Yaroslav Argirov

Technical University – Varna

Ass. Eng. Nikolay Valchev

Technical University – Varna

Eng. Apostol Ucherdzhev

Technical University – Varna

Abstract: *The radial microstructural and mechanical heterogeneity of a centrifugally cast multicomponent copper-alloy bushing intended for a travel wheel was investigated. The analysis combined macrostructural examination, chemical analysis performed in quadruplicate, optical metallography at magnifications ranging from 50× to 800×, and Brinell and Rockwell B hardness measurements. A dendritic region was identified adjacent to the outer surface, whereas a region of equiaxed grains was observed toward the inner surface; no visible macroscopic defects were detected. The average chemical composition was 77.0 wt.% Cu, 8.50 wt.% Zn, 6.45 wt.% Al, 4.63 wt.% Fe, 1.00 wt.% Ni, and 0.871 wt.% Pb, with the complete set of measured elemental concentrations totaling 99.95 wt.%. The microstructure was interpreted as comprising an α -Cu matrix, β' -like regions, and Pb-rich inclusions, whose prevalence increased toward the middle and inner portions of the wall. The mean hardness values were 115 ± 2.65 HBW 5/250 and 58.5 ± 0.78 HRB. The results demonstrate good repeatability of the chemical-composition and hardness measurements, together with radial microstructural heterogeneity consistent with directional solidification and centrifugal segregation. Because the radial location of the specimen used for chemical analysis was not documented, the measured composition cannot be extrapolated to the entire bushing. The phase constitution and fitness for service should be further verified by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), radial compositional mapping, and mechanical and tribological testing.*

Keywords: centrifugal casting; copper alloy; α -Cu, β' phase; lead segregation, hardness, bushing

1. Въведение

Центробежното леење е подходящо за цилиндрични детали, тъй като съчетава насочено топлоотвеждане през външната форма с интензивно движение на течната фаза. Тази особеност позволява получаване на плътна външна зона, но едновременно създава условия за радиална нееднородност на размера и морфологията на зърната и за преразпределение на компоненти с различна плътност и разтворимост. Експериментални изследвания на центробежно лети Cu-сплави показват, че слаборазтворими частици могат да се изместват към вътрешната периферия и да се концентрират в последно кристализиращите междудендритни участъци [1-3].

При Cu-Al-Zn сплавите фазовото състояние зависи чувствително от съотношението между Cu, Zn и Al и от скоростта на охлаждане. α -фазата представлява богат на мед твърд разтвор със стенноцентрирана кубична кристална решетка, а β/β' -областите са по-твърди и обикновено по-малко пластични; термичната история може да променя техния дял, подреденост и морфология [4-8]. В присъствие на Pb възниква допълнителна структурна нееднородност, защото оловото има ограничена взаимна разтворимост с медната матрица. Неговият ефект върху обработваемостта и трибологичното поведение е силно зависим от формата, размера и разпределението на Pb-богатите включвания [9-11].

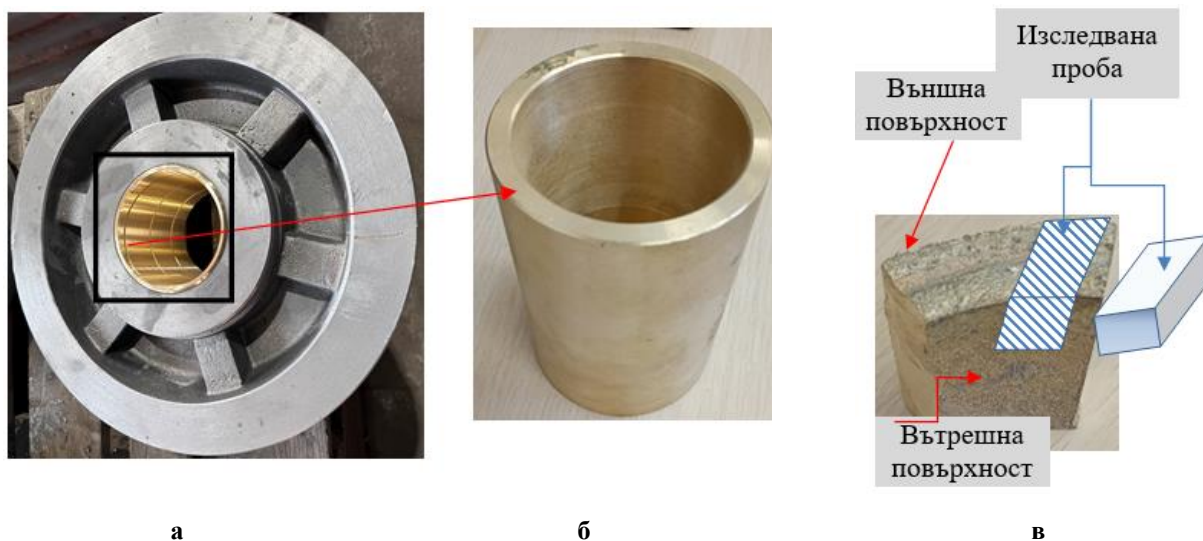
Настоящото изследване анализира връзката „процес на кристализиране - химичен и фазов състав - твърдост“. Специално внимание е отделено на вътрешноаналитичната повтораемост и границите на представителност на химичния анализ, радиалното

