

УДК 621.74.075.8

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-22>

ОТРИМАННЯ МІДНОЇ ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ НА УСТАНОВЦІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЛИТТЯ, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ ПОДАЛЬШОЇ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ

Смирнов Олексій Миколайович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач відділу
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0001-5247-3908

Єфімова Вероніка Гаріївна,

кандидат технічних наук, доцент
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-2372-8398

Нарівський Анатолій Васильович,

член-кореспондент, доктор технічних наук,
професор, директор
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-1569-6401

Тунік Володимир Олександрович,

аспірант
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів
Національної академії наук України
ORCID ID: 0009-0004-3777-5202

Ухін Володимир Євгенійович,

докторант
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0003-3560-4130

У статті висвітлено, що в умовах постійної зміни ситуації на світових ринках металургійної продукції та дедалі вищого рівня конкуренції перед виробниками продукції з міді та її сплавів гостро постає завдання підвищення ефективності виробництва та забезпечення випуску конкурентоспроможної продукції заданої якості.

Показано, що подальше підвищення конкурентоспроможності української мідної продукції завдяки мінімізації матеріальних та енергетичних витрат на її виробництво є комплексним завданням, актуальність вирішення якого для України визначається як необхідністю утилізації низькосортного вітчизняного брухту, так і прагненням виробляти кінцеву продукцію, що відповідає світовим вимогам.

Висвітлено, що українська мідна промисловість не має значних запасів рудної сировини й значно залежить від кон'юнктури цін на світовому ринку. Стійкість підприємствам-виробникам мідної продукції може забезпечити переорієнтування на внутрішні джерела мідної сировини (металобрухту) та розширення споживання в Україні завдяки опануванню нових видів продукції.

Установлено, що одним із перспективних напрямів розвитку підприємств, які виробляють мідь, є створення високоефективних модулів для рафінованої міді на базі вітчизняного брухту. Ключовою ланкою таких модулів, що багато в чому визначає якість мідної продукції, є розливання рідкого розплаву на горизонтальних машинах безперервного лиття заготовок.

У статті обґрунтовано та вдосконалено технологію і параметри процесу напівбезперервного розливання міді вогневого рафінування.

Показано, що робота є актуальною та пов'язаною з основними державними програмами розвитку гірничо-металургійного комплексу.

Визначено, що виконання науково-технічних завдань цього напрямку дасть змогу підвищити якість мідних заготовок та умови їх формування. Експериментальну роботу з виливання мідної трубної заготовки розміром 76 × 56 мм здійснено в промислових умовах.

Показано, що вибрані в роботі оптимальні технологічні параметри забезпечують отримання якісної заготовки з дрібнозернистою однорідною структурою, придатної для подальшої прокатки.

Установлено умови, що формують неоднорідність макроструктури в поперечному перерізі литої заготовки.

Показано умови та причини, що сприяють утворенню тріщин на зовнішній поверхні заготовки.

З'ясовано, що технічний стан машини, що витягує, не дає змоги витримувати постійним такий технологічний параметр, як величина кроку витягування.

Ключові слова: трубна заготовка з міді, установка безперервного горизонтального лиття, кристалізатор, температура розплаву, витягування.

Smirnov Oleksii, Yefimova Veronika, Narivsky Anatoly, Tunyk Volodimir, Ukhin Volodymyr. Receiving copper pipe blanket on a continuous horizontal casting plant intended for further cold rolling

The paper highlights that in the conditions of constant changes in the situation on the world markets of metallurgical products and the growing level of competition, manufacturers of copper and its alloys face an urgent task of increasing production efficiency and ensuring the production of competitive products of the required quality.

It is shown that further increasing the competitiveness of Ukrainian copper products by minimizing material and energy costs for its production is a complex task, the relevance of the solution of which for Ukraine is determined both by the need to utilize low-grade domestic scrap metal and the desire to produce final products that meet global requirements.

