

УДК 671.12:614.8.86

АРТЮХ Т.М., ГРИГОРЕНКО І.В.

Національний університет харчових технологій

## ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ЮВЕЛІРНОГО СПЛАВУ НА ОСНОВІ ЗОЛОТА ЗА ПОКАЗНИКАМИ МІЦНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ

*Методом симплекс-граткового математичного моделювання показана можливість оптимізації ювелірних сплавів потрійних систем Au-Ag-Cu за показниками міцності на розрив, на розтяг, відносного подовження, зернистості, формозаповнюваності, які забезпечують високі показники зносостійкості під час експлуатації.*

**Ключові слова:** золото, ювелірні сплави, механічні властивості, зернистість, формозаповнюваність.

*Артюх Т.Н., Григоренко И. В. Оптимизация состава ювелирного сплава на основе золота по показателям прочности и износостойкости. Методом симплекс-решеточного математического моделирования показана возможность оптимизации ювелирных сплавов тройных систем Au-Ag-Cu по показателям прочности на разрыв, на растяжение, относительного удлинения, зернистости, формозаповнюваності, обеспечивающих высокие показатели износостойкости при эксплуатации.*

**Ключевые слова:** золото, ювелирные сплавы, механические свойства, зернистость, формозаповнюваність.

*Artyukh T.M., Grygorenko I.V. Optimization of jewellery cold alloy composition based on strength and wear resistance indicators. Using the simplex-grid mathematical modeling method, possibility was shown for optimizing triple system (Au-Ag-Cu) jewellery gold alloys based on their tensile and breaking strengths, specific elongation, graininess, ability to fill forms – all those ensuring high wear resistance while being used.*

**Keywords:** gold, jewellery alloys, mechanical properties, graininess, form filling.

**Постановка проблеми у загальному вигляді і її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями.** У ювелірному металознавстві

актуальними є завдання, пов'язані з вибором співвідношення основних та легуючих компонентів, які забезпечують регламентовані значення суттєвих характеристик ювелірних сплавів відповідно до вимог нормативної документації. У випадку коли ювелірний сплав складається з трьох та більше компонентів перелік різноманітних варіантів є настільки багаточисельним, що фізично та економічно перевірити всі варіанти не можливо. Застосування математичного методу планування експерименту – методу симплексних решіток, дозволяє значно скоротити число дослідів, описати вплив компонентів математичними рівняннями (моделями) та прогнозувати зміни механічних характеристик ювелірного сплаву на основі золота для різних його структур як під час виготовлення, так і в процесі експлуатації. Цей метод дає можливість оптимізувати вміст складів ювелірних сплавів, що дозволяє поліпшити довговічність ювелірних виробів відповідно до вимог світових та вітчизняних стандартів.

**Аналіз останніх досліджень, у яких започатковано вирішення проблеми.** Питання сутності методу симплексних решіток досліджено в роботах С.Л.Ахназарової та В.В.Кафарова. Застосування методу щодо регулювання окремих натуральних властивостей золотого сплаву на основі оптимізації хімічного складу було реалізовано в роботах Е. Бреполя, Старченко І.П., Лівшица В.А. [1-5].

**Ціль статті.** Полягає у дослідженні можливості додаткової оптимізації вмісту ювелірного сплаву для регулювання характеристик надійності в процесі експлуатації, що обумовлено значними змінами технології ювелірних виробів та вимог до якості ювелірних сплавів на основі золота.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Для оптимізації хімічного складу ювелірних сплавів на основі золота жовтого та червоного кольору з метою регулювання кількісних характеристик показника надійності ювелірних сплавів було використано метод симплекс-ґраткового планування. Регулювання властивостей ювелірного сплаву, зокрема твердості при різних технологічних процесах було досягнуто варіюванням співвідношення компонентів, що входять до композиції сплаву. За основні фактори, що впливають на властивості золотого сплаву були прийняті відповідні основні компоненти: золото ( $X_1$ ), срібло ( $X_2$ ), мідь ( $X_3$ ).