разпределение на микроструктурните съставки и границите на заключенията, които могат да се направят само от оптична металография и твърдост.

2. Материали и методи

2.1. Обект на изследване

Обектът е центробежно лята втулка от медна сплав, монтирана в ходово колело (фигура 1). Контролната проба е изрязана през стената на цилиндричната отливка така, че да включва външната повърхност, контактувала с формата, средната зона и вътрешната свободна повърхност.



Фигура 1. Обект на изследване: а) ходово колело с черно очертана зона на монтираната втулка; б) механично обработена втулка, към която насочва червената стрелка; в) означено място и ориентация на изрязване на изследваната проба между външната и вътрешната повърхност

2.2. Методика

Макроизследването (фигура 2) е извършено със стереомикроскоп EUROMEX, а микроструктурата – с металографски микроскоп КЕРН. Наблюдавани са не проявена и проявена проба при $\times 50$ – $\times 800$. Химичният състав е определен чрез FOUNDRY-MASTER SMART е стационарен оптико-емисионен спектрометър с четири повторения за 21 елемента. Проявяването на пробите е осъществено с разтвор на железен хлорид FeCl_3 . Средните стойности на Cu, Al, Fe, Ni, Mn, Zn, Pb и Sn са ориентировъчно съпоставени с границите за CuAl9Fe3 .

Твърдостта е измерена трикратно по Бринел при режим HBW 5/250 и по Рокуел В. За сериите са изчислени средна стойност, извадково стандартно отклонение s и коефициент на вариация CV. В първичните данни са посочени ISO 6892-1 и БДС EN ISO 6507-1, които се отнасят съответно до изпитване на опън и твърдост по Викерс. Тъй като действително отчетените величини са HBW и HRB, приложимите методични стандарти са ISO 6506-1 и ISO 6508-1. Това несъответствие е отчетено като ограничение на проследимостта, а не като основание за промяна на първичните стойности.

3. Резултати

3.1. Химичен състав

3.1.1. Химичен анализ на изследваната проба

Четирите повторни измервания дават сума на средните стойности 99,95 мас.% и показват ниско отклонение за основните елементи. Пълният набор от 21 елемента е представен в Таблица 1; знаците „<“ са запазени като граници на откриване от оригиналната справка. Средната стойност за всеки елемент е използвана при последващата оценка на състава.



Фигура 2. Макроструктура на радиалната проба: дендритна зона към външната повърхност и зона с равноосни кристали към вътрешната повърхност

Таблица 1. Химичен състав на изследваната проба - четири повторни измервания и средни стойности, мас.%.