It is highlighted that the Ukrainian copper industry does not have significant reserves of ore raw materials and largely depends on the price situation on the world market. The stability of enterprises producing copper products can ensure a reorientation to internal sources of copper raw materials (scrap metal) and the expansion of consumption in Ukraine by developing new types of products.

It has been established that one of the promising areas of development of enterprises producing copper is the creation of highly efficient modules for refined copper based on domestic scrap metal. The key link of such modules, which largely determines the quality of copper products, is the pouring of liquid melt on horizontal continuous casting machines (HCM).

The work substantiates and improves the technology and parameters of the process of semi-continuous pouring of fire-refined copper.

It is shown that the work is relevant and related to the main state programs for the development of the mining and metallurgical complex.

It is determined that the solution of scientific and technical tasks in this area will allow to improve the quality of copper billets and the conditions for their formation. Experimental work on the casting of a copper pipe billet measuring 76×56 mm was carried out in industrial conditions.

It is shown that the optimal technological parameters selected in the work ensure the production of a high-quality billet with a fine-grained homogeneous structure, suitable for further rolling.

The conditions that form the inhomogeneity of the macrostructure in the cross-section of the cast billet are established.

The conditions and reasons that contribute to the formation of cracks on the outer surface of the billet are shown.

It is found that the technical condition of the drawing machine does not allow maintaining a constant technological parameter such as the value of the drawing step.

Key words: copper pipe billet, continuous horizontal casting installation, mold, melt temperature, drawing.

Вступ. Із часів промислової революції завдяки розширенню таких секторів, як електричне та електронне обладнання, інфраструктура, промислові машини та обладнання, транспорт тощо, мідь і сплави на основі міді використовують у різноманітних сферах застосування, необхідних для розумного рівня життя [1–3].

Метод лиття й прокатки відіграє ключову роль у виробництві точності мідних трубних заготовок на теперішній [4–6].

У роботах [7–8] наведено горизонтальне обладнання для безперервного лиття заготовок, що становить машину для розливу з найменшою висотою, її технологічна лінія

повністю горизонтальна. Пристрій горизонтального безперервного лиття заготовок переважно складається з проміжного пакета, кристалізатора, машини для заготовки, відрізної машини, холодного столу, тягової системи та мікрокомп'ютерної системи управління. Крім того, допоміжне обладнання також містить плавильну піч, обладнання для контролю температури тощо.

За даними робіт [8–10], кристалізатор є ключовими елементом горизонтальної машини безперервного лиття заготовок.

У процесі лиття електролітична мідь плавиться в плавильній печі проміжної частоти,

потім її витримують у роздавальній печі, і коли температура мідної рідини досягає 1250 градусів, починають витягувати заготовку. Процес затвердіння мідної води при горизонтальному безперервному розливанні полягає в тому, що мідна вода потрапляє в порожнину через вхід кристалізатора, опиняється в кристалізаторі, утворюючи циліндричну конденсаційну оболонку під дією охолоджувальної води, а потім витягується й викидається з кристалізатора на певній швидкості в режимі витягування ливарної заготовки [2–4; 5–7].

Отже, уточнення технологічних параметрів виробництва на встановленні безперервного горизонтального лиття трубної заготовки з міді під подальшу прокатку на стані холодної прокатки є актуальним завданням.

Методи та методики дослідження. Експерименти виконували при горизонтальному виливці трубної заготовки з міді (рис. 1).

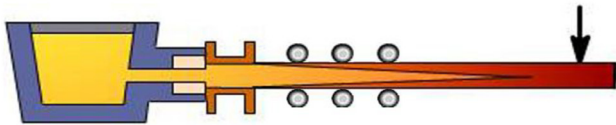


Рис. 1. Загальна схема горизонтальної безперервної машини для отримання круглої заготовки

При цьому дотримувалися таких основних технологічних параметрів:

- температура розплаву перед затягуванням, °С – 1240;
- температура води на вході в кристалізатор, °С – 17,9;
- температура води на виході з кристалізатора, °С – 20,8;
- частота струму перетворювача, Гц – 3,92;
- крок витягування, мм – 10.