Зважаючи на те, що основна мета – отримання ювелірних виробів із жовтих та червоних золотих сплавів - має декілька вихідних параметрів, математичні моделі були розраховані для важливіших з них, зокрема:  $Y_4$  – міцність на розтяг, (1) МПа;  $Y_5$  – міцність на розрив, кг (2);  $Y_6$  – відносне

подовження, % (3);  $Y_7$  – зернистість, кількість на 1 мм<sup>2</sup> (4);  $Y_8$  – формозаповнюваність, % (5). Табличне значення  $t$  – критерію при  $f = 7$ ,  $g = 0,05$ , дорівнює 2,31. Адекватність отриманих моделей дорівнює 0,95.

$$Y_4 = 150 \cdot X_1 + 150 \cdot X_2 + 300 \cdot X_3 + 200 \cdot X_1 X_2 + 900 \cdot X_1 X_3 + 300 \cdot X_2 X_3 + 750 \cdot X_1 X_2 (X_1 - X_2) + 1350 \cdot X_1 X_3 (X_1 - X_3) + 1125 \cdot X_2 X_3 (X_2 - X_3) + 3900 \cdot X_1 X_2 X_3 \quad (1)$$

$$Y_5 = 27 \cdot X_1 + 27 \cdot X_2 + 22 \cdot X_3 + 12 \cdot X_1 X_2 + 14 \cdot X_1 X_3 - 2 \cdot X_2 X_3 - 22,5 \cdot X_1 X_2 (X_1 - X_2) - 19,5 \cdot X_1 X_3 (X_1 - X_3) + 15 \cdot X_2 X_3 (X_2 - X_3) + 108 \cdot X_1 X_2 X_3 \quad (2)$$

$$Y_6 = 40 \cdot X_1 + 55 \cdot X_2 + 40 \cdot X_3 - 30 \cdot X_1 X_2 + 16 \cdot X_1 X_3 - 50 \cdot X_2 X_3 - 4,5 \cdot X_1 X_2 (X_1 - X_2) + 87 \cdot X_1 X_3 (X_1 - X_3) - 120 \cdot X_2 X_3 (X_2 - X_3) - 348 \cdot X_1 X_2 X_3 \quad (3)$$

$$Y_7 = 79 \cdot X_1 + 80 \cdot X_2 + 81 \cdot X_3 - 2 \cdot X_1 X_2 - 8 \cdot X_1 X_3 - 2 \cdot X_2 X_3 - 12 \cdot X_1 X_2 (X_1 - X_2) + 42 \cdot X_1 X_3 (X_1 - X_3) + 1,5 \cdot X_2 X_3 (X_2 - X_3) + 90 \cdot X_1 X_2 X_3 \quad (4)$$

$$Y_8 = 50 \cdot X_1 + 51 \cdot X_2 + 52 \cdot X_3 - 2 \cdot X_1 X_2 - 4 \cdot X_1 X_3 + 2 \cdot X_2 X_3 + 1,5 \cdot X_1 X_2 (X_1 - X_2) - 10,5 \cdot X_1 X_3 (X_1 - X_3) - 10,5 \cdot X_2 X_3 (X_2 - X_3) + 12 \cdot X_1 X_2 X_3 \quad (5)$$

Як свідчить описане рівняння (1) та наведена їх геометрична інтерпретація (рис. 1) золото ( $150X_1$ ) та срібло ( $150X_2$ ) чинять однаковий вплив на рівень міцності на розтяг у золотовмісних сплавах. Коефіцієнт  $300X_3$  вказує на максимальний вплив міді на підвищення міцності в системі золото-срібло-мідь.

Значний вплив на підвищення міцності чинить сумісне додавання до складу сплаву золото та мідь ( $900X_1X_3$ ), а також взаємне поєднання всіх трьох компонентів ( $3900X_1X_2X_3$ ). Високі показники міцності на розтяг: 500-410 МПа знаходяться в межах вмісту золота 25-80 %, срібла – до 50 % та міді 11-55 %.