Елемент	1	2	3	4	Средно
Cu	77,0	77,0	76,9	77,2	77,0
Zn	8,60	8,49	8,44	8,49	8,50
Pb	0,888	0,890	0,857	0,850	0,871
Sn	0,667	0,676	0,665	0,654	0,665
P	0,0195	0,0182	0,0183	0,0185	0,0186
Mn	0,552	0,548	0,551	0,554	0,551
Fe	4,60	4,64	4,76	4,52	4,63
Ni	0,976	0,999	1,02	1,01	1,00
Si	0,186	0,180	0,176	0,172	0,179
Mg	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Cr	0,0098	0,0093	0,0106	0,0105	0,0100
Al	6,41	6,45	6,51	6,42	6,45
S	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020
As	0,0031	0,0031	0,0032	0,0029	0,0031

Елемент	1	2	3	4	Средно
Be	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Ag	0,0135	0,0156	0,0146	0,0167	0,0151
Co	0,0141	0,0140	0,0141	0,0146	0,0142
Bi	0,0117	0,0129	0,0098	0,0129	0,0118
Cd	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Sb	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Zr	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020

Отклонението между четирите повторения е малко спрямо съдържанието на основните елементи и потвърждава добра вътрешноаналитична повторяемост на запазения набор. Този резултат характеризира единствено анализираната проба; без данни за радиалната ѝ позиция той не доказва химична еднородност по дебелината на втулката.

3.1.2. Оценка спрямо референтния състав CuAl9Fe3

За ориентировъчна оценка средните стойности от химичния анализ са съпоставени с границите за CuAl9Fe3, посочени в изходната справка. Поради липсата на данни за неопределеността на измерването, калибрацията и мястото на вземане на пробата резултатите в Таблица 2 следва да се разглеждат като скринингова класификация, а не като формално удостоверяване на съответствие.

Таблица 2. Ориентировъчна оценка на средния химичен състав на изследваната проба спрямо посочените в изходната справка граници за CuAl9Fe3.

Елемент	Допуск, мас. %	Резултат, мас. %	Извън границите
Cu	остатък	77,0	Неприложимо
Al	8,0-10,0	6,45	Да
Fe	2,0-4,0	4,63	Да
Ni	<1,0	1,00	Гранично
Mn	<0,50	0,551	Да
Zn	<1,0	8,50	Да
Pb	<0,10	0,871	Да
Sn	<0,20	0,665	Да

Съпоставката показва, че запазеният химичен анализ не се вписва в посочените референтни граници за CuAl9Fe3: Al е по-нисък (6,45 мас.%), а Fe (4,63 мас.%), Zn (8,50 мас.%), Mn (0,551 мас.%), Pb (0,871 мас.%) и Sn (0,665 мас.%) са над съответните граници; Ni (1,00 мас.%) е на границата на закръглената отчетена стойност при изискване <1,0 мас.%. Следователно материалът не трябва да се означава като стандартна CuAl9Fe3

сплав само въз основа на наличните данни. По-коректно е да се описва като многокомпонентна Cu-Al-Zn-Fe сплав с Ni, Mn, Pb и Sn.

3.1.3. Графично представяне и интерпретация

Средният състав определя Cu като основа (77,0 мас.%) и потвърждава едновременно легиране със Zn (8,50 мас.%), Al (6,45 мас.%) и Fe (4,63 мас.%), както и по-малки количества Ni, Pb, Sn и Mn. Комбинацията от високо съдържание на Zn, по-нисък спрямо референтните граници Al и повишени Fe, Pb и Sn подкрепя класифицирането като многокомпонентна Cu-Al-Zn-Fe сплав, а не като CuAl₉Fe₃. Графичното разделяне на матричния елемент, основните легиращи и минорните компоненти във фигура 3 позволява сравнение, без мащабът на Cu да потиска визуално по-ниските концентрации.