Після виходу заготовки з кристалізатора тиск води збільшено до 1,9 атм, а частоту перетворювальника струму піднято до 5,83 Гц. Крім того, після здійснення вдалого початку витягування виливки вжито додаткових заходів щодо поступового зниження температури розплаву в печі.

У першу годину експерименту здійснювалися підготовчі заходи, під час яких простягалася через пристрій, що витягує, і видалялася затравка, відрізався викривлений кінець трубою заготовки, сама виливка центрувалася вздовж лінії витягування по вертикалі й горизонталі. Підготовчий етап лиття характеризувався нестабільністю процесу витягування, оскільки завжди мимоволі змінювався крок витягування через відсутність жорсткої зв'язки

між затравкою і виливкою. У результаті всялита заготовка, отримана в процесі реалізації підготовчих заходів, була переплавлена через наявність на її поверхні глибоких поперечних поверхневих тріщин.

Відповідно після отримання першої кондиційної заготовки труби технологію виливки було скориговано:

- температура розплаву, °С – 1160;
- температура води на вході в кристалізатор, °С – 17,5;
- температура води на виході з кристалізатора, °С – 21,2;
- частота струму перетворювача, Гц – 11,05;
- крок витягування, мм – 12,0.

Установлено, що зміна величини кроку витягування призводила до утворення поперечних тріщин на поверхні заготовки. Для усунення зазначених дефектів знижено швидкість витягування виливки через зменшення частоти струму перетворювача до 8,59 Гц. Однак цей захід не усунув усіх поверхневих дефектів, а призводив до того, що труба стала витягуватися насилу й ривками. Це свідчило про те, що ділянка кристалізації виливки змістилася ближче до литникових отворів графітової збірки, унаслідок чого міг статися обрив заготовки. Температура розплаву на цей момент становила 1140 °С.

Для усунення ймовірності обриву литої заготовки в кристалізаторі збільшено швидкість витягування завдяки збільшенню частоти струму перетворювача до 11,30 Гц. Ця зміна також не усунула поверхневих дефектів. Ба більше, у процесі витягування заготовки із зазначеною швидкістю виявлено мимовільне зменшення кроку витягування з 12 мм до 6 мм. Тому для стабілізації процесу витягування та усунення дефектів вирішено підігрівати розплав безпосередньо в печі, збільшивши тим самим температуру розливання. Нагрів металу до 1170 °С дав змогу суттєво зменшити кількості та розміри тріщин.

Надалі було змінено параметри витягування трубної заготовки. Параметри наведено нижче:

- температура розплаву, °С – 1170;
- температура води на вході в кристалізатор, °С – 17,7;
- температура води на виході з кристалізатора, °С – 21,6;
- частота струму перетворювача, Гц – 14,28;
- крок витягування, мм – 8,0.

Показано, що поверхня труби, відлитої відповідно до вищеперелічених параметрів, уражена невеликими поперечними поверхневими тріщинами. При збільшенні частоти струму перетворювача (швидкості лиття) до 15,50 Гц

тріщин побільшало, їх розміри збільшилися. При зниженні частоти струму перетворювача до 13,1 Гц (температура лиття – 1150–1160 °С) тріщини також повністю усунуті. Вимір кроку витягування показав, що цей параметр мимоволі збільшився з 8 мм до 10 мм.

Після цього було знижено частоту струму перетворювача (швидкість лиття) з 13,1 до 11,19 Гц, а тиск збільшено з 1,5 до 1,9 атм. Температура металу становила не більш ніж 1140–1150 °С. Поверхня заготовки, отримана за цим режимом витягування, уражена невеликими поперечними тріщинами.