Максимальне значення міцності на розтяг (більше 500 МПа) спостерігається в сплавах з вмістом золота 45-62% в присутності срібла (8-28%) та міді (25-35%), що відповідає 585 пробі. Для 375 проби золотого сплаву спостерігається зміна межі міцності на розтяг від 500 до 160 МПа.

Найвищі показники міцності знаходяться в межах вмісту срібла – 20 – 35%, міді – 25-45%. Для 585 проби золотого сплаву характерні найвищі показники межі міцності на розтяг (від 360 до вище 500 МПа). Найнижчі значення міцності спостерігаються при значеннях срібла до 40% та міді до 8%. Для 750 проби золота найнижче значення межі міцності на розтяг зафіксовано на рівні 260-310 МПа в присутності срібла до 30% та міді – до 6%.

Максимальне значення 460- 50 МПа спостерігається при вмісті срібла – до 5%, міді – до 20-25%.

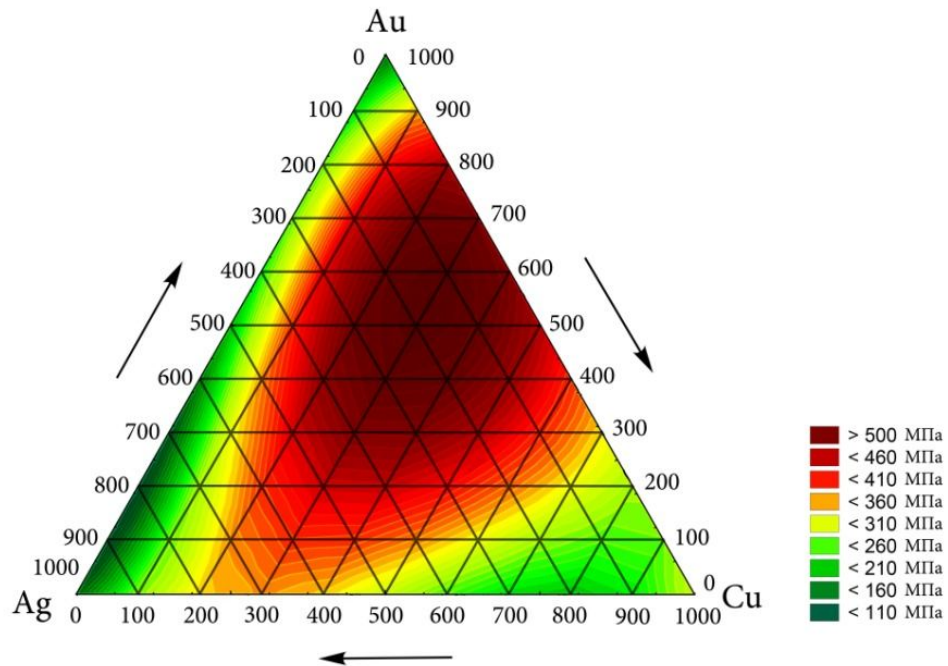


Рис. 1. Зміна міцності на розтяг в системі золото-срібло-мідь, МПа,  $U_4$

Описана математична залежність зміни міцності на розрив в системі золото-срібло-мідь (2) та її геометрична інтерпретація (рис. 2), вказує на однаковий рівень впливу золота ( $27X_1$ ) та срібла ( $27X_2$ ) та дещо менший вплив міді ( $22X_3$ ). Однак, має місце суттєвий ефект потрійної взаємодії всіх вказаних компонентів ( $108X_1X_2X_3$ ).

Найвищі показники міцності на розрив (від 30 до 32 кг) знаходяться в межах: золота 9 – 58%, срібла - 15 – 88%, міді - до 52%. Максимальне значення міцності на розрив (понад 32 кг) відповідає вмісту золота в межах 19 – 43 %, срібла – 33 – 70%, міді – 6 – 33%.