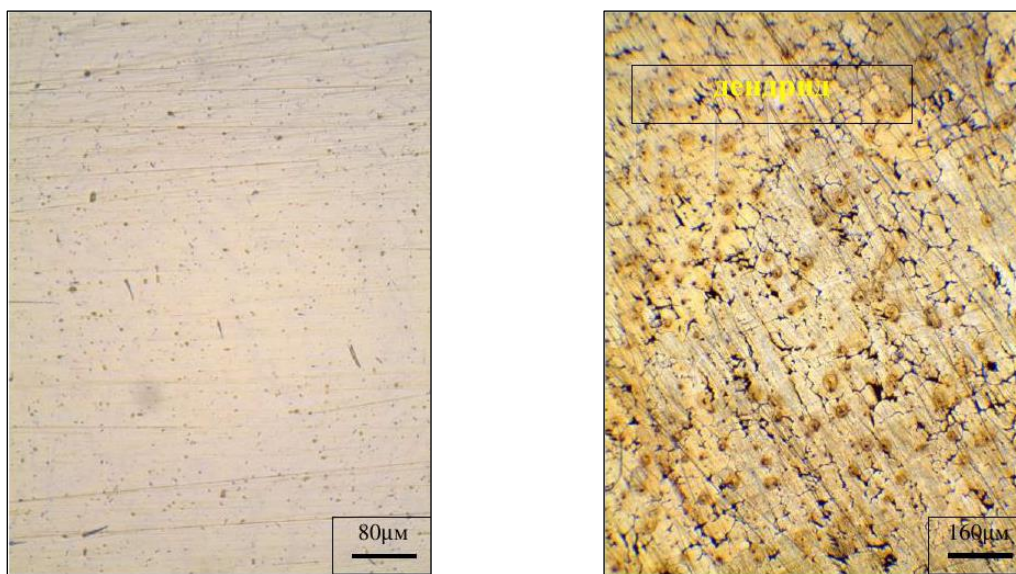
Фигура 3. Среден химичен състав на изследваната проба: Cu-базова матрица, основни легиращи елементи и минорни компоненти. Стойностите са представени като мас.% без допълнително нормализиране.

Фазовата интерпретация на състава трябва да бъде предпазлива. При 6,45 мас.% Al и 8,50 мас.% Zn не е коректно директно да се прилагат бинарни граници на разтворимост, тъй като Fe, Ni, Mn, Pb и Sn изменят активностите, кинетиката на втвърдяване и стабилността на α/β областите. Литературните данни за Cu-Al-Zn и сродни многофазни Cu-сплави показват силна зависимост на α/β съотношението, подредеността на β' и твърдостта от състава и термичната история [4-8, 13-15]. Поради това означението β' върху оптичните микроструктури се приема като работна морфологична интерпретация, която изисква потвърждение чрез XRD и SEM-EDS.

3.2. Макро- и микроструктура

Макроструктурата на фигура 2 показва ясно различни радиални зони. Към външната повърхност се развиват ориентирани дендритни/колонарни области, които проследяват максималния топлинен градиент към формата. Към вътрешната повърхност структурата преминава към равноосни кристали, типични за по-слабо насочено и по-

късно кристализиране. В наблюдавания шлиф не са описани макроскопични шупли, пори или едри оксидни включения (фигура 4).



а - непроявена проба, $\times 100$

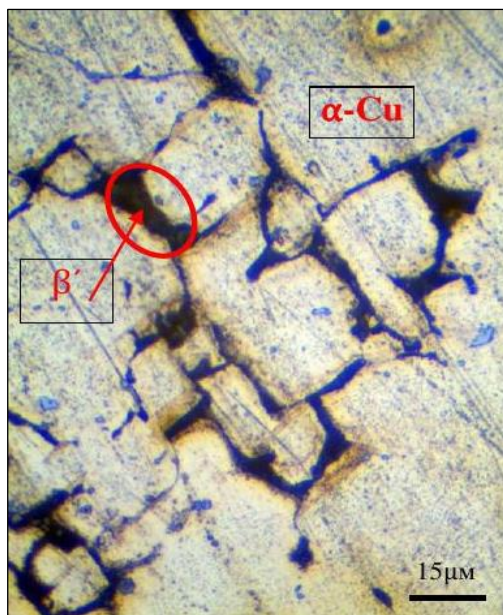
б - проявена дендритна структура, $\times 50$