Наступним кроком зміни технології лиття, спрямованим на придушення тріщиноутворення, стало застосування паузи після етапу витягування заготовки. Лиття з паузою в проміжках між витягуванням виливки величиною 0,8 секунд призвело до зупинки процесу витягування (призми ковзали по поверхні труби без її захоплення) через значне (або навіть повне) зміщення фронту кристалізації до литникових отворів графітової збірки.

Після відновлення процесу витягування встановлено такі технологічні параметри лиття:

- температура розплаву, °С – 1150–1160;
- температура води на вході в кристалізатор, °С – 17,5;
- температура води на виході з кристалізатора, °С – 20,8;
- частота струму перетворювача, Гц – 10,98;
- крок витягування, мм – 10.

Для усунення тріщин збільшили температуру розливу спочатку до 1170–1180 °С, а потім і до 1190–1200 °С. Після підвищення температури лиття тріщини (види неозброєним оком) зникли.

Після відливання кількох трубних заготовок з підвищеним вмістом фосфору відповідно до плану проведення експериментальної роботи в пічний агрегат був присаджований свинець у кількості 300 г. Після цього здійснено виливок трьох труб з підвищеним вмістом фосфору та свинцю. Технологічні параметри лиття у своїй не змінювалися.

На завершення цієї частини роботи з метою отримання дрібнішої структури в литих трубах зроблено спробу відливання заготовки з дрібнішим кроком витягування і вищою швидкістю лиття. Однак реалізація зазначених технологічних параметрів лиття призвела до утворення на зовнішній поверхні дефектів у вигляді раковин через кожні 27–30 кроків. З метою усунення даних дефектів збільшено частоту струму перетворювача до 13,29 Гц. Однак цей захід позитивного результату не приніс, оскільки дефекти

усунуті повністю не були.

У процесі реалізації експериментів з виливку мідної трубної заготовки під холодну прокатку відібрано зразки для дослідження структури металу у виливках та визначення механічних властивостей.

Дослідження підготовлених поперечних макрошліфів показало, що всі зразки, відібрані в процесі експерименту, незважаючи на те, що вони мають відмінності по хімічному складу, технологічним режимам виливки, характеризуються ідентичною структурою: сектор труби з кутом приблизно 60 градусів, що примикає до нижньої частини графітової втулки кристалізатора має дрібнозернисту структуру з розміром окремих зерен 0,5–1,5 мм, решта сектора литої труби вирізняється крупнозернистою структурою з розміром окремих зерен 1,5–5,0 мм. Характерний зразок макроструктури дослідної заготовки труби наведено малюнку 2.



Рис. 2. Макроструктура поперечного перерізу дослідної мідної заготовки, що відлита на установці безперервного горизонтального лиття

Недоліки досвідчених трубних заготовок у вигляді великокристалічної структури, чітко вираженої неоднорідності структури (наявність зон з великим і дрібним зерном) могли стати результатом дії таких факторів:

- утворенням повітряного зазору між верхньою частиною виливки й графітовою втулкою кристалізатора внаслідок усадки заготовки, що кристалізується, і впливу сили тяжіння, під дією якої виливок прагне зайняти крайнє нижнє положення в порожнині графітової втулки. Утворення повітряного зазору між виливкою і графітовою втулкою у верхній частині кристалізатора

призводить до того, що різко знижується величина теплового потоку від металу, що кристалізується, до води, що циркулює в системі охолодження. Це призводить до значного зниження швидкості кристалізації і, як наслідок, збільшення розмірів зерна, що формується у верхній частині виливка;

– нещільною посадкою графітової втулки в мідну сорочку, при цьому графітова втулка вставляється в мідну сорочку кристалізатора за допомогою ручного притирання. У такій операції неможливо забезпечити щільний контакт між втулкою графітової і мідної сорочки по всій поверхні зіткнення. У місцях наявності повітряних зазорів між втулкою та сорочкою різко знижується величина теплового потоку, порушується стабільність процесу кристалізації перерізу заготовки. Це призводить до формування локальної крупнокристалічної структури, підвищення ймовірності утворення поверхневих дефектів у вигляді тріщин через виникнення термічних напруг між різними зонами виливки.

