

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності
Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

Вплив пластичної деформації та відпалу на структуру і
властивості ювелірних сплавів золота / The effect of
plastic deformation and annealing on the structure and
properties of jewelry gold alloys

спеціальності 132 "Матеріалознавство"

освітня програма "Індустріальний інжиніринг і менеджмент"

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ПМ)с-31
Галета Денис Сергійович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ ІМБІРОВИЧ Н.Ю.

“ 03 ” _____ 01 _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Галеті Денису Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Вплив пластичної деформації та відпалу на структуру і властивості ювелірних сплавів золота*

керівник роботи *Гусачук Дмитро Анатолійович, к.т.н., доцент*,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “31” 12 2025 року №02 ^{540/01-}

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи « 19 » травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи *Зразки сплаву золота 585 проби (лом), матеріали технології, технічні умови, стандарти*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ; аналіз технічної літератури;*

опис методики досліджень; вивчення впливу деформації на структуру сплаву золота 585 проби; дослідження впливу гартування та відпалу на структуру та властивості зразків золота; висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1 слайд – характеристика дорогоцінних металів; 2 слайд – підготовка зразків для досліджень; 3 слайд – методика дослідження; 4 слайд – дослідження структури зразків золота; 5 слайд – дослідження структури деформованих зразків золота; 6 слайд – твердість деформованих зразків; 7 слайд – вплив гартування на структуру зразків; 8 слайд – вплив термічної обробки на структуру зразків; 9 слайд – висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтроль</i>	<i>доцент кафедри матеріалознавства к.т.н. Мисковець С.В.</i>		

7. Дата видачі завдання «03» 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	<i>Вступ. Аналіз літературних джерел.</i>	<i>05.05.2026</i>	
2.	<i>Планування та виконання експерименту.</i>	<i>12.05.2026</i>	
3.	<i>Опис та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій та висновків</i>	<i>19.05.2026</i>	

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Галета Д.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Гусачук Д. А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Галета Д.С. Вплив пластичної деформації та відпалу на структуру і властивості ювелірних сплавів золота. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП "Індустріальний інжиніринг і менеджмент" спеціальності 132 "Матеріалознавство". Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

В кваліфікаційній роботі на основі досліджень пластичної деформації та термічної обробки експериментальних зразків встановлено вплив ступеня деформації та параметрів відпалу на структуру та властивості червоного золота 585 проби, складу: Au – 58,5 %; Ag – 8,2 %; Cu – 33,3 %. Встановлено, що для поновлення пластичності та зменшення твердості, з метою виконання всіх необхідних прийомів формування ювелірного виробу, доцільно проводити поміжну термічну обробку, за режимом відпалу гартування, від температур 800...900 °С. Середовищем гартування може слугувати звичайна вода.

Текстова частина роботи містить 49 сторінок тексту, 24 рисунки, 3 таблиці, 15 літературних джерел та посилань, 1 додаток у вигляді презентації результатів досліджень. Презентація представлена на 8 слайдах.

Ключові слова: золото, сплав, проба золота, ювелірне виробництво, вальцювання, пластична деформація, структура, гартування, відпалювання, твердість.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 5126.00.00.000 ПЗ			
Розроб.		Галета			Вплив пластичної деформації та відпалу на структуру і властивості ювелірних сплавів золота / The effect of plastic deformation and annealing on the structure and properties of jewelry gold alloys	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Гусачук					3	49
Реценз.						ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ(ІІМ)с-31		
Н. Контр.		Мисковець						
Затверд.		Імбирович						

ANNOTATION

Haleta D. The effect of plastic deformation and annealing on the structure and properties of jewelry gold alloys. Manuscript.

Qualifying work of a bachelor of the Educational Program "Industrial engineering and management" in the specialty 132 "Materials Science". Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of sources used and appendices.

In the qualification work, based on studies of plastic deformation and heat treatment of experimental samples, the influence of the degree of deformation and annealing parameters on the structure and properties of red gold 585 sample, composition: Au – 58.5%; Ag – 8.2%; Cu – 33.3%. It was established that to restore plasticity and reduce hardness, in order to perform all the necessary techniques for forming a jewelry product, it is advisable to carry out an auxiliary heat treatment, according to the annealing quenching mode, from temperatures of 800...900 °C. Ordinary water can serve as the quenching medium.

The text part of the work contains 49 pages of text, 24 figures, 3 tables, 15 literary sources and references, 1 appendix in the form of a presentation of the research results. The presentation is presented on 8 slides.

Key words: gold, alloy, gold standard, jewelry production, rolling, plastic deformation, structure, hardening, annealing, hardness.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Матеріали ювелірного виробництва	7
1.2. Характеристика дорогоцінних металів	8
1.3. Характеристика золота та його сплавів	11
1.4. Особливості пластичної деформації золота та його сплавів	17
1.5. Процеси вальцювання та волочіння в ювелірній справі	21
1.6. Мета та завдання кваліфікаційної роботи	23
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	24
2.1. Підготовка зразків для проведення досліджень.....	24
2.2. Методика дослідження структури зразків золота.....	28
2.3. Моделювання пластичного деформування зразків	30
2.4. Методи оцінки механічних властивостей зразків.....	33
РОЗДІЛ 3 ВПЛИВ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА СТРУКТУРУ ЗЛОТИХ ЗРАКІВ 585 ПРОБИ.....	35
3.1. Структура литих зразків сплаву золота 585 проби.....	35
3.2. Структура зразків золота після багатократного вальцювання	37
3.3. Вплив пластичної деформації на твердість зразків	40
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ ЗЛОТА 585 ПРОБИ	42
4.1. Структура зразків після гартування	42
4.2. Вплив температури гартування на твердість сплаву золота.....	44
4.3. Вплив температури відпалу на твердість загартованих зразків	45
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48
ДОДАТКИ	

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Ювелірне мистецтво є одним з найдавніших і широко розповсюджених видів декоративно-прикладного мистецтва у якому знаходить втілення прагнення до краси, що властиве людині. Ювелірні вироби (від голл. juweell – дорогоцінний камінь) – це прикраси і предмети побуту, що виготовлені зі шляхетних металів у поєднанні з дорогоцінним чи напівкоштовним камінням, а також художні вироби з недорогоцінних матеріалів, виконані з великою майстерністю. Для ювелірного мистецтва характерне тонке розуміння фізичних властивостей матеріалу.

Ювелірні прикраси завжди привертають до себе увагу красою, витонченістю та витонченістю виконання, викликають загальне захоплення. У них тісно переплітаються елементи декоративно-прикладного мистецтва, художньої творчості, ремесла майстрів та сучасного виробництва. Вони відрізняються від інших видів виробів декоративного мистецтва особливими ознаками: мініатюрністю, елегантністю, бездоганним виконанням, використанням дорогоцінних матеріалів тощо.

Інтерес до ювелірної галузі зростає з кожним роком. Це зумовлено двома причинами. З художньої точки зору ювелірні вироби демонструють найвищий ступінь краси, досягнутий людським розумом та його руками. З економічної - ювелірне виробництво є рентабельним і дозволяє отримати високий прибуток за низької матеріаломісткості виробів.

Під час виконання кваліфікаційної роботи магістра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту (Gemini), а також генерації контенту (графіки, таблиці, списку використаних джерел) виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Матеріали ювелірного виробництва

Матеріали, які використовуються для виготовлення ювелірних прикрас діляться на металеві, неметалеві і допоміжні [1]. До металевих матеріалів відносять дорогоцінні метали, сплави дорогоцінних металів, кольорові метали, сплави кольорових металів; до неметалевих матеріалів – дорогоцінні, напівдорогоцінні камені, органічні і штучні камені, скло, пластмаси, кістка, ріг, дерево, текстиль, шкіра, резина, фарфор, лаки, емаль. Допоміжні матеріали – кислоти, луги, солі, полірувальні пасти, вогнетривкі матеріали, клеї.

До основних матеріалів відносяться метали та неметали, що використовуються для виготовлення ювелірних виробів. Вони піддаються зміні розмірів, форми, чи поліпшенню декоративних властивостей.

Як відомо [2] усі метали та їх сплави – це кристалічні тіла. Вони складаються з дрібних, по-різному орієнтованих один до одного кристалітів (зерен) неправильної форми. Атоми зернах розташовуються закономірно у вигляді правильної кристалічної ґратки. Зв'язок відбувається між атомами, що віддали зовнішні електрони у спільне користування та цими вільними електронами. Електропровідність металів якраз викликана присутністю в них вільних електронів, які можуть переміщатися у потенційному полі решітки. Пластичність пояснюється періодичністю атомної структури та відсутністю спрямованості металевого зв'язку. Під час пластичної деформації металу, тобто у випадку зміщенні однієї частини матеріалу щодо іншої, зв'язок між атомами не порушується.

У чистому вигляді метали не мають необхідних для виробництва ювелірних виробів технологічних і фізико-механічних властивостей і тому використовуються рідко. У зв'язку з цим широке застосування знайшли

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

сплави, що одержуються з двох або більше металів, а також металів і неметалів. Хімічні елементи, що утворюють сплав, називаються компонентами.

Залежно від вартості метали поділяються на три групи [1]:

- дорогоцінні (шляхетні): золото, срібло та метали платинової групи (платина, паладій, родій, іридій, осмій, рутеній);
- недорогоцінні: мідь, титан, алюміній;
- інші: кадмій, нікель, цинк тощо.

До неметалевих матеріалів відносяться камені природного та штучного походження, пластмаси та інші матеріали, що мають декоративні властивості.

Неметалеві матеріали від металів відрізняються певними властивостями: вони мають кристалічну чи аморфну структуру, меншу твердість і міцність, їм невластива провідність тощо.

До допоміжних матеріалів належать інші матеріали, призначені для здійснення технологічного процесу виготовлення ювелірних виробів.

У ювелірному виробництві застосовують безліч хімічних реактивів, матеріалів фіксації елементів декору, зокрема клеї, засоби знежирення поверхонь, віск для моделювання у процесах литва, флюси як матеріали для литва та паяння, вогнетривки та еластомери.

1.2. Характеристика дорогоцінних металів

Дорогоцінні метали відрізняються особливою хімічною стійкістю, гарним зовнішнім виглядом (благородством), пластичністю, ковкістю. Вони мають щільні кристалічні ґратки, гарний блиск, велику густину, стійкість до атмосферних впливів, а також високу провідність [1, 3]. У чистому вигляді ці метали не застосовують для виготовлення виробів, тому що вони порівняно м'які і володіють малою механічною міцністю. Тому використовують сплави благородних металів з іншими металами. У порівнянні з чистим металом сплави володіють кращими механічними властивостями, більш низькою

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Срібло у самородному вигляді зустрічається рідко. В основному, його добувають зі свинцево-цинкових і мідних руд шляхом їхнього збагачення і спеціальної обробки. Срібло – красивий блискучий, білий, м'який, тягучий метал, стійкий до окислювання, що володіє винятковою відбивальною здатністю. Воно значно легше за золото: густина – 10,5 г/см³, температура плавлення – 961,8 °С, твердість за шкалою Мооса – 2,7.

У виробництві ювелірних виробів застосовують, головним чином, срібно-мідний сплав, що містить найчастіше 87,5% срібла і 12,5% міді.

Вироби з низькопробних сплавів відносно швидко покриваються темним нальотом у результаті впливу сірководню, що міститься в повітрі. Столове срібло також швидко тьмяніє під впливом кислот, що містяться в їжі.

Платина (*Pt*) у самородному стані зустрічається, головним чином, у вигляді дрібних блискіток у глибинних гірських породах. Платина – сріблясто-білий, важкий, тугоплавкий метал густиною 21,4 г/см³, твердість за шкалою Мооса – 4,3, температура плавлення – 1769°С. Це дуже стійкий метал, що не окисляється при найвищих температурах.

Використовуються численні сплави платини – з іридієм, родієм, паладієм, сріблом, міддю та деякими іншими металами. У виробництві ювелірних виробів використовують сплав платини 950 проби, що містить 95% платини і 5% іридію. Сплави платини застосовують, в основному, для виготовлення оправ для кілець, каблучок та інших виробів при кріпленні діамантів, перлів і фарбованих каменів.

Метали платинової групи зустрічаються при видобутку платини, тісно пов'язані з нею і близькі між собою за властивостями. До них відносять паладій, родій, рутеній, іридій та осмій.

Паладій (*Pd*) – метал сріблито-білого кольору, що за зовнішнім виглядом нагадує платину. Щільність паладію – 12,16 г/см³, твердість за шкалою Мооса – 4,8, температура плавлення – 1552 °С. Паладій має гарну ковкість і тягучість. У ювелірній справі паладій використовують у сплаві з іншими металами.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Іридій (*Ir*) зустрічається в платинових рудах, видобувається у процесі переробки й очищення платини. Це тендітний метал сріблито-сірого кольору, хімічно дуже стійкий (не розчиняється в кислотах і навіть у «царській горілці»), дуже важкий і твердий. Щільність іридію – 22,42 г/см³, твердість за шкалою Мооса – 6,5, температура плавлення – 2410 °С. У ювелірній справі застосовують платиново-іридієвий сплав, що містить 5...10 % іридію.

Родій (*Rh*) – метал блідо-блакитного кольору, за зовнішнім виглядом схожий на алюміній. Щільність родію – 12,4 г/см³, твердість за шкалою Мооса – 5,5...6, температура плавлення – 1960 °С. Хімічно стійкий. Застосовується для покриття найтоншим шаром срібних виробів для захисту їх від потемніння, а також виробів і окремих деталей зі сплаву білого золота для збереження блиску.

Рутеній (*Ru*) – метал сріблясто-білого кольору, що одержується у процесі переробки й очищення платини. За зовнішнім виглядом подібний до платини. Щільність рутенію – 12,26 г/см³, твердість за шкалою Мооса – 6,5, температура плавлення – 2334 °С. Через крихкість рутеній не застосовується в ювелірній промисловості і лише в незначних кількостях використовується в ювелірній справі в сплавах із платиною.

Осмій (*Os*) зустрічається в платинових рудах у вигляді сплавів з іридієм. Це твердий, тугоплавкий, хімічно стійкий метал олов'яно-білого кольору із сіро-блакитним відтінком, найважчий серед металів платинової групи. Щільність осмію – 22,48 г/см³, твердість за шкалою Мооса – 7, температура плавлення – 3033 °С. Сплави осмію рідко застосовують для виготовлення ювелірних виробів.

1.3. Характеристика золота та його сплавів

У чистому вигляді золото володіє приємним яскраво-жовтим кольором. Це важкий, блискучий, м'який метал із густиною 19,32 г/см³, твердість за шкалою Мооса 2,5 [5].

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Температура плавлення хімічно чистого золота – 1063 °С. Золото має найвищі в порівнянні з усіма іншими металами пластичність і ковкість. Воно легко розплющується на найтонші листові заготовки, фольгу. Оскільки золото має ГЦК ґратку холодна пластична деформація викликає швидке його зміцнення, з інтенсивним підвищенням густини дислокацій.

При виготовленні ювелірних виробів застосовують сплави з визначеною кількістю золота і лігатури, що значно підвищує твердість і міцність сплаву. У залежності від складу сплаву міняються відтінки і колір золота. Кількість чистого золота в сплаві називають пробой. Існує декілька систем проб. Метрична проба – це кількість хімічно чистого золота в 1000 вагових одиниць лігатурного сплаву [5].

Стандартні сплави жовтого золота на основі золото-срібної міді можуть використовуватися для багатьох виробничих процесів. Їх можна назвати «універсальними» сплавами. Однак оптимізація золотих сплавів для конкретного виробничого процесу можлива шляхом використання інших легуючих добавок, які можуть впливати на відповідні властивості, такі як ливарність та розмір зерна, а також на механічні властивості, наприклад, міцність, твердість та пластичність.

Фазова діаграма бінарного сплаву Au-Ag (рисунок 1.1) має суцільну широку однофазну зони нижче лінії ліквідус, що говорить про необмежену розчинність обох компонентів в твердому стані [6].

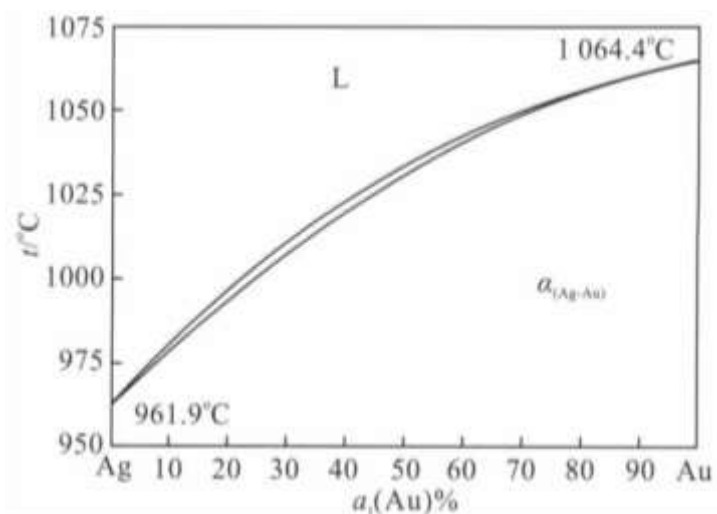


Рисунок 1.1 – Діаграма стану системи Au-Ag

Додавання срібла понижує температуру плавлення золота. Між лініями ліквідус та солідус існує невеликий температурний проміжок, тому всі сплави характеризуються гарними ливарними властивостями. Якість литва Au-Ag сплавів є дуже доброю. Сплави мають високу пластичність, але невисоку твердість.

Фазова діаграма бінарного сплаву Au-Cu (рисунок 1.2) має широкую однофазну зону нижче лінії ліквідус та лінії вторинної перекристалізації нижче 410 °C [6, 7]. Це вказує на появу вторинних фаз у сплавах з вмістом міді 10...50 %. Наявність впорядкованих фаз зміцнення ($AuCu$ та $AuCu_3$) у сплавах Au-Cu викликає їх зміцнення та підвищення твердості, що покращує їх зносостійкість та експлуатаційні якості. Характерним є швидке пониження температури плавлення золота при розчинення у ньому міді до 20 %, що при більших її концентраціях змінюється на ріст цього показника. Інтервал кристалізації сплавів також невеликий, особливо в діапазоні вмісту міді 15...25 %, де проміжку кристалізації практично не існує. Це забезпечує для сплавів даної концентрації найкращі ливарні властивості.