Фигура 4. Нискоувеличителна металография на центробежно лятата втулка

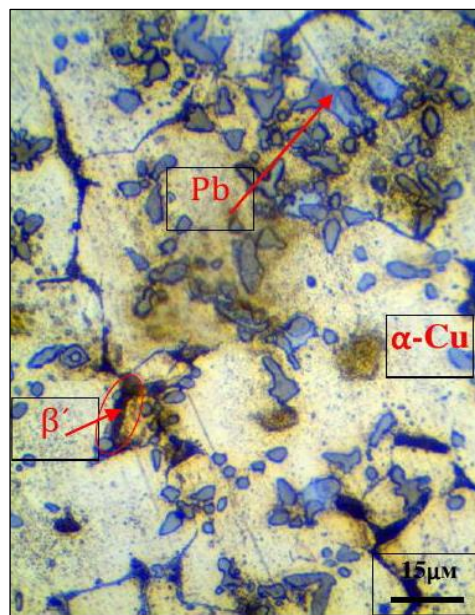
Непроявената повърхност съдържа дисперсни тъмни участъци и следи от подготовката, докато след проявяване се разкрива дендритна морфология и мрежа от междукристални области. Този контраст е съвместим със сегрегация при кристализиране, но сам по себе си не определя химичната природа на наблюдаваните съставки.

3.3. Микроструктура при $\times 500$ и $\times 800$ (фигури 5 и 6)

На изображенията светлата матрица е означена като α -Cu, тъмните/сини гранични области – като β' , а част от закръглените или продълговати включения – като Pb. При увеличение $\times 500$ външната зона е относително по-бедна на Pb-богати включения, докато средната част показва по-голямо количество дисперсно разпределени вторични области. Светлите участъци на α -Cu формират основната матрица и са разделени от прекъснати или локално свързани тъмни гранични области. Предполагамата β' -фаза е разположена предимно по границите на зърната и в междукристалните участъци, което е съвместимо с преразпределение на легиращите елементи в процеса на втвърдяване. Означените като Pb включения се характеризират със закръглена, неправилна или удължена морфология и се наблюдават като самостоятелни области в медната матрица или в близост до фазовите граници. По-голямата им честота в средната зона може да бъде свързана с радиална ликвация и с ограничената взаимна разтворимост между оловото и Cu-богатата матрица. Наблюдаваната морфологична нееднородност показва, че фазите и включенията не са разпределени равномерно по дебелината на стената на втулката. Този резултат има потенциално значение за локалната твърдост, пластичността, износването и корозионното поведение на материала.