Для компенсації усадки металу при кристалізації багатьма виробниками кольорового прокату на безперервних установках горизонтального лиття використовують конусні графітові втулки, що дають змогу зменшити величину повітряного зазору між виливкою і графітовою втулкою у верхній частині кристалізатора. Тим самим стабілізується процес кристалізації по всьому перерізу заготовки, що позитивно впливає як на структуру, так і на якісні показники виливки.

Для забезпечення максимально щільного контакту між графітовою втулкою та мідною сорочкою закордонні виробники здійснюють їх збирання з натягом. Для цього мідна сорочка нагрівається до 90–100 ° С, після чого в неї запресовується холодна графітова втулка. При цьому розміри внутрішньої поверхні мідної сорочки, як і зовнішньої поверхні графітової втулки, повинні бути виконані з дуже високою точністю із застосуванням токарних верстатів, що перебувають у відмінному технічному стані. Розмір натягу залежно від розміру кристалізатора коливається від 0,1 до 0,6 мм [4–6].

Унаслідок візуального огляду зразків на частини з них виявлено поздовжні поверхневі міжкристалічні тріщини (рис. 3).

Наявність дефектів на поверхні литої заготовки свідчить про те, що в процесі кристалізації та подальшого охолодження виливки в ній утворювалися значні термічні напруги, що перевищують міцність металу при високих температурах (близьких до початку кристалізації розплаву). Це свідчить про неправильний вибір технологічних



Рис. 3. Поздовжні міжкристалічні тріщини на поверхні експериментальної трубної заготовки

режимів виливки трубної заготовки. Крім того, утворення таких дефектів могло стати результатом наявності локальних зазорів між графітовою втулкою і мідною сорочкою кристалізатора, дестабілізували процес кристалізації виливки, що призвело до утворення граничних термічних напруг за її перерізом.

Для дослідження з кожного відібраного нами зразка труби вирізано по два плоскі фрагменти стандартних розмірів (дві смужки), призначені для проведення випробування на розрив. Один із цих зразків вирізався із зони, що характеризується крупнокристалічною структурою, другий – із зони з дрібнокристалічною структурою. Дані, отримані в процесі розриву зразків, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати визначення межі міцності в поздовжньому перерізі литої трубної заготовки з міді марки МЗ

№ з/п	№ зразка	Межа міцності при розтягуванні σ_B , кгс/мм ²		Різниця, кгс/мм ²
		Дрібна структура	Крупна структура	
1	1	193	164	29
2	2	188	164	24
3	3	193	160	33
4	4	206	157	49
5	5	201	160	41
6	6	203	154	49
7	7	197	176	21
Середнє значення		197,3	162,3	35
Пресована мідна труба	Середнє значення вимірів – 181,1			–

Загалом установлено, що межа міцності перерізу мідної литої заготовки змінює свої значення залежно від розміру макроструктури. Так, нижня частина виливка, що характеризується дрібнозернистою структурою, має більш високий показник σ_B , ніж верхня, що відрізняється великозернистою структурою. Різниця в показниках становить у середньому 35 кгс/мм² (або 17,7 %). Значення межі міцності при розтягуванні зразків, вирізаних з нижньої частини литої труби, перевищують аналогічний показник пресованої труби (197,3 та 181,1 кгс/мм² відповідно). Значення межі міцності при розтягуванні зразків, вирізаних з верхньої частини труби (з крупнозернистою структурою), менше межі міцності пресованої труби.

Аналізуючи отримані дані, можна зробити такі висновки:

- ділянки трубної заготовки з дрібнозернистою структурою мають більш високі значення умовної межі плинності σ_T , ніж ділянки того ж зразка з крупнозернистою структурою;
- трубна заготовка, відлита з дрібнішим кроком витягування, має більші значення межі плинності металу, ніж зразки, отримані з більшим кроком витягування;
- лита заготовка, отримана з кроком витягування 10 мм, має менші значення межі плинності, ніж пресована заготовка;
- межа плинності литої заготовки з кроком витягування 7 мм має значення, порівняні зі значеннями межі плинності мідної пресованої труби.