Проба 375 золота потрапляє в зону найвищих показників міцності на розрив (понад 32 кг) при вмісті срібла – 35-55%, міді – 7 – 30%. Найвищі показники міцності на розрив для вказаної проби – 28-30 кг (срібла – до 7%, міді до 60%). Для проби 585 золота найвищий показник міцності на розрив становить 30 кг в присутності срібла в межах 20 – 30%, міді – 10 – 20%, найнижчий показник – 26-28 кг, в присутності срібла до 5% та міді – 40%. Для 750 проби золота характерні середні показники міцності на розрив – 26-28 кг в присутності срібла від 5 до 25% та міді до 25%. При збільшенні вмісту міді до 30% межа міцності на розрив знижується до рівня 24-26 кг.

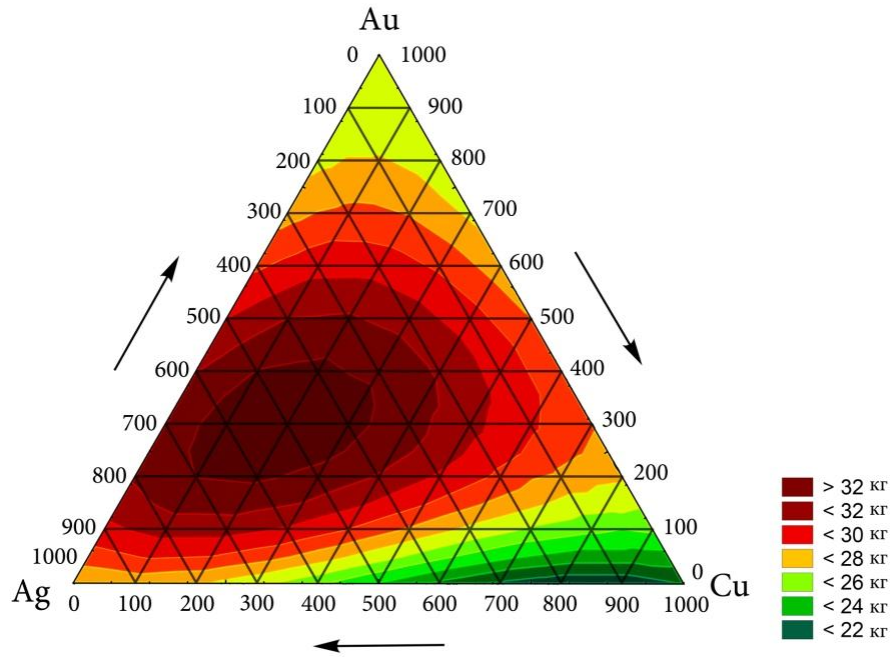


Рис. 2. Зміна міцності на розрив в системі золото-срібло-мідь, кг, ( $Y_5$ )

Описана математична модель (3) та її геометрична інтерпретація (рис.3) вказує на значний вплив срібла на збільшення показника відносного подовження ( $55X_2$ ). Золото ( $40X_1$ ) та мідь ( $40X_3$ ) чинять майже рівнозначну дію на збільшення показника відносного подовження в системі золото-срібло-мідь. Позитивне значення коефіцієнта подвійної дії ( $16X_1X_3$ ) впливає на підвищення цього показника в напрямі 750 проби золота при вмісті міді 30%.