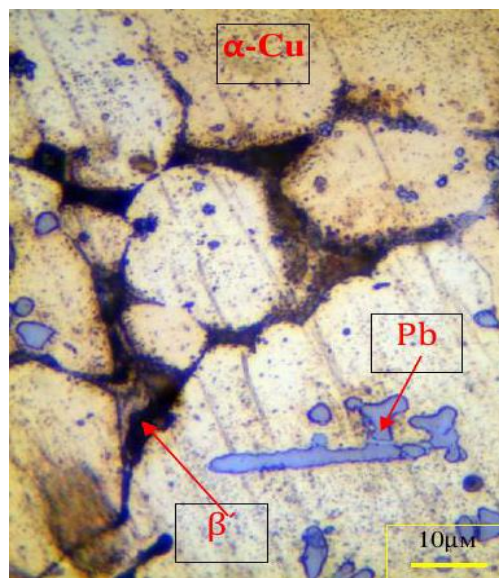


а - външна зона, ×500

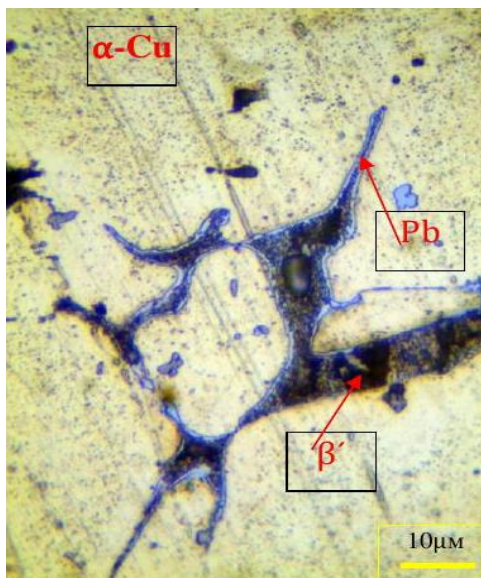


б - средна зона, ×500

Фигура 5. Микроструктура на радиалната проба при ×500



а - външна зона, ×800



б - средна зона, ×800

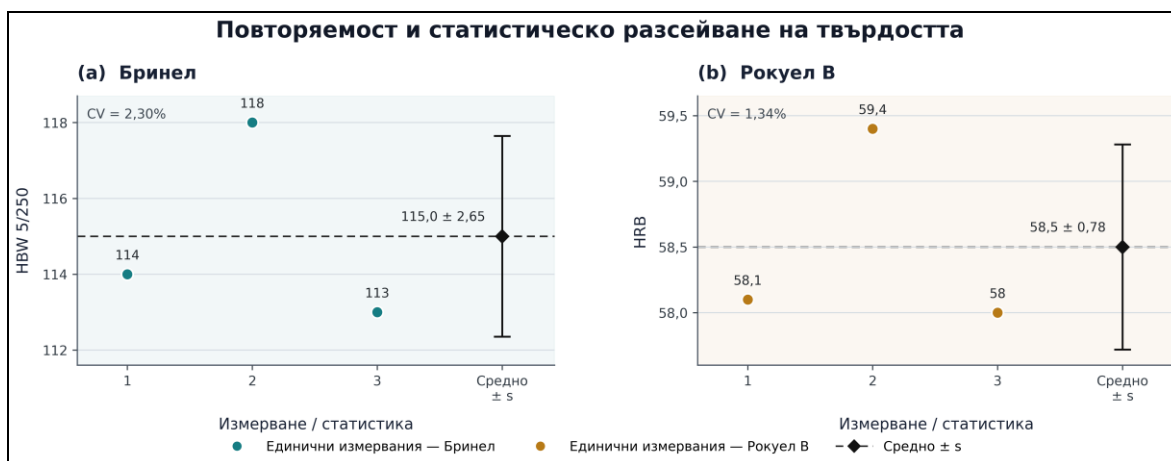
Фигура 6. Микроструктура на радиалната проба при ×800

Предоставена интерпретация. Структурата е определена като трифазна - α -Cu твърд разтвор, β' -фаза и олово, чието присъствие нараства от средната към вътрешната повърхност и локално е оценено над 2%. Това преразпределение е свързано с центробежните сили и ликвацията, като е посочено, че Pb подобрява тънколивкостта и намалява триенето. Основният дял на α -фазата е оценен над 80%. Тези изводи са представени като предварителна интерпретация; без количествен образен анализ, SEM-EDS и XRD процентите и фазовата идентичност остават ориентировъчни.

3.4. Твърдост (таблица 3 и фигура 7)

Таблица 3. Твърдост на изследваната проба. Първите четири реда представят първичните данни, s и CV са изчислени от трите измервания.

Статистика / измерване	HBW 5/250	HRB
1	114	58,1
2	118	59,4
3	113	58,0
Средно	115,0	58,5
s (изчислено)	2,65	0,78
CV (изчислено), %	2,30	1,34



Фигура 7. Повторяемост на твърдостта: единични измервания, средна стойност и извадково стандартно отклонение s.

Размахът е 5 HBW и 1,4 HRB, а коефициентите на вариация са съответно 2,30% и 1,34%. Първоначалната оценка определя средната твърдост 115 HB като много добра за медна сплав и свързва дела на α -фазата над 80% с възможност за наклеп на контактната повърхност; посочени са и добри корозионни характеристики. Тази оценка е отчетена, но наличните три локални измервания не доказват радиална еднородност, якост, износоустойчивост или корозионна устойчивост на цялата втулка.

4. Връзка между химичния състав, микроструктурата и твърдостта

Съчетаването на външна дендритна зона и вътрешна равноосна зона е съвместимо с първично кристализиране от стената на формата навътре. При центробежно леене частиците и течните микрокапки с плътност, по-ниска от тази на Си-богатата стопилка, се преместват към вътрешната периферия; едновременно фронтът на кристализиране може да ги изтласква към междудендритните пространства [1]. Аналогично радиално

концентриране е наблюдавано за слабаразтворими вторични фази в центробежно ляти Cu-сплави [2-3]. Следователно наблюдаваното нарастване на Pb-богатите участъци към вътрешната зона има физически правдоподобен механизъм.