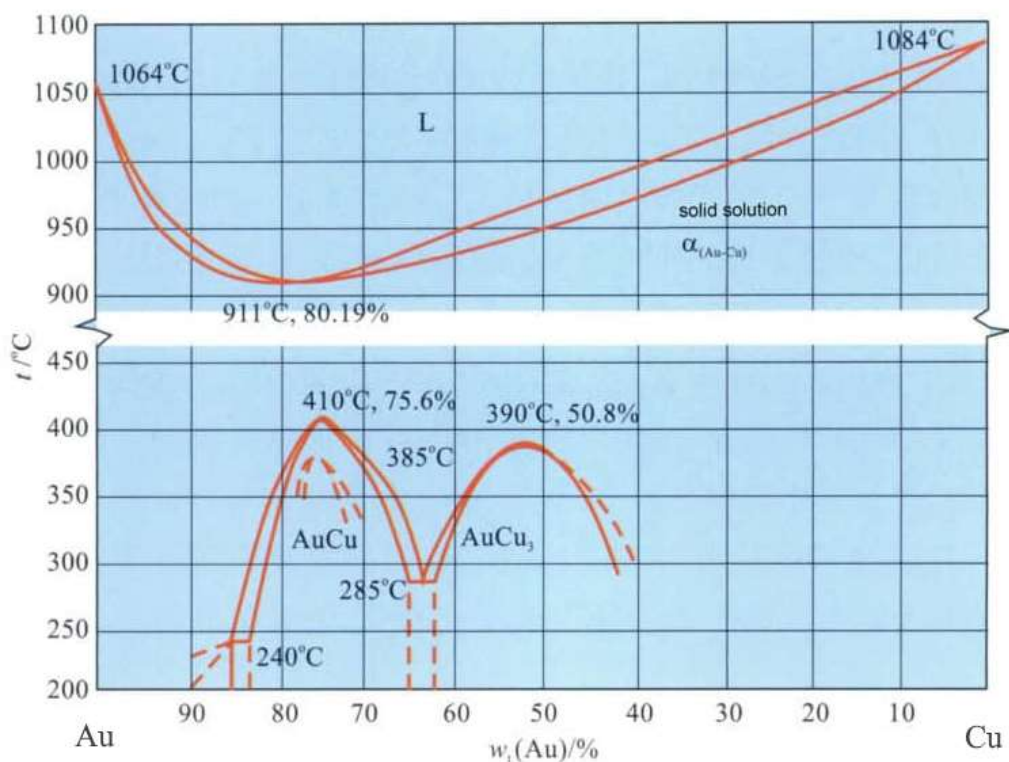


Рисунок 1.2 – Діаграма стану системи Au-Cu [7]

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Склад сплавів Au-Cu, на відміну від бінарних сплавів Au-Ag, суттєво впливає на його механічні властивості. Мідь є ефективним зміцнюючим елементом та широко використовується для ювелірних сплавів золота у кількостях до 25 %. На механічні властивості сплавів Au-Cu суттєво впливають пластична деформація та термічна обробка.

Отже, додавання міді підвищує твердість золота, тому сплави золото-срібло-мідь є найбільш уживаними [5]. Срібло у складі золотого сплаву зберігає його м'якість, ковкість, знижує температуру плавлення, регулює колір (рисунок 1.3). У міру додавання срібла золото зеленіє, набуваючи жовто-зеленого окрасу, якщо вміст срібла перевищує 30 %, колір стає жовто-білим і далі стає все світлішим, а при 65 %, жовтий відтінок зникає повністю. Мідь підвищує твердість, зберігає ковкість та тягучість золотого сплаву. Сплав набуває червонуватого відтінку, що посилюється в міру збільшення відсоткового вмісту міді; при вмісті 14,6 % міді золотий сплав стає яскраво-червоним. Але мідь має й негативні властивості – знижує антикорозійні властивості сплаву, при високій концентрації поверхня сплаву тьмяніє.

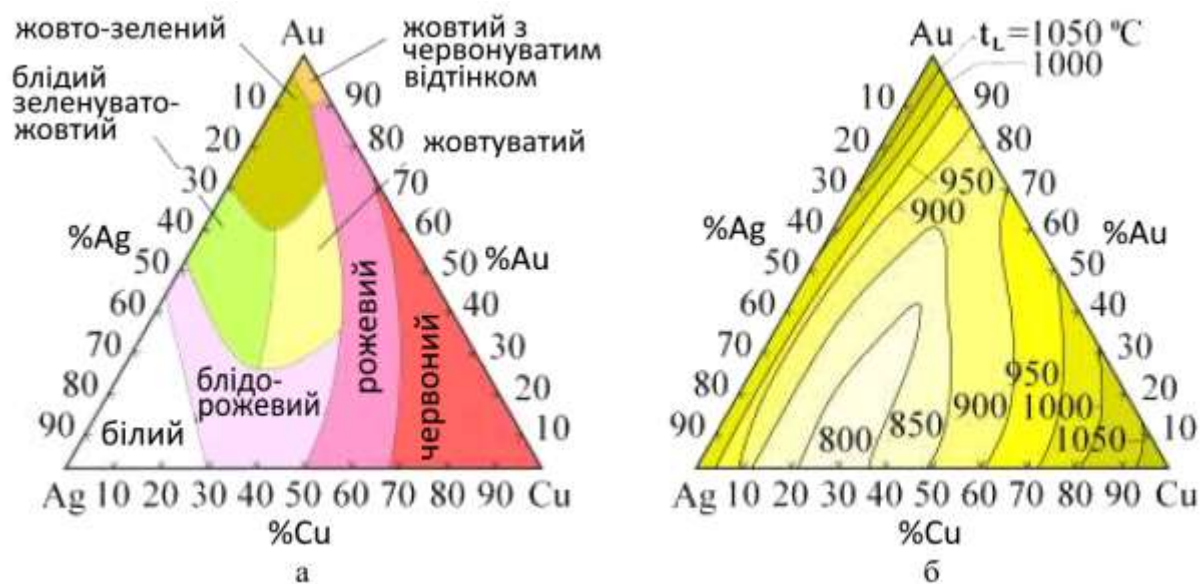


Рисунок 1.3 – Колірна діаграма (а) та діаграма з ізолініями температури ліквідус (б) системи Au–Ag–Cu [8]

Сплави золото-платина-паладій, що містять до 40 % паладію, являють собою механічну суміш паладію і твердих розчинів золота в платині. Сплави з

великим вмістом паладію являють тверді однорідні розчини з поєднань трьох металів один в одному. Такі сплави мають високу твердість.

Сплави золото-паладій-срібло утворюють твердий розчин, що відрізняється високою пластичністю. Як сплав, що складається виключно з благородних металів, він не піддається окисленню.

У ювелірному виробництві для сплавів золота встановлені такі проби (метрична система): 958, 750, 585 (583), 500, 375. Дані сплави мають характерні властивості [5]. Крім них існують інші проби золотих сплавів (986 – дукатне золото, 900 – монетне, 333), що не мають ювелірного застосування.

Сплав проби 958 – з високим вмістом золота. Він має яскраво-жовтий колір, характерний для золота, і має високу пластичність. В ювелірному виробництві використовується рідко: в основному для виготовлення обручок.

Сплав 750 проби має хороші технологічні властивості: він має добру рідкотекучість, гарно піддається пластичному деформуванню. Стандарт передбачає десять видів сплаву, які можуть мати кольори від зеленого до червоного. Теплофізичні властивості даного сплаву дозволяють використовувати його як основу під емальювання.

Сплав проби 585 має дев'ять різновидів (див. додаток) з різними кольорами і відтінками. Він має гарні декоративні та технологічні властивості для механічної обробки та пластичного деформування. Є основним сплавом виготовлення більшості ювелірних виробів. Сплав 583 проби використовується замість сплаву 585 проби, переважно для виконання ремонтних робіт, а також для виготовлення ювелірних виробів та припоїв у ремонтних майстернях.

Сплав 500 проби має одну марку. Він відрізняється низькими ливарними властивостями. Сплав включено до стандарту для здійснення пробірного нагляду наявних у обігу виробів. Цей метал нетехнологічний, тому рідко знаходить застосування в ювелірних виробках.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Якщо напруги не перевищують межі плинності, жодних змін у структурі не відбувається, а структуроутворення починається лише за пластичної деформації. Аналіз численних експериментальних даних щодо формування структур деформованих металів дозволяє зробити висновок, що процеси структуроутворення в різних металах мають дуже подібну послідовність явищ, яка відповідає етапам формування структури. Відмінності є невеликими і проявляються, як правило, у початковій стадії деформації, коли даються ознаки індивідуальні особливості металу.