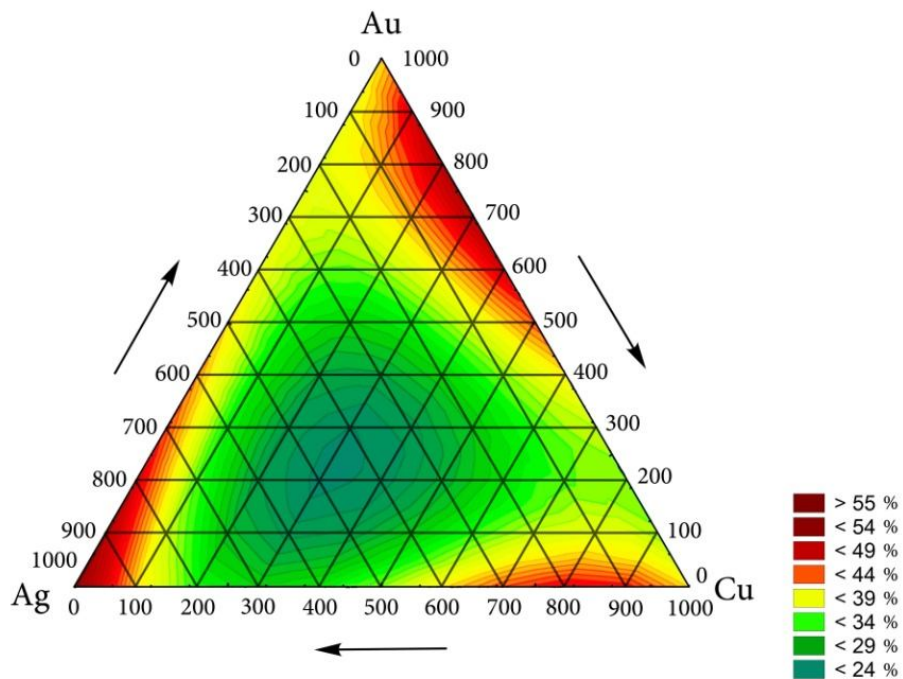


Рис. 3. Зміна відносного подовження в системі золото-срібло-мідь, %, ( $Y_6$ )

Від’ємними значеннями коефіцієнтів, характеризується вплив сумісної дії золото-срібло ( $-30X_1X_2$ ) та срібло-мідь ( $-50X_2X_3$ ), що вказує на зменшення відносного подовження. Крім того потрійна дія елементів в системі золото-срібло-мідь ( $-348X_1X_2X_3$ ) суттєво знижує значення відносного подовження. Проба 375 золота потрапляє в зону найнижчих показників відносного подовження: 24-29% при вмісті срібла – 25-45% та міді – 20-40%. При вмісті міді до 7%, срібла – 60% та міді – 53-63%, срібла – до 10% відносне подовження складатиме – 34 – 39 %.

В межах 585 проби золота зафіксовано вищі показники відносного подовження від 34 до 49%. Вміст міді в межах 5-25 та срібла 20-35 % знижують відносне подовження до 34%. Збільшення вмісту міді до 40-45 % та срібла до 5% впливає на збільшення досліджуваного показника до 49%. Взаємний вплив міді та срібла сприяють формуванню в межах 750 проби золота високих показників відносного подовження від 34 до 54 %. Так, в присутності срібла в межах 10-30% та міді до 15% відносне подовження складатиме 34-39%. Зниження вмісту срібла до 10% і нижче з одночасним збільшенням рівня міді до 15-25% сприяє різкому підвищенню рівня відносного подовження з 44 до 54%.

При аналізі математичної моделі (4) зміни зернистості золотих виливків в потрійній системі золото-срібло-мідь та її геометричної інтерпретації (рис. 3.9) варто відзначити, що всі елементи чинять майже однаковий вплив на її збільшення ( $X_1 = 79$   $X_2 = 80$   $X_3 = 81$ )