Средните 8,50 мас.% Zn и 6,45 мас.% Al не позволяват пряко прилагане на бинарната граница на разтворимост на Zn в Cu. В многокомпонентната система Cu-Al-Zn-Fe-Ni-Mn-Pb-Sn активностите и фазовите полета се изменят взаимно. Литературните данни потвърждават, че α/β съотношението и подредеността на β' реагират силно както на химичния състав, така и на охлаждането [4-8, 13-15]. Следователно означението β' в оптичните изображения е разумна работна хипотеза, но не може да се счита за окончателна фазова идентификация без дифракционни или микроспектрални доказателства.

Наблюдаваните Pb-богати включвания са съвместими с ограничената взаимна разтворимост на Pb и Cu. В оловни бронзи центробежното леене може да доведе до силна сегрегация и концентриране на Pb по границите и в последно втвърдяващите участъци [2]. За машинна обработка Pb насърчава локализацията на деформацията и разкъсването на стружката, но съвременни измервания показват, че ефектът му не следва автоматично да се приписва на непрекъснат смазващ филм [11]. При плъзгащи контакти оловните Cu-сплави могат да покажат благоприятно трибологично поведение, но резултатът зависи от товара, смазването, контратялото и морфологията на фазите [3, 9-10]. Поради това твърдението за намалено триене е технологично правдоподобно, но не е доказано за конкретната втулка без трибологично изпитване.

Стойността 115 HBW показва умерено висока твърдост за Cu-базирана лята сплав и е съвместима с комбинирано уякчаване от легираната α -Cu матрица и по-твърдите вторични области. Изследвания на многофазни Cu-Zn и Cu-Al-Fe сплави показват, че по-големият дял на β /междуметални съставки и по-фината структура често повишават твърдостта, но могат да намалят пластичността [7-8, 13-14]. Доминиращата α -фаза допуска деформационно уякчаване на контактната повърхност, но в наличните данни няма профил на микротвърдост, изпитване на опън, ударна якост или умора, за да се оцени количествено този ефект.

Не е провеждано корозионно изпитване. При многокомпонентни Cu-Zn-Al-Fe-Mn сплави химически различните фази могат да образуват микрогалванични двойки и да променят локалната корозия в хлоридна среда [12]. Следователно общото очакване за добра корозионна устойчивост на медните сплави не може да замести изпитване на конкретната радиално нееднородна втулка.

5. Заключение

Цялостният анализ показва, че центробежното леене е формирало отчетлива радиална зоналност с дендритна/колонарна външна област и равноосна вътрешна област, без видими макроскопични шупли, пори или едри оксидни включвания в изследвания шлиф. Химичният анализ, основан на четири повторни измервания, определя среден състав 77,0 мас.% Cu, 8,50 мас.% Zn, 6,45 мас.% Al, 4,63 мас.% Fe, 1,00 мас.% Ni и 0,871 мас.% Pb; сумата 99,95 мас.% и малкото отклонение между повторенията потвърждават добра вътрешноаналитична съгласуваност за изследваната проба. Ориентировъчната

съпоставка с посочените референтни граници показва, че материалът не следва да се класифицира като CuAl9Fe3 само въз основа на наличните данни. Тъй като радиалното положение на химичната проба не е документирано, измереният състав не доказва химична еднородност и не може да се екстраполира към целия обем на втулката. Оптичната микроструктура е съвместима с α -Cu матрица, β' -подобни гранични области и Pb-богати включвания, като нарастването на Pb към средната и вътрешната зона има физически правдоподобно обяснение чрез центробежно преразпределение и междудендритно изтласкване, но окончателното определяне на фазите изисква XRD и SEM-EDS. Получените стойности $115 \pm 2,65$ HBW 5/250 и $58,5 \pm 0,78$ HRB са локално възпроизводими, но сами по себе си не доказват радиална еднородност, якост, износоустойчивост или експлоатационен ресурс на целия детайл. От инженерна гледна точка втулката съчетава плътна макроструктура, Cu-богата пластична матрица и потвърди вторични области, което е предпоставка за добра носеща способност. Критичният критерий за приемане не следва да бъде само средната твърдост, а контролът на пространственото изменение на химичния състав, фазовото разпределение и механичния отговор по дебелината на стената. Практически обоснована система за производствен контрол трябва да свързва радиално разрешено пробовземане, фазова верификация и механични и трибологични изпитвания с параметрите на леене и последващата обработка. Получените изводи се отнасят до изследваната проба и пренасянето им към производствена серия изисква статистически представителен брой детайли и повторяем контрол при установени технологични условия.