Особливості можуть бути і в наявності ще одного додаткового механізму деформації, наприклад, за рахунок оборотних мартенситних перетворень можуть виявлятися і на остаточній стадії – при руйнуванні. І все-таки сценарій єдиний – що далі від рівноваги, що більше ступінь пластичної деформації, тим складніша структура і вище деформаційне зміцнення.

Отже, під час пластичної деформації змінюється щільність дислокацій та одночасно підвищується міцність металу. З'ясуємо механізми, які призводять до розмноження дислокацій та підвищення міцності.

Нехай дислокація, під дією напруг переміщується в площині легкого зсуву. Якщо на своєму шляху відрізок дислокації зустрічає перешкоду (рисунок 1.4), гвинтовий відрізок, що має безліч можливих систем ковзання, переходить в іншу площину і починає обходити перешкоду. Переміщення дислокації в цій новій площині вимагає великої напруги і називається поперечним ковзанням. Зазначимо, що при переході гвинтової дислокації у нову площину утворилися відрізки крайових дислокацій із протилежними знаками.

Якщо у новій (суміжній) системі ковзання дислокація зуміла пройти шлях, необхідний огинання перешкоди, їй вигідно повернутися у вихідну систему легкого ковзання, напруги, у якій мінімальні. Однак ця нова площина знаходиться декількома шарами вище вихідної, а кінці нового відрізка BB' «закріплені» крайовими відрізками AB і $A'B'$. Повернення дислокації у вихідну

його саплави як метали з гране-центрованою кристалічною граткою мають свої особливості пластичного течіння, які слід враховувати під час механічної обробки, тиснення, прокатування та кування, у тому числі процесів ручного пластичного формування.

Склад, мікроструктура та історія обробки сплаву взаємопов'язані, і спільно впливають на властивості сплаву, будь то хімічні, наприклад, стійкість до корозії та потьмяніння, фізичні (щільність, колір) або механічні (міцність, ковкість, твердість). Це, у свою чергу, впливає на технологічність та експлуатаційні характеристики.

Більшість металів і сплавів складаються з багатьох кристалів, або зерен, як ми, металурги, їх називаємо; таким чином, більшість сплавів є полікристалічними. Є деякі рідкісні винятки, такі як монокристалічні лопатки авіаційних турбін та аморфні або склоподібні метали.

У багатьох роботах автори зосереджуються на макро- та мікроструктурах ювелірних сплавів золота, зокрема на розмірі та формі зерен, наявності фаз зміцнення. Важливим є визначення закономірностей, знання яких дасть можливість впливати на них шляхом лиття, легування, механічної обробки та відпалу.

Далі проходить важливий етап деформаційного зміцнення, який включає деформацію та термообробку. На цьому етапі досягається приблизно 50-відсотковий ступінь деформації. Формується спочатку волокниста, а потім, при наступному відпалі – рекристалізації, дрібнозерниста структура металу. Тут закладається фундамент високих показників якості майбутнього кільця: пружно - пластичні властивості, оброблюваність, чистота поверхні, відбивна здатність, відсутність напружень та дефектів.

Спочатку структура червоного золота у литій заготовці характеризується досить великим зерном (рисунок 1.5), твердість HV на рівні 1600...1800 МПа, відносне подовження $\delta = 4...6 \%$. Сплав має порівняно високу крихкість [11].

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

через фільтери. Для запобігання розривам нагартваного (зміцненого) золота обов'язковим є проміжний відпал. Процеси дозволяють отримувати пластини, прутки та дріт потрібного розміру. Обидва процеси засновані на високій пластичності золота, що дозволяє змінювати його форму без руйнування при правильному дотриманні технології відпалу [12].

Вальцювання золота – це процес деформації золотих заготовок (аркушів, прутків) шляхом пропускання їх через валки вальцювального набору для отримання пластин, дроту або зміни їх товщини. Це ключовий ювелірний метод, що забезпечує рівномірне зменшення перерізу, наклеп металу та отримання точних розмірів перед подальшою обробкою.

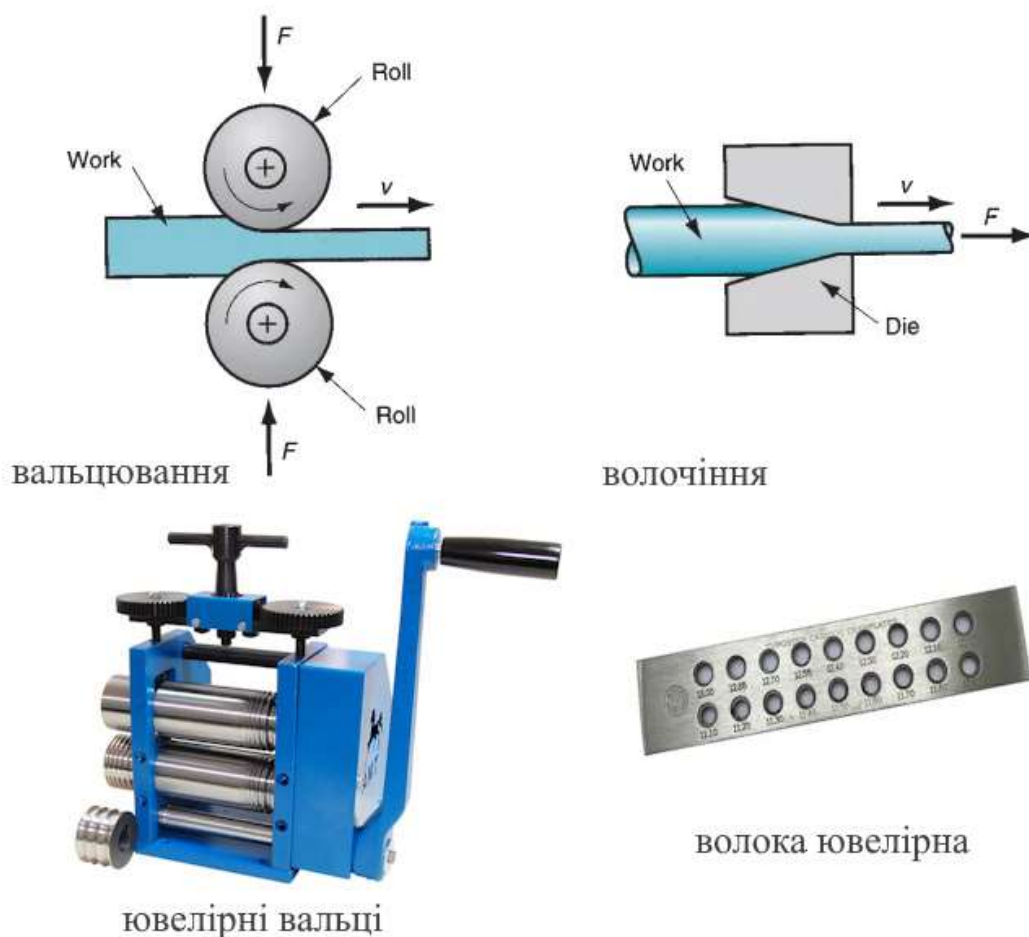


Рисунок 1.6 – Схема та обладнання вальцювання та волочіння

Для процесу вальцювання в ювелірній справі використовуються ювелірні вальці (ручні або електроприводом) з гладкими валками (для листа) або струмками (для дроту/прутка). Золото пропускають між валками, поступово зменшуючи зазор (підтискуючи вальці) до досягнення потрібної товщини.

Волочіння використовується для отримання дроту різного перерізу. Заготовка протягається через отвори волоки (фільери) певного діаметра, що зменшується. Виконання процесу вимагає змащення та відпалу заготовки між переходами для зниження зусилля та запобігання обриву.

1.6. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Сплави дорогоцінних металів мають достатньо різноманітний склад. Гранецентроване пакування їх атомної будови накладає характерні особливості, пов'язані з перебігом процесів пластичної деформації, яку у технологічних прийомах формовки заготовок та виготовлення більшості ювелірних виробів здійснюють у холодному стані. Зміцнення та швидке накопичення дислокаційних дефектів зменшує ресурс пластичності металу, що потребує виконання термічного відпалювання сплавів золота для поновлення пластичності. Це особливо характерно для процесів вальцювання заготовок та волочіння, також ручного формування виробів, які є основними у технологіях ювелірного виробництва. Тому, вивчення впливу цього явища на структуру та властивості конкретних сплавів золота є актуальним завданням.

Метою бакалаврської роботи є встановити вплив пластичної деформації та відпалу на структуру і властивості ювелірних сплавів золота 585 проби.

Для досягнення мети роботи слід вирішити такі завдання:

- дослідити структуру литих зразків сплаву золота;
- дослідити вплив пластичної деформації на структуру та властивості зразків;
- дослідити вплив відпалу деформованих зразків на їх структуру та властивості;
- провести аналіз ту узагальнення результатів досліджень, на основі чого встановити вплив пластичної деформації та відпалу на структуру зразків.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Підготовка зразків для проведення досліджень

Найбільш популярні стандарти – золото 585 та 750 проби. Їх використовують для вивчення механічної міцності, твердості, кольору та корозійної стійкості. Вони легуються міддю, сріблом, нікелем, цинком чи паладієм.

У металофізиці для фундаментальних досліджень використовують бінарні та модельні системи. Для вивчення упорядкування фаз, наприклад, у системах Au-Cu або Au-Ag, застосовують спеціально виплавлені зразки із заданим ваговим співвідношенням чистих металів. Стандартні зразки сплавів золота використовуються для калібрування спектрометрів та пробірного аналізу. Це еталонні диски або гранули з точно сертифікованим складом державної служби пробірного контролю.

Заготовки для проведення комплексу досліджень отримували в процесі відкритої плавки лому золотих виробів та відходів 585 проби (рисунок 2.1). Відкрита плавка проводилась у відкритій плавильній керамічній чаші, факелом відкритого полум'я газового пальника.



Рисунок 1 – Лом та відходи золотих виробів 585 проби

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Перед виконанням плавки слід розрахувати склад необхідної проби, що утворюватиметься під час плавлення з шихти з певною ваговою кількістю дорогоцінного металу та металів, які її складають, поєднання яких часто називають лігатурою. Зокрема, масу складової шихти золота в сплаві X , у грамах, можна визначити за співвідношенням:

$$\frac{X}{M_{cn}} = \frac{Pr}{1000},$$

де: M_{cn} – маса сплаву, грами;

Pr – проба сплаву.

Вміст елементу у шихті E_u , у грамах, визначають за формулою

$$E_u = \frac{M_{cn} C_e}{100 - y_e} \cdot 100,$$

де: C_e – відомий вміст елементу в готовому сплаві, %;

y_e – відсоток вигоряння елементу під час плавлення (для золота – 0,1...0,2 %, срібла – 0,2...0,5 %, міді – 0,5...1,5 %, нікелю – 0,3...0,8 %, цинку – 2...10 %).

Вміст складових шихти X , у грамах, розраховують згідно формули

$$X = \frac{M_{cn} C_e}{100 - V_e} \cdot 100 - M_1 b_1 - M_2 b_2 - \dots - M_n b_n,$$

де: $M_1 \dots M_n$ – прийнята чи розрахункова кількість складових шихти, в грамах;

$b_1 \dots b_n$ – вміст елементу складових шихти, %;

n – вміст елементу у певній складовій (уламки проб, відходи литва, тощо) шихти, %.

Перед плавленням відходи ретельно зважували на ювелірних вагах (рисунок 2.2), з точністю до сотої грама. Зважування виконували як окремих шматків та частин золотих відходів, так і разом. Отримані дані використовували у розрахунку шихти для плавки.

Плавка здійснюється полум'ям газового пальника, в якому пари бензину змішуються з повітрям. Цей спосіб часто застосовують для індивідуальної

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

плавки дорогоцінних сплавів до 30 грам. В якості флюсу використовували мікрокристалічну буру.



Рисунок 2.2 – Зважування залишків та відходів золотих виробів

Перед плавленням стінки тигля мають бути оброблені бурою для видалення забруднень. Бура (тетраборат натрію ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), білий кристалічний порошок) також застосовується під час плавки та паяння більшості дорогоцінних сплавів як флюсовий матеріал. Як замітник можуть застосовувати борну кислоту.

Основним інструментом для відливання плавки була спеціально зібрана чавунна виливниця (рисунок 2.3). Форма жолоба дозволяла отримувати видовжені призматичні зразки сплаву золота.



Рисунок 2.3 – Виливниця з сірого чавуну

Як допоміжні інструменти застосовували ступки для подрібнення флюсів, совочки для завантаження шихти, підставки, щіпки та кліщі для переносу тиглів, мішалки у вигляді вогнетривких стрижнів, тощо.

Плавку двох дорогоцінних металів (Au та Ag) проводять у наступній послідовності: плавка золота, плавка вторинних сплавів, плавка лігатури. Температура плавлення потрібних сплавів визначається кількістю міді в них і становить при вмісті міді до 2,0 % 1180...1240 °С, до 8,4 % – 1170...1230 °С, до 42,7 % – 1150...1230 °С.

Перед заливанням рідкого металу форму чавунної виливниці посипали бурою. Края виливниці закривали металевими пластинами для обмеження витікання рідкого металу. Форма виливниці дозволяла отримувати стрижневі зразки. Їх розміри та форма (рисунок 2.4) були оптимальними для виконання наступного вальцювання з метою оцінки впливу ступеня деформації на структуру та властивості золота 585 проби.



Рисунок 2.4 – Зразки золота після відливання

Після відливання зразки охолоджували та промивали у 10 % розчині сірчаної кислоти у воді для видалення залишків флюсу бури. Довжину виплавлених зразків золота обмежували кількістю залитого металу жолоб ливарної форми чи виливниці. Переважно отримували зразки розмірами, які були оптимальні для подальшого деформування на ювелірних вальцях.

2.2. Методика дослідження структури зразків золота

Для аналізу мікроструктури зразків, отриманих і сплаву золота, були вибрані традиційні методи металографічних досліджень [13, 14].

Підготовка та виготовлення мікрошліфів полягала, спочатку, у грубому шліфуванні, далі – тонкому шліфуванні та поліруванні. Обробка на абразивному камені зернистістю 45...60 мкм проводиться для вирівнювання поверхні зразків. Під час цього використовували ручне шліфування (рисунок 2.5). Грубе початкове шліфування здійснювали послідовно на трьох шліфувальних шкурках: № 280...320, № 150...200, № 100...150, також ручним способом. Після цього проводили тонке шліфування, послідовно на дрібнозернистих шліфшкурках: M40, M28 і M20.



Рисунок 2.5 – Шліфування зразків

Полірування проводилось на алмазних пастах: АСМ 20/14, АСМ 10/7 і АСМ 5/3. Полірування проводять на спеціальному полірувальному верстаті, диск якого обтягнтий сукном або фетром, при частоті обертання 400...600 об/хв. При переході з одного абразиву до іншого необхідно обертати зразок на 90° (перпендикулярно попередньому напрямку) і шліфувати до повного зникнення рисок, отриманих при попередній операції шліфування чи полірування.

Для дослідження структурного стану експериментальних зразків були залучені методи оптичної металографії. В дослідженнях використовували

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

оптичні мікроскопи ММП-14Ц, МІМ-10, МБС-10 (рисунок 2.6). Дослідження структури проводили у світлому полі мікроскопу в режимі вимкнення фазового контрасту.



Рисунок 2.6 – Мікроскопи ММЦ-14Ц та МІМ-10

Виявлення мікроструктури проводиться перш за все розгляданням шліфа під мікроскопом у нетравленому стані при невеликих збільшеннях: $\times 100 \dots 200$ разів. Вивчення нетравленого зразка дозволяє визначити наявність неметалічних включень, пор та тріщин і встановити їх форму.

Подальше вивчення структури проводиться на травленому зразку. Найбільш застосовувані методи виявлення мікроструктури сплавів золота та платини є електролітичне травлення спеціальними розчинами.

Як відомо сплави золота мають високу корозійну стійкість та неокислюються навіть у кислотах. Тому для виявлення структури застосовують спеціальні методи, зокрема електролітичне травлення та полірування. В роботі для виявлення структури сплавів золота, з вмістом дорогоцінного металу не манше 50 % доцільно використовувати електролітичне травлення.

Електролітичне травлення, для виявлення зернистої структури металографічно відполірованих зразків, проводили за кімнатної температури . Електролітом була розчин концентрованої хлоридної кислоти (38...40 % конц.) та хлориду заліза. Співвідношення електролітичного розчину становило

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

4,5 грам хлориду заліза на 100 мл концентрованої хлоридної кислоти. Прикладена напруга становила 3,0 В, а час електрополірування становив близько однієї хвилини (рисунок 2.7).

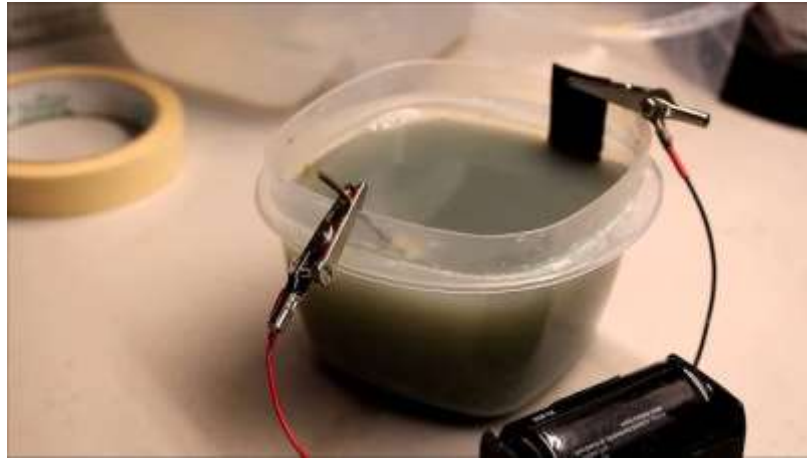


Рисунок 2.7 – Травлення золота в електроліті

Під час виконання процесу електрохімічного травлення зразків дотримувались встановлених норм та правил техніки безпеки та охорони навколишнього середовища [15]. Відпацьований електроліт зливали в герметичну скляну тару для відправлення на утилізацію в хімічну лабораторію.