Для дослідження механічних властивостей литої трубної заготовки з кожного дібраного нами зразка вирізано по два плоскі фрагменти стандартних розмірів (дві смужки), призначені для проведення випробування на розрив. Один із цих зразків вирізався із зони, що характеризується великокристалічною структурою, другий – із зони із дрібнокристалічною структурою.

Результати вимірів відносного подовження ділянок литої труби, що відрізняються розмірами структурних складників, не виявили чітко вираженої закономірності: відносне

подовження одного й того ж зразка, досліджене на ділянці з крупнозернистою структурою, може бути як більше, так і менше аналогічного показника, визначеного на ділянці з дрібнокристалічною структурою.

Висновки.

1. У процесі експерименту обрано оптимальні технологічні параметри виливки трубної заготовки з міді марки М3, що забезпечують отримання якісної заготовки з дрібнозернистою однорідною структурою, придатної для подальшої прокатки.

2. Установлено, що неоднорідність макроструктури в поперечному перерізі литої заготовки є наслідком відмінності умов теплопередачі від металу, що кристалізується, до води, що циркулює в системі охолодження, через утворення повітряного зазору між зовнішньою поверхнею заготовки й внутрішньою поверхнею графітової втулки, а також можливо через між зовнішньою поверхнею графітової втулки та внутрішньою поверхнею мідної сорочки кристалізатора.

3. Наявність тріщин на зовнішній поверхні заготовки свідчить про наявність великої термічної напруги по перерізу заготовки, що мали місце в процесі кристалізації розплаву в кристалізаторі. Причиною термічної напруги могло стати значна відмінність питомих теплових потоків у поперечному перерізі заготовки, зумовлене тими самими обставинами, які описані в попередньому висновку.

4. Технічний стан машини, що витягує, не дає змоги витримувати постійним такий технологічний параметр, як величина кроку витягування, що має вагоме значення при розливанні міді, особливо з малим кроком витягування.

5. Для продовження подальшої експериментальної роботи з розробки технології виливки мідної трубної заготовки під подальшу холодну прокатку необхідно збирання пари «мідна сорочка – графітова втулка» здійснювати з натягом 0,10–0,15 мм для забезпечення щільного контакту між зазначеними елементами;

ЛІТЕРАТУРА:

1. Shuo L., Zhang Y., Zijian S., Manman L., Foquan G., Jicheng L., Tao J. Recycling the domestic copper scrap to address the China's copper sustainability. *Journal of materials research and technology*. 2020. Vol. 9(3). p. 2846–2855.
2. Koing G., Kuhn N., Fink T., Lorber B., Radmann Y., Martinelli W., Tischberger-Aldrian A. Deep learning approaches for classification of copper-containing metal scrap in recycling processes. *Waste Management*. 2024. Vol. 190(15). p. 520–530.
3. Wang J., Ju Y., Wang M., Li X. Scenario analysis of the recycled copper supply in China considering the recycling efficiency rate and waste import regulations. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 146. p. 580–589.

4. Wang M., Yanan L., Yuan M., Cui X., Yang Y., Li X. Dynamic analysis of copper consumption, in-use stocks and scrap generation in different sectors in the U.S. 1900–2016. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 139. p. 140–149.
5. Jiang Y.B., Mao X.D., Lei Y., Liu X.H., Wang Y.H., Xie J.X., Microstructure and mechanical property evolutions of CuNi10Fe1.8Mn1 alloy tube produced by HCCM horizontal continuous casting during drawing and its deformation mechanism. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 771. p. 905–913.
6. Han Y., Xiao Y., Zhang A.Y., Liu F., Yu E.L., Gao Y., Study on influence of lateral liquid feeding into crystallizer on solidification process of copper billets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 125. P. 104–115.
7. Zhang G.L., Zhang S.H., Zhang H.Q. Analysis on folding defects of inner grooved copper tubes during ball spin forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol (184). p. 393–400.
8. Wang Y.L., Molotnikov A., Diez M., Lapovok R., Kim H.E., Wang Y., Estrin, gradient structure produced by three roll planetary milling: numerical simulation and microstructural observations. *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. (639). P. 165–172.
9. Shih C.K., Hsu R.Q., Hung C.A study on seamless tube in the planetary rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 121. p. 273–284.
10. Shih C.K., Hung C. Experimental and numerical analyses on three-roll planetary rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 142. p. 702–709.