Литература

1. Kim JK, Rohatgi PK. Interaction between moving cellular solidification front and graphite particles during centrifugal casting. *Materials Science and Engineering A*. 1998;244(2):168-177. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00539-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00539-X)
2. Liu Y, Chen C, Qi ZJ, Lyu WL. Effect of PbS on microstructure of high lead tin-bronze alloy by centrifugal casting. *Journal of Northeastern University Natural Science*. 2015;36(4):512-516. <https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2015.04.013>
3. Kestursatya M, Kim JK, Rohatgi PK. Wear performance of copper-graphite composite and a leaded copper alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2003;339:150-158. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00114-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00114-4)
4. Stošić Z, Manasijević D, Balanović L, et al. Effects of composition and thermal treatment of Cu-Al-Zn alloys with low content of Al on their shape-memory properties. *Materials Research*. 2017;20(5):1425-1431. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0153>
5. Ćorić D, Žmak I. Influence of ausforming treatment on super elasticity of Cu-Zn-Al shape memory alloy. *Buildings*. 2021;11:22. <https://doi.org/10.3390/buildings11010022>

6. Longauer S, Makroczy P, Janák G, Longauerová M. Shape memory effect in a Cu-Zn-Al alloy with dual phase α/β microstructure. *Materials Science and Engineering A*. 1999;273-275:415-419. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00309-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00309-3)
7. Yu Y, Chen W, Bu C, Wu W, Li X, Tian W. Effect of heat treatment on microstructure evolution, phase transformation and mechanical properties of dual phase Cu-Zn alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;904:163960. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163960>
8. Hammi M, El Bourakadi K, Dahhou M, et al. Influence of casting parameters on the surface and mechanical properties of leaded brass alloys: mechanistic insights. *Discover Applied Sciences*. 2025;7:611. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07120-z>
9. Panagopoulos CN, et al. Lubricated wear behavior of leaded $\alpha+\beta$ brass. *Tribology International*. 2012;50:1-5. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.12.016>
10. Moshkovich A, Perfilyev V, Lapsker I, Rapoport L. Friction, wear and plastic deformation of Cu and α/β brass under lubrication conditions. *Wear*. 2014;320:34-40. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.08.016>
11. Johansson J, Alm P, M'Saoubi R, Malmberg P, Ståhl JE, Bushlya V. On the function of lead (Pb) in machining brass alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;120:7263-7275. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09205-0>
12. Du L, Zhang G, Wei L, Xing J, Jiang Y, Li Q, Gu H. Inhomogeneous phases in Cu-Zn-Al-Fe-Mn and the micro-galvanic coupling in 3.5 wt.% NaCl solutions at different pH. *Corrosion Science*. 2022;195:110005. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.110005>
13. Lobo FG, Silva MR, dos Santos VT, et al. Effects of thermal variables of solidification on the microstructure and hardness of the manganese bronze alloy Cu-24Zn-6Al-4Mn-3Fe. *Metals*. 2024;14:1186. <https://doi.org/10.3390/met14101186>
14. Nascimento MS, Santos GA, Teram R, dos Santos VT, Silva MR, Couto AA. Effects of thermal variables of solidification on the microstructure, hardness, and microhardness of Cu-Al-Ni-Fe alloys. *Materials*. 2019;12:1267. <https://doi.org/10.3390/ma12081267>
15. Chaskis S, Maritsa S, Stavroulakis P, Papadopoulou S, Goodall R, Papaefthymiou S. Compositional design and thermal processing of a novel lead-free Cu-Zn-Al-Sn medium entropy brass alloy. *Metals*. 2024;14:620. <https://doi.org/10.3390/met14060620>