Дослідження травленої структури зразків золота проводили при збільшеннях мікроскопу $\times 100 \dots 200$.

Для проведення кількісного та якісного структурного аналізу в експериментальній частині роботи використовувався метод порівняння зі стандартними шкалами структур згідно стандарту. Кількісний аналіз проводили за фотографіями мікроструктур, які отримувались при фотографуванні на цифрову камеру мікроскопу ММП-14Ц.

2.3. Моделювання пластичного деформування зразків

Отримані у виливницях стрижневі зразки видовженої призматичної форми піддавали багатократному пластичному деформуванню. Цей процес моделювали з використанням відомого, і досить поширеного в практиці обробки золотих сплавів та ювелірного виробництва, методу вальцювання

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

литих заготовок. Реалізація методу подібна до процесів прокатування металевих заготовок між валками, плоскими чи фігурними.

Як відомо вальцювання широко застосовується в процесах виготовлення ювелірних виробів з дорогоцінних металів, у тому числі сплавів золота всіх проб. Спосіб дозволяє отримати видовжені чи пласкі заготовки для подальшого машинного чи ручного формування ювелірних виробів по типу кілець, художнього оздоблення прекрас, моделювання різноманітних елементів ювелірних виробів.

Для виконання процесу вальцювання литих зразків у роботі застосовували ручні ковальські вальці, призначені для обтиснення видовжених заготовок (рисунок 2.8). Процес вальцювання зразків вконували в холодному стані, без нагріву заготовок, що давало можливість моделювати різний ступінь механічного наклепування сплаву золота 585 проби.



Рисунок 2.8 – Деформування зразків на ювелірних вальцях

В процесі кожного проходу заготовки через калібри валків ковальських ювелірних вальців січення зразка зменшувалось, що супроводжувалось його видовженням. Багатократне пропускання зразка через калібри вальців дозволяло моделювати різний ступінь пластичного деформування сплаву золота (рисунок 2.9). Таким чином оцінювали вплив ступеня пластичної деформації зразка на його структуру та механічний стан.

випадках пластичність суттєво зменшується, і черговий технологічний перехід пластичного формування може відбутись з руйнуванням заготовки металу. Тому процеси пластичного формування в ювелірному виробництві доцільно контролювати та своєчасно виконувати термічне відпалювання багатократно деформованих заготовок та виробів, з метою поновлення їх пластичності.

Вальцювання найбільш простий прийом формування більшості заготовок під час обробки золотих сплавів. Ним отримують заготовки різноманітного призначення, зокрема для наступного протягування.

2.4. Методи оцінки механічних властивостей зразків

Основним методом оцінки механічного стану зразків в процесі пластичної деформації при вальцюванні було визначення твердості за методом Роквела з використанням шкали В.

Вимірювання твердості за шкалою Роквелла (HRB) – це метод визначення твердості м'яких та середньотвердих матеріалів (мідь, латунь, м'які сталі), який базується на вимірюванні глибини проникнення сталеві кульки під дією двох послідовних навантажень.

Головні параметри методу є індентор та навантаження на нього. За способом HRB індентором слугує сталева загартована кулька. Діаметр кульки становить 1,5875 мм. Основне навантаження на кульку складає 990 Н. Для отримання точних та достовірних значень до інтертора на початку вимірювання спочатку прикладається попереднє навантаження 10 Н. Загальне навантаження становить 1000 Н. Під час вимірювання навантаження витримується протягом 2...8 секунд.

Етапи проведення випробування:

– індентор плавно вдавлюється в поверхню зразка під попереднім навантаженням, що фіксує початкову глибину та усуває похибки через нерівності поверхні;

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

– навантаження збільшується до загального і витримується протягом 2...8 сек.;

– основне навантаження знімається, а прилад вимірює різницю в глибині занурення між початковим і кінцевим станом.

Твердість визначається автоматично за шкалою В твердоміра Роквелла.

В роботі для визначення твердості зразків використовували універсальний твердомір NOVOTEST TC-БРВ. Він забезпечує можливість вимірювання твердості матеріалів за за способами Брінеля, Роквела та Віккерса.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

РОЗДІЛ 3
ВПЛИВ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА СТРУКТУРУ
ЗОЛОТИХ ЗРАКІВ 585 ПРОБИ

3.1. Структура литих зразків сплаву золота 585 проби

Золотий сплав отримували сплавлянням брухту та відходів виробництва від виробів 585 проби червоного золота. Склад золотого сплаву відповідав системі Au-Ag-Cu, з типовим вмістом основних компонентів за ДСТУ 6835-2004 для сплавів червоного золота: Au – 58,5 %; Ag – 8,2 %; Cu – 33,3 %. Тобто склад сплаву був близький до марки ЗлСрМ 585-80.

Плавку виконували у відкритій керамічній чаші газовим полум'ям, вагою близько 20 грам з кожної партії. Температуру сплаву перед розливанням у стрижневу виливницю доводили до 1250 °С. Флюс у вигляді кристалічної бури додавали вручну змішуючи з розплавленим сплавом за допомогою графітового стрижня протягом 30 секунд для досягнення однорідності та швидшого розчинення шматків лігатурного сплаву. Потім розплав витримували в ізотермічному режимі протягом 5 хвилин, перш ніж залити його в прямокутну чавунну форму (90×8×8 мм) для лиття. Повна операція плавлення проводилася на відкритому повітрі.

Вибраний сплав золота кристалізується в інтервалі температур 924...880 °С. На відміну від чистого металу, сплави тверднуть не миттєво, а в температурному інтервалі, який зазвичай становить 30...50 °С. У цей момент утворюється суміш рідкої та твердої фаз. Властивості майбутнього виробу визначаються тим, як саме кристалізуються метали всередині сплаву. У ювелірній справі кристалізація є ключовим етапом для лиття виробів, оскільки правильне керування охолодженням запобігає утворенню тріщин, раковин та крихкості металу.

При переохолодженні розплаву нижче температури початку кристалізації у рідкій фазі утворюються первинні зародки кристалів (центри

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

кристалізації). Зародки ростуть у вигляді деревоподібних структур – дендритів. Під час фазового переходу з рідини у твердий стан сплав зменшується в об'ємі. Для більшості зразків за умов макроаналізу спостерігали слабо виражену дендритну структуру (рисунок 3.1) після електрохімічного глибокого травлення.

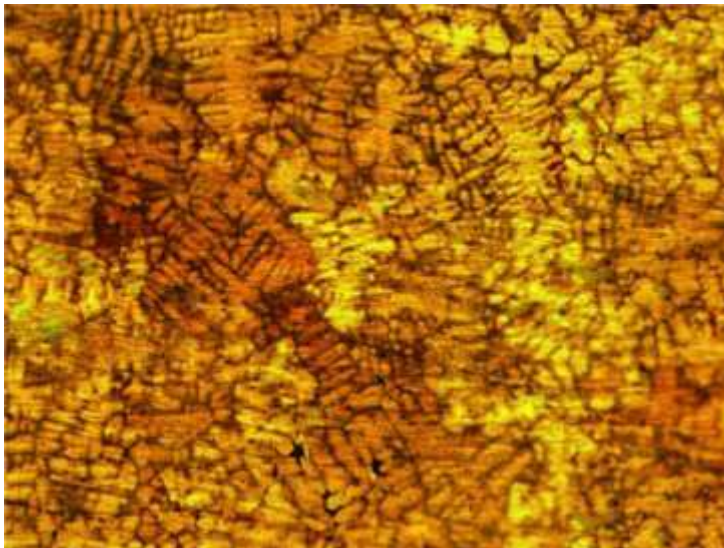


Рисунок 3.1 – Макроструктура литих зразків сплаву золота (x30)

Щоб отримати ідеальний виріб із золота, бажано дотримуватись певних правил. Слід мати на увазі, що швидке охолодження (загартування) у дрібних виливках створює дрібнозернисту структуру, яка є більш міцною та пластичною. Порушення режимів кристалізації може призвести до мікропористості, усадочних раковин або виникнення внутрішніх напруг.

Мікроструктуру литих зразків досліджували при великих збільшеннях мікроскопу у 100...200 разів. Для детального аналізу готувались мікрошліфи з поперечного та повздовжнього перерізу литих стрижнів. Під час вивчення структури литого червоного золота 585 проби спостерігали грубу полікристалічну будову (рисунок 3.2), що є типовою для більшості дорогоцінних немодифікованих сплавів золота. Зерна металу мали різноманітну форму від компактної малих розмірів, до великих розмірів з видовженням у напрямку кристалізації.

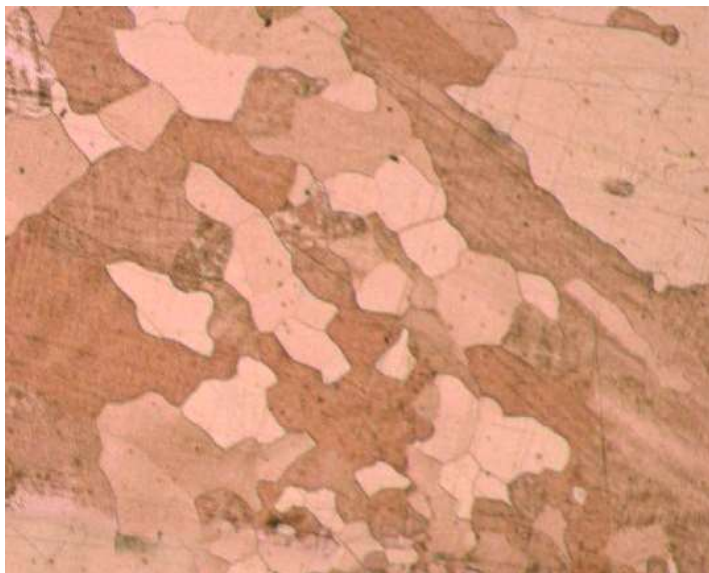


Рисунок 3.2 – Мікроструктура литих зразків сплаву золота (x200)

Подібні структурні особливості спостерігали у всій серії литих зразків, що отримували для наступного вальцювання та волочіння.

3.2. Структура зразків золота після багатократного вальцювання

Литі стрижневі зразки сплаву золота піддавали багатократному вальцюванню чи прокатуванню на ювелірних вальцях. Обробку проводили в холодному стані, без нагрівання зразків, що відповідає більшості технологічним умовам виробництва золотих ювелірних прикрас. Під час прокатування зменшувалась площа поперечного січення зразка, зі збільшенням довжини.

Вальцюванням отримували видовжені зразки квадратного та круглого січення. При цьому оцінювали загальний ступінь деформації сплаву золота, з метою оцінки його впливу на структуру та твердість металу, і відповідно, здатність до пластичного формування на наступних етапах виготовлення ювелірного виробу, наприклад, волочіння для отримання дроту з каліброваною поверхнею під філігрань, тощо. Оцінювання структурних змін виконували спочатку за макрошліфом (рисунок 3.3).

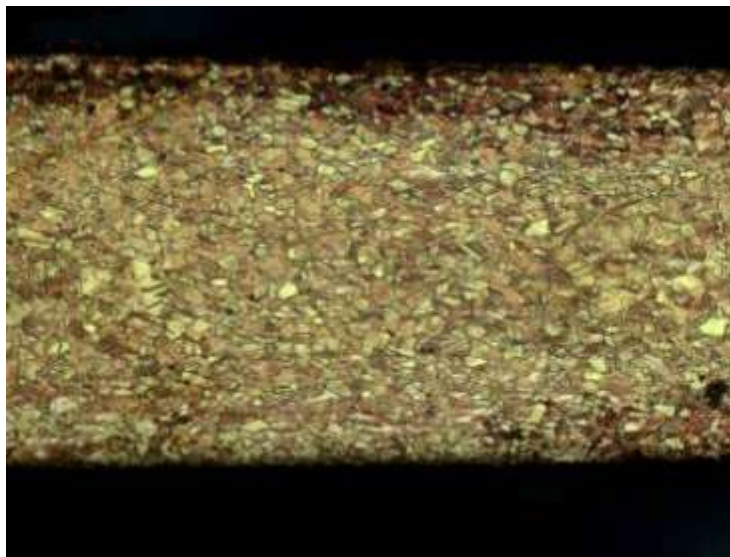


Рисунок 3.3 – Макроструктура зразка після багатократного вальцювання (x30)

За вивченням макроструктури вальцьованих зразків золота помітно деяку нерівномірність деформації на початкових етапах формування, при невеликих ступенях деформації (до 30 %). За структурою спостерігали більший ступінь спотворення зернистої структури металу у поверхневих шарах стрижнів, що піддавали вальцюванню. Ці об'єми металу безпосередньо контактують з деформуючими валками, тому відразу поглинають значну енергію деформації. При більших ступенях загальної деформації такий характер макроструктурної нерівномірності є менш виражений.

Мікроструктуру зразків золота вивчали при збільшенні оптичного мікроскопу у 200 разів.

Отримували результати дослідження мікроструктури, деформованих зразків за способом вальцювання за різного сумарного ступеня холодної пластичної деформації (рисунок 3.4). Зразки досліджували у світлому полі мікроскопу після електрохімічного травлення поверхні мікрошліфа, за описаною методикою. Для досліджень відбирались зразки, що мали сумарний ступінь деформації за схемою вальцювання 20, 40, 60, 80 %. На початковому етапі пластичного формування спостерігається подрібнення грубої полікристалічної структури литого сплаву золота, що формується у процесі кристалізації призматичних зразків.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

3.3. Вплив пластичної деформації на твердість зразків

Твердість використовується як показник деформаційного зміцнення, його тенденція демонструє відповідну поведінку для сплавів після кожної деформації відбувається достатнє накопичення напруження. За зміною значень твердості можна судити ступінь механічного наклепу та оцінювати можливості до подальшого деформування та пластичності зразків. Для порівняння на діаграмі перший стовпчик показує твердість литого сплаву золота без деформації ($\epsilon=0\%$).

Зміну твердості вивчали за діаграмою твердості (рисунок 3.5), що побудована в одиницях Роквела (HRB), в залежності від сумарного ступеня холодної пластичної деформації за способом вальцювання. Твердість зразків вимірювали на їх поверхні та в поперечному перерізі, з наступним усередненням значення для кожного ступеня деформації.

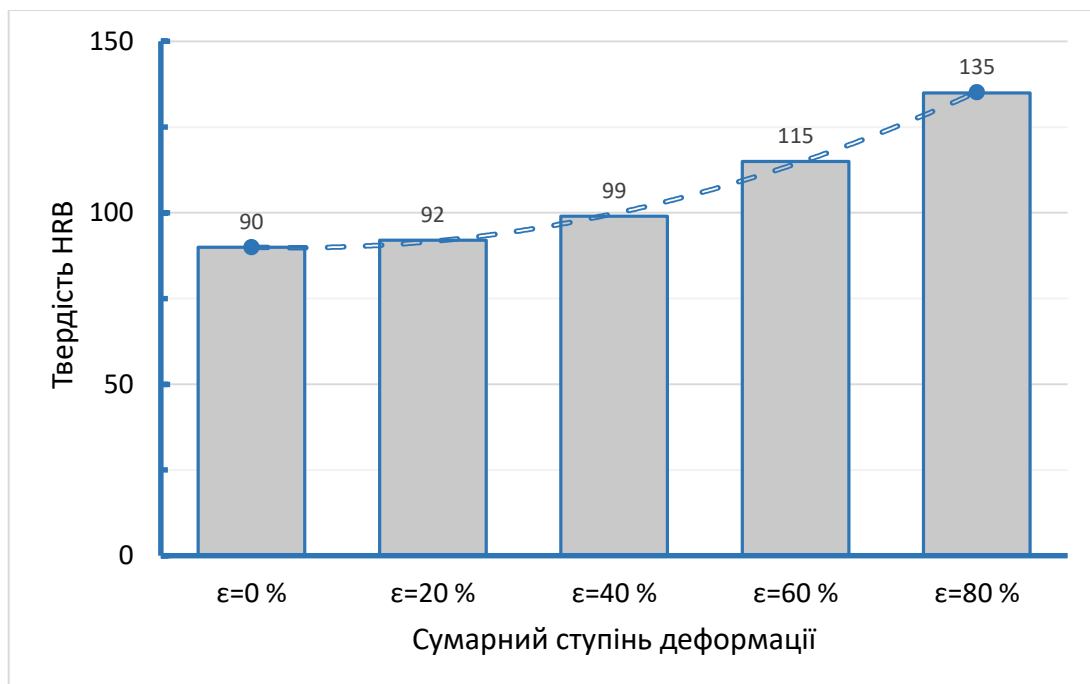


Рисунок 3.5 – Вплив пластичної деформації на твердість зразків золота 585 проби

З діаграми видно, що при великих ступенях деформації загальна твердість зразків золота зростає. Особливо це помітно для ступенів деформації більше 50 %, зокрема при 60 % твердість становить 115 одиниць за HRB, та

135 одиниць для ступеня деформації 80 %. Таке зміцнення та втрату пластичності золотого сплаву 585 проби можна усунути проведенням проміжної термічної обробки за режимом відпалу гартування.

На основі аналізу результатів досліджень встановлено, що багатократна холодна пластична деформація золотого сплаву викликає суттєві зміни структури металу, які супроводжуються підвищенням його твердості та збільшенням крихкості. За сумарного ступеня деформації 80 % твердість сплаву зростає до 135 HRB.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

РОЗДІЛ 4
ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА
ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ ЗОЛОТА 585 ПРОБИ

4.1. Структура зразків після гартування

Як відомо для поновлення пластичності багатократно деформованих заготовок сплавів золота проводять їх термічну обробку. Найчастіше застосовують нагрів до температур 700...800 °С полум'ям газового пальника. У роботі таку обробку проводили з короткочасним нагріванням зразків до температур відпалу полум'ям газового пальника, з наступним гартуванням їх у воді. Швидке охолодження дозволяє фіксувати однорідну монофазну структуру сплаву, яка має низьку твердість та високу пластичність.