REFERENCES:

1. Shuo, L., Zhang, Y., Zijian, S., Manman, L., Foquan, G., Jicheng, L., & Tao, J. (2020). Recycling the domestic copper scrap to address the China's copper sustainability [Recycling the domestic copper scrap to address the China's copper sustainability]. *Journal of materials research and technology*. 9(3), 2846–2855.
2. Koing, G., Kuhn, N., Fink, T., Lorber, B., Radmann, Y., Martinelli, W., & Tischberger-Aldrian, A. (2024). Deep learning approaches for classification of copper-containing metal scrap in recycling processes [Deep learning approaches for classification of copper-containing metal scrap in recycling processes]. *Waste Management*. 190(15), 520–530.
3. Wang, J., Ju, Y., Wang, M., & Li, X. (2019). Scenario analysis of the recycled copper supply in China considering the recycling efficiency rate and waste import regulations [Scenario analysis of the recycled copper supply in China considering the recycling efficiency rate and waste import regulations]. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 146. p. 580–589.
4. Wang, M., Yanan, L., Yuan, M., Cui, X., Yang, Y., & Li, X. (2018). Dynamic analysis of copper consumption, in-use stocks and scrap generation in different sectors in the U.S. [Dynamic analysis of copper consumption, in-use stocks and scrap generation in different sectors in the U.S.]. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 140–149.
5. Jiang, Y.B., Mao, X.D., Lei, Y., Liu, X.H., Wang, Y.H., & Xie, J.X. (2019). Microstructure and mechanical property evolutions of CuNi10Fe1.8Mn1 alloy tube produced by HCCM horizontal continuous casting during drawing and its deformation mechanism [Microstructure and mechanical property evolutions of CuNi10Fe1.8Mn1 alloy tube produced by HCCM horizontal continuous casting during drawing and its deformation mechanism]. *Journal of Alloys and Compounds*, 771, 905–913.
6. Han, Y., Xiao, Y., Zhang, A.Y., Liu, F., Yu, E.L., & Gao, Y. (2018). Study on influence of lateral liquid feeding into crystallizer on solidification process of copper billets [Study on influence of lateral liquid feeding into crystallizer on solidification process of copper billets.] *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 125, 104–115.
7. Zhang, G.L., Zhang, S.H., & Zhang, H.Q. (2007). Analysis on folding defects of inner grooved copper tubes during ball spin forming [Analysis on folding defects of inner grooved copper tubes during ball spin forming]. *Journal of Materials Processing Technology*. (184), 393–400.
8. Wang, Y.L., Molotnikov, A., Diez, M., Lapovok, R., Kim, H.E., & Wang, Y. (2015). Estrin, gradient structure produced by three roll planetary milling: numerical simulation and microstructural observations [Estrin, gradient structure produced by three roll planetary milling: numerical simulation and microstructural observations]. *Materials Science and Engineering: A*. (639), 165–172.
9. Shih, C.K., Hsu, R.Q., & Hung, C. (2002). A study on seamless tube in the planetary rolling process [A study on seamless tube in the planetary rolling process]. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 121. p. 273–284.
10. Shih, C.K., & Hung, C. (2003). Experimental and numerical analyses on three-roll planetary rolling process [Experimental and numerical analyses on three-roll planetary rolling process]. *Journal of Materials Processing Technology*. 142, 702–709.