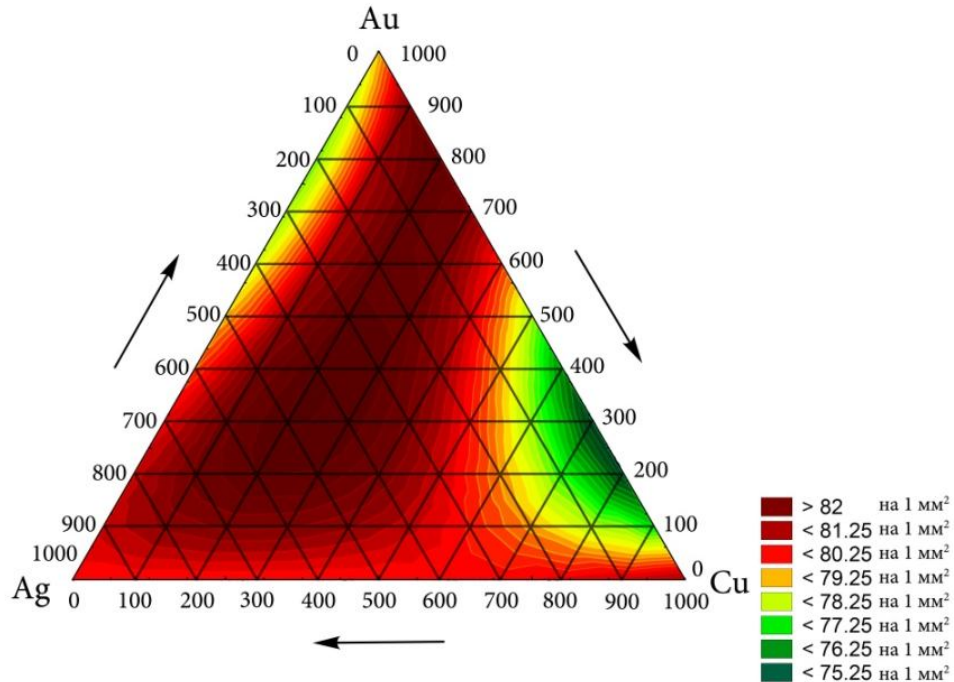


Рис. 4. Зміна зернистості в системі золото-срібло-мідь, кількість на 1 мм<sup>2</sup>, (Y<sub>7</sub>)

Ефект потрійної взаємодії з позитивним коефіцієнтом вказує на значний сумісний вплив всіх трьох компонентів ( $90X_1X_2X_3$ ) на збільшення зернистості золотих виливків. Від'ємні значення коефіцієнтів вказують на зниження зернистості в подвійних композиціях золото-срібло ( $-2X_1X_2$ ), золото-мідь ( $-8X_1X_3$ ) та срібло-мідь ( $-2X_2X_3$ ). Зона максимальної зернистості (понад 82 на  $1 \text{ мм}^2$ ) знаходиться в межах 20 – 55% золота, 25 – 60% срібла та 15 – 33% міді. В діапазоні 375 проби золота знаходяться як максимальні значення зернистості так і мінімальні за умови підвищення кількості міді до 60% (76 - 77  $\text{мм}^2$ ).

Для 585 проби характерні достатньо високі показники зернистості (81-82 на  $1 \text{ мм}^2$ ) в межах 10 – 25 % срібла, 10-35% міді. Збільшення або зменшення вмісту міді та срібла відповідно призводить до зниження зернистості до рівня 79 на  $1 \text{ мм}^2$ . В діапазоні 750 проби рівномірне збільшення рівня міді до 25 % з одночасним зниженням рівня срібла призводить до зростання зернистості з 77 до 81 на  $1 \text{ мм}^2$ .

Описана математична модель формозаповнюваності в системі золото-срібло-мідь (5) та її геометрична інтерпретація (рис. 5) вказує на найбільший вплив кожного з елементів окремо ( $X_1=50$ ,  $X_2=51$ ,  $X_3 = 52$ ).

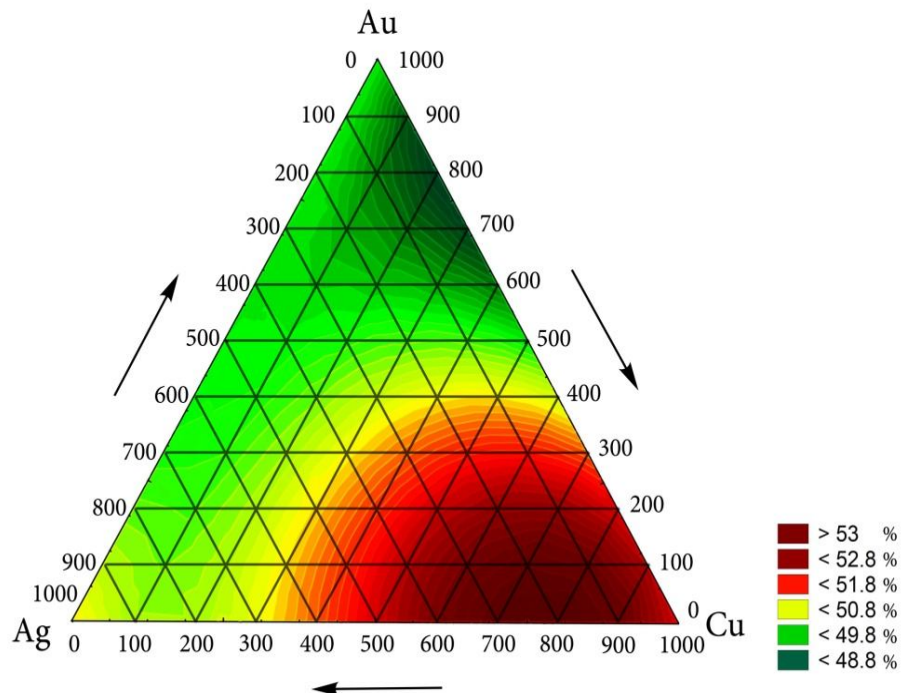


Рис. 5. Зміна формозаповнюваності в системі золото-срібло-мідь, %, ( $Y_8$ )

Ефект потрійної взаємодії зовсім незначний  $X_1X_2X_3 = 12$ . З подвійних композицій лише система срібло-мідь мають невеликий позитивний коефіцієнт ( $X_2X_3 = 2$ ). Зона максимальних показників формозаповнюваності (понад 53%)

пролягає в межах: золото - до 15%, срібло – 10 – 30%, міді 60 – 90%. Мінімальні значення формозаповнюваності (нижче 48%) сконцентровано в межах 60-90% золота, до 10% срібла та 10 – 40 % міді.

В діапазоні 375 проби золота найвищі показники формозаповнюваності знаходься на рівні 50-51% за присутності міді в межах 40-60 % та срібла -10-25% і відповідно найнижчі показники за 50 - 60% срібла, міді до 15%.

Золотовмісні сплави 585 проби мають формозаповнюваність на рівні близько 49 %. На відміну від попередньоописаних сплавів для 750 проби золота в більшій мірі характерні найнижчі показники формозаповнюваності (нижче 48%), за присутності міді 10 – 25% та срібла до 10%.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проведені дослідження вказують на можливість розробки оптимізованих золотих ювелірних сплавів в системі золото-срібло-мідь із заданими показниками міцності, зернистості та формозповнюваності, що забезпечать високі характеристики зносостійкості ювелірних виробів під час експлуатації.

#### Література

1. Артюх Т.М. Оптимізація складу ювелірного сплаву на основі золота за основними показниками твердості / Т.М. Артюх, І.В. Григоренко // В кн.. Формування і оцінювання асортименту, властивостей та якості непродовольчих товарів : в III част. матеріали 1-ої міжнародної наук.-практ. конф. (Львів, 22 листопада 2013 року): тези доповідей : у 3 ч. Ч.III. -Львів : Львів. комерц. академ., 2013. – С. 98-101.
2. Бреполь Э. Теория и практика ювелирного дела / Э. Бреполь. – Санкт-Петербург : «Соло», 2000. – 528 с.
3. Ахназарова, С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учебное пособие / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 1985. – 327 с.
4. Майоренко В.М. Математическое планирование эксперимент при оптимизации состава четырехкомпонентного сплава по цветовым свойствам / В.М. Майоренко, В.Н. Федоров, В.М. Можаяев, Е.М. Мейнарович // В кн. Сборник трудов: Методы исследования ювелирных сплавов и вопросы нормирования драгоценных металлов. – Ленинград, 1982. – С. 15-20.
5. Малышев В.М. Золото / В.М. Малышев, Д.В. Румянцев. – М. : Металлургия, 1979. – 288 с.

*Стаття поступила в редакцію 22.01.2014 року*