В роботі виконували аналіз структури зразків, які були деформовані з максимальним ступенем деформації ($\epsilon=80\%$), та відпалювались за температур: 600; 700; 800; 900 °С (рисунок 4.1). Час відпалу перед загартуванням становив близько 10 хвилин. Як відомо такі коротки витримки для сплавів золота дозволяють досягнути фактичного переструктурування за високих температур, більше 600 °С, які здатні активувати інтенсивні дифузійні процеси. Тривалі витримки за менших температур відпалювання не мають цінності у практиці ювелірного виробництва, оскільки суттєво збільшують часові витрати та роблять технології неконкурентними.

З аналізу наведених структур видно, що невисокі температури нагрівання перед гартуванням не дозволяють повністю усунути характер волокнистої будови металу. Суттєві зміни спостерігали за температур вище 800 °С. Як видно такий нагрів забезпечує подрібнення структури сплаву та отримання полізернистої структури з рівноосними зернами металу. Це свідчить про проходження процесів рекристалізації деформованого золота. Підвищення температур до 900 °С викликає збільшення розміру зерна, що також зменшує твердість та сприяє відновленню рівня пластичності сплаву.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

проявляється у крупнозернистого матеріалу. Якщо крихкість викликана структурно-фазовими перетвореннями в сплаві, то вона може бути ліквідована короткочасним нагріванням до температури 700 °С з подальшим загартуванням.

4.2. Вплив температури гартування на твердість сплаву золота

Твердість використовується як показник деформаційного зміцнення, тенденція її зміни демонструє однакову поведінку для потрійних сплавів золота. Після кожної деформації та відпалу гартування відбувається достатнє зняття напруження (рисунок 4.2). Під час відпалу відновлюється пластичність, необхідна для наступних етапів прокатки, вальцювання чи інших видів пластичного формування, що мають місце у ювелірному виробництві. Це видно за даними діаграми, що показує зміни твердості зразків золота після деформації ($\epsilon=80\%$) та наступного гартування від різних температур.

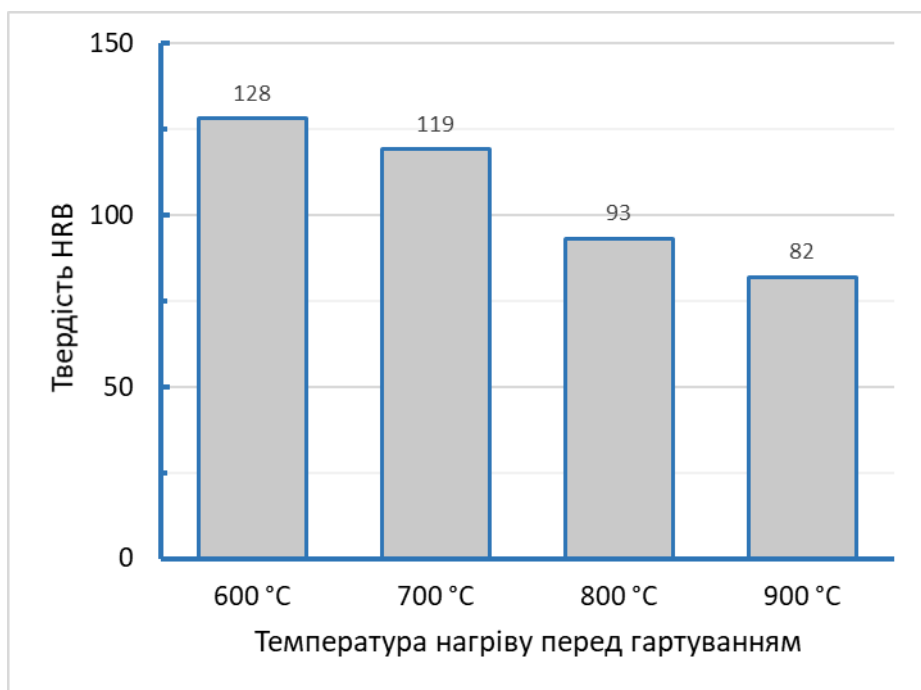


Рисунок 4.2 – Твердість зразків золота після деформації ($\epsilon=80\%$) та наступного гартування від різних температур.

Як видно значення твердості деформованих зразків зменшуються до значень менше 90 одиниць HRB, характерних для литого металу. Найменші значення твердості властиві загартованим зразкам від температур 800...900°C.

При термічній обробці сплавів золота 585 проби після будь-якого процесу, де матеріал охолоджується від температури, за якої повністю неупорядкована фаза є стабільною, необхідне швидке охолодження, щоб мінімально зменшити випадіння фаз зміцнення.

Під час відпалу відновлюється пластичність, необхідна для наступних етапів деформаційного оброблення ювелірного виробу. Мінімальна твердість досягається після гартування сплаву золота у воді від температур не нижче 850 °C, що забезпечує добру оброблюваність під час подальшої обробки.

4.3. Вплив температури відпалу на твердість загартованих зразків

Крім відпалу гартування для зразків сплаву червоного золота досліджували вплив звичайного відпалу, який часто застосовують ювеліри як один з кінцевих етапів виготовлення коштовних виробів. Метою такого відпалу є отримання ефекту дифузійного зміцнення, за рахунок виділення дрібнодисперсних фаз у полікристалічній структурі металу (рисунок 4.3).

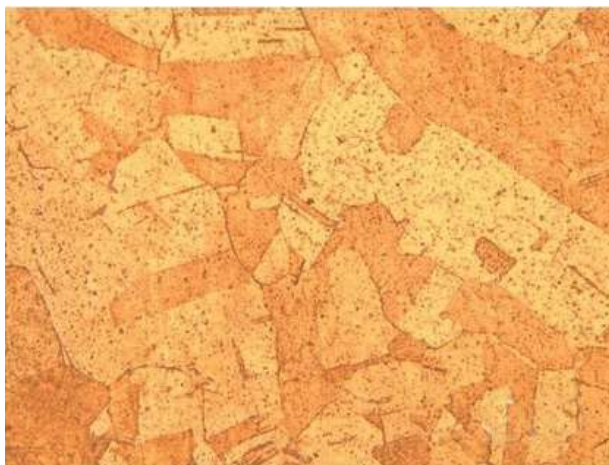


Рисунок 4.3 – Структура зразка після відпалу при 550 °C. $\times 500$

У структурі зразків при великій збільшеннях ($\times 500$) після відпалу при 500...600 °C спостерігали дрібнодисперсні точкові виділення. Отже,

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі на основі досліджень пластичної деформації та термічної обробки експериментальних зразків встановлено вплив ступеня деформації та параметрів відпалу на структуру та властивості червоного золота 585 проби, складу: Au – 58,5 %; Ag – 8,2 %; Cu – 33,3 %.

На основі аналізу результатів досліджень встановлено, що багатократна холодна пластична деформація золотого сплаву викликає суттєві зміни структури металу, які супроводжуються підвищенням його твердості та збільшенням крихкості. За сумарного ступеня деформації 80 % твердість сплаву зростає до 135 HRB.

Встановлено, що для поновлення пластичності та зменшення твердості, з метою виконання всіх необхідних прийомів формування ювелірного виробу, доцільно проводити поміжну термічну обробку, за режимом відпалу гартування, від температур 800...900 °С. Середовищем гартування може слугувати звичайна вода.

На основі аналізу результатів досліджень термічної обробки зразків золота встановлено, що ефективним способом гомогенного зміцнення сплаву червоного золота 585 проби може бути відпалювання. Температуру відпалу слід приймати в межах 550...580 °С, час обробки має становити близько 30 хвилин. За таких умов можна підвищити твердість загартованих зразків з 80 до 120 HRB. Ефект зміцнення пояснюється виділенням вторинних зміцнюючих фаз, що підтверджено структурними дослідженнями.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

9. Cason, C., Pezzato, L., Breda, M. et al. Effect of microstructure and residual stresses, generated from different annealing and deformation processes, on the corrosion and mechanical properties of gold welding alloy wires. Gold Bull 48, 135–145 (2015). <https://doi.org/10.1007/s13404-015-0170-4>.

10. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин: навчальний посібник / В. О. Іванов, Б. А. Ступін, Х. В. Берладір. – Суми : Сумський державний університет, 2023. – 189 с.

11. Металознавство: навчальний посібник / І. В. Прокопович. – Одеса: Екологія, 2020. – 308 с.

12. Технології та устаткування машинобудівних виробництв. Виробництво заготовок: навч. посібник для здобувачів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» / Укладачі: Комар Р.В., Паньків М.Р., Сенчишин В.С. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. – 152 с.

13. Методи структурного аналізу матеріалів: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавр спеціальності 132 Металознавство / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Г. Г. Лобачова, Є. В. Іващенко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 180 с.

14. Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальностей 132 "Металознавство" всіх форм навчання / уклад.: Імбирович Н.Ю. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. – 36 с.

15. Пожарова О. В. Охорона праці: навчальний посібник / О. В. Пожарова. – Одеса, 2022. – 86 с.

					БР 5126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49