

Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Сидорчука Олега Миколайовича

«Розвиток наукових засад формування структури та властивостей при виготовленні штампових сталей для гарячого деформування міді, мідно-нікелевих та алюмінієвих сплавів»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та відповідності встановленим вимогам

Дисертаційна робота Сидорчука Олега Миколайовича складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 307 найменувань та додатків. Обсяг роботи складає 332 сторінки, робота містить 115 рисунків, 32 таблиці та 4 додатки.

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми сформульовано мету та задачі дослідження, відображено наукову новизну і практичну цінність роботи, наведено відомості щодо апробації роботи та публікацій за темою дисертації.

У першому розділі наведений ґрунтовний аналіз літературних даних попередніх наукових досліджень, присвячених одержанню штампових сталей. Підкреслено переваги використання сталей з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації штампів для гарячого деформування кольорових металів та сплавів та проаналізовано недоліки їх застосування. Описано основні вимоги до сталей для виготовлення штампів та матриць для гарячого деформування кольорових металів та сплавів (головним чином на основі міді та нікелю). Показано класифікацію штампових сталей для гарячого деформування. Описано залежність механічних властивостей від фазово-структурного стану, а також механізми утворення та роль проміжних фаз у сталях при проведенні термічного оброблення. Розглянуто термічну (відпал, гартування та відпуск), термодифузійну та хіміко-термічну обробку штампових сталей.

За результатами критичного аналізу літературних даних сформульовано мету та визначено основні завдання досліджень.

У другому розділі обґрунтовано вибір матеріалів для проведення досліджень та методів досліджень, представлено обладнання, яке використовувалося для отримання зливок дослідних сталей, а також для визначення механічних, фізичних властивостей та для дослідження фазово-структурного стану дослідних сталей.

Третій розділ складається із 5 підрозділів. У першому підрозділі обґрунтована та описана методика виготовлення дослідної штампованої сталі 4Х3Н5М4Ф, яка одержана за технологією електрошлакового кокільного лиття (ЕШКЛ). Другий підрозділ присвячено дослідженням зміни фазово-структурного стану дослідної сталі в процесі часткової перекристалізації при неповному відпалі та його впливу на морфологію карбідної фази. В третьому та четвертому підрозділі представлені результати досліджень впливу температури нагрівання на кількість залишкового аустеніту в сталі 4Х3Н5М3Ф, дослідження критичних точок фазових перетворень A_{c1} та A_{c3} . Представлено побудовані структурні діаграми зміна кількості аустенітної та мартенситної складових в залежності від температури гартованої сталі 4Х3Н5М3Ф. В п'ятому підрозділі представлені результати досліджень впливу температури гартування та відпуску на твердість та структурний стан дослідної сталі. Приведена встановлена залежність твердості від температури відпуску литої сталі 4Х3Н5М3Ф, отриманої за технологією ЕШКЛ, загартованої від температури 1030 ± 10 °С. В шостому підрозділі представлений розроблений технологічний регламент обробки сталі для виготовлення штампового інструменту для гарячого деформування міді та мідних сплавів. Сьомий підрозділ присвячений результатам розробки остаточних параметрів термічного оброблення дослідної сталі. Показано, що розроблені в роботі оптимальні режими термічного оброблення (гартування від температури 1100 ± 10 °С та відпуск за температури 590 ± 5 °С) штампової сталі 4Х4Н5М4Ф2 дозволили підвищити теплостійкість штампів до температури 650 °С.

У четвертому розділі приведені результати досліджень впливу гарячої пластичної деформації (кування) на формування структурного стану та фізико-механічні властивості дослідної сталі 4Х4Н5М4Ф2. На основі цих результатів були розроблені режими термічного оброблення (гартування від температури 1100 ± 10 °С та відпуску за температури 590 ± 5 °С), які дозволили підвищити теплостійкість деформованої (кованої) сталі 4Х4Н5М4Ф2 до температури 630 °С при HRC₄₀.

П'ятий розділ присвячено результатам досліджень причин виникнення оберненої та необерненої відпускнуї крихкості досліджуваної сталі 4Х4Н5М4Ф2. Встановлені температурні інтервали виникнення цього явища. Показано перспективи використання вказаної сталі для виготовлення матриць для гарячого деформування сплавів кольорових металів нижче температури A_{c1} .

У шостому розділі, який складається із чотирьох підрозділів, представлені результати промислового випробування інструментів із сталей 4Х3Н5М3Ф та 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування міді, мідно-нікелевого та алюмінієвого сплаву. Порівняльний аналіз показав, що використання матриць для гарячого деформування мідно-нікелевого сплаву МНЖ5-1, виготовлених із дослідної литої сталі марки 4Х3Н5М3Ф, підвищило в три рази ресурс їх експлуатації в порівнянні з деформованою

сталлю марки 3Х3М3Ф, яка використовувалася раніше для виготовлення матриць.

У загальних висновках дисертації викладено найбільш важливі наукові та практичні результати, що були отримані в роботі в процесі досліджень, і які сприяли розв'язанню сформульованої науково-прикладної проблеми.

Список джерел, який був використаний в аналітичному огляді проблеми, достатньо повно охоплює зазначену галузь знань та відображає основні напрямки розвитку досліджень структури та фізико-механічних властивостей сталей для інструменту гарячого деформування та вдосконалення за їх результатами технології термічного оброблення інструменту гарячого деформування.

Структура та зміст дисертаційної роботи та автореферату співпадають. Матеріали дисертації викладені послідовно, а їх оформлення відповідає вимогам щодо докторським дисертаціям.

Актуальність теми дисертації та відповідність роботи спеціальності 05.02.01-Матеріалознавство.

Традиційні системи легування сталей з використанням таких елементів як Со, W та ін., що підвищують критичну температурну точку A_{c1} для підвищення теплостійкості сталі, на сьогодні не задовольняють вимогам в експлуатації інструменту за робочих температур вище критичної температури A_{c3} та нижче A_{c1} . Навіть найбільш теплостійкі сталі розміцнюються при робочих температурах вище 650 °С, що є основною причиною швидкого виходу інструменту з ладу. Така ситуація вимагає пошуку іншого класу сталей. Таким чином був запропонований новий клас сталей, які при кімнатній температурі відносяться до феритного класу, а при експлуатаційній температурі переходять в аустенітну область. Такі сталі були названі сталями з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації (РАПЕ). Проте в ряді робіт було встановлено незадовільну механічну обробку різанням заготовок при виготовленні матриць після проведення відпалу цих сталей. Крім того лита структура зливків, виготовлених за традиційною технологією ливарного виробництва (ТТЛВ), має ряд недоліків, а саме: карбідну неоднорідність, наявність сітки дендритної структури та ділянок евтектики. Також на експлуатаційні властивості сталі з РАПЕ негативно впливає і недостатня оптимізація режимів її термічної обробки (гартування та відпуск), що не забезпечує необхідної експлуатаційної довговічності. Все це вимагає проведення досліджень в цьому напрямку для підвищення експлуатаційного ресурсу штампової сталі для гарячого деформування, а також зниження її собівартості. З погляду вищезазначеного, надана до розгляду дисертаційна робота є актуальною, а представлений матеріал наукових досліджень змістовно відповідає спеціальності 05.02.01-Матеріалознавство.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі, їх достовірність.

Аналіз дисертації та автореферату Сидорчука О.М. показав, що наукова достовірність результатів досліджень, висновків та положень, які висвітлено у дисертаційній роботі, не викликає сумнівів. Вона забезпечена:

- коректною постановкою завдань, великим об'ємом експериментальних досліджень, системністю вивчення та логікою аналізу досліджуваних процесів, відсутністю протиріч щодо сутності фізико-механічних властивостей і кількісною металографією;
- системним аналізом існуючих сучасних літературних джерел щодо досліджуваних процесів;
- достатньою кількістю публікацій у виданнях, що входять до переліку фахових видань з технічних наук в Україні, публікацій у міжнародних виданнях, що входять до наукометричних баз даних SCOPUS та Web of Science, апробацією отриманих результатів на міжнародних конференціях;
- наукова новизна отриманих результатів визначається одержаними експериментальними даними та встановленими закономірностями.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів.

У дисертаційній роботі одержано ряд нових теоретичних та експериментальних результатів, а саме:

1. *Встановлено*, що за рахунок введення до складу сталі 3Х3М3Ф добавок нікелю (4Х3Н5М3Ф) вдалось знизити критичну температуру A_{c3} . Разом з попереднім нагрівом штампового інструменту до температури 400-450 °С, це дозволило в процесі експлуатації інструменту при гарячому деформуванні мідно-нікелевих сплавів досягти розігріву робочої частини матриці вище критичної точки A_{c3} ; і забезпечити аустенітну структуру і віднести її до сталей з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації.

2. *Вперше* було встановлено критичні температурні точки сталі марки 4Х3Н5М3Ф ($A_{c1} = 700 \pm 10$ °С, $A_{r1} = 230 \pm 20$ °С, $A_{c3} = 840 \pm 10$ °С та $A_{r3} = 380 \pm 20$ °С) та розробити режим неповного відпалу між критичними точками A_{c1} та A_{c3} (температура 750 ± 20 °С), при якому відбувається процес часткової перекристалізації, внаслідок чого утворюється кулеподібна карбідна складова у структурі металу, яка забезпечує підвищення ударної в'язкості. Така структура полегшила механічну обробку заготовок при виготовленні інструменту.

3. За результатами дилатометричних досліджень, *вперше* показано роль добавок нікелю у підвищенні розгаростійкості штампової сталі за рахунок зменшення коефіцієнту термічного розширення при переході від мартенситу до аустеніту під час нагрівання загартованої сталі.

4. *Вперше* було побудовано діаграму фазового стану для сталі марки 4Х4Н5М4Ф2 у середовищі "CALPHAD", за умови термодинамічної

рівноваги, яка дозволила встановити межі термодинамічно-рівноважного існування аустеніту та спрогнозувати наявність різних фаз у сталі, їх кількість та температурний інтервал існування.

5. *Вперше*, за допомогою високотемпературного X-променевого фазового аналізу, було встановлено нелінійну залежність збільшення вмісту аустеніту (від 2,7 до 90 %) в сталі марки 4X3H5M3Ф в інтервалі температур від кімнатної до 800 °С.

6. *Вперше* встановлено, що в інтервалі температур від 450 до 800 °С залежність кількості аустеніту, яка є термічно індукованою величиною, описується залежністю, що відповідає закону Арреніуса ($R^2 = 0,98397$), тоді як залишкова кількість аустеніту за кімнатної температури не відповідає цій залежності.

7. *Вперше* показано, що підвищення теплостійкості сталі 4X4H5M4Ф2 забезпечується підвищенням температури гартування до температури початку первинної рекристалізації (1110 °С), при якій в аустеніті розчиняється більша кількість карбідної фази типу $M_{23}C_6$ і при наступному відпуску, ця карбідна фаза менше виділяється та коагулює.

8. *Вперше* встановлено причину виникнення оберненої відпускної крихкості деформованої сталі 4X4H5M4Ф2, що пов'язана із утворенням на межах зерен карбідної фази типу M_7C_3 , при наявності якої знижується твердість нижче 40 HRC при відпуску за температури вище 630 °С і за таким механізмом відбувається її розміцнення.

9. *Вперше* було встановлено причину виникнення необерненої відпускної крихкості литої сталі 4X4H5M4Ф2, що полягала у формуванні твердого розчину заміщення (хімічна формула фази $Fe_{0,93}Ni_{0,056}$) та встановлено, що легуючий елемент Ni призводив до затримки процесів коагуляції карбідної фази типу M_6C на межах зерен, що знижувало ударну в'язкість, підвищувало питомий електричний опір та крихкість сталі в інтервалі температур 450...500 °С.

Практичне значення результатів роботи. Завдяки дослідженням штампових сталей з РАПЕ марок 4X3H5M3Ф та 4X4H5M4Ф2, які були одержані електрошлаковим кокільним литтям, було:

1) *досягнуто* скорочення енергоємних режимів термічної та деформаційної обробок, які проводили для штампових сталей підвищеної теплостійкості та в'язкості традиційного способу виробництва, а саме відмовитися від проведення дифузійного відпалу за температури 1100 ± 20 °С, кування заготовок за температури 1170 ± 20 °С та розробити режим відпалу, який дозволяє якісно підготувати сталь до механічної обробки;

2) *встановлено*, що за рахунок введення до 5 % нікелю у хімічний склад литої сталі марки 4X3M3Ф (без додавання мангану та мікролегуювання азотом), вдалось знизити критичну температурну точку A_{c3} і забезпечити існування аустенітної структури в інтервалі експлуатаційних температур 900...950 °С при гарячому деформуванні мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ5-1, що дозволило підвищити стійкість інструменту у три рази, у

порівнянні з матрицями з деформованої сталі марки 3Х3МЗФ, яка використовувалась на виробництві;

3) *встановлено*, що при попередньому нагріванні сталі 4Х3Н5МЗФ до температур 400...450 °С у процесі експлуатації при гарячому деформуванні мідно -нікелевого сплаву, відбувається розігрів робочої частини матриці до температури вище критичної точки A_{c3} ;

4) *розроблено* сталь марки 4Х4Н5М4Ф2 і режими її термічної обробки, що дозволили підвищити теплостійкість при одержанні виробів гарячим деформуванням (волочіння) міді за робочих температур < 650 °С, завдяки чому зменшилась величина розгарних тріщин і стало можливим збільшення величини робочого профілю матриці та продовження гарячого деформування міді після повного циклу експлуатації при виготовленні меншого профілю;

5) *розроблено* режими термо-деформаційної обробки сталі марки 4Х4Н5М4Ф2, що дало змогу, за відсутності оберненої відпускнуї крихкості, успішно експлуатувати великогабаритні деталі, у вигляді коліс екструдерів, за робочих температур гарячого деформування міді марки М1 (< 630 °С);

6) *розроблено* режими остаточної термічної обробки (гартування та відпуск) литої сталі марки 4Х4Н5М4Ф2, що дало змогу, за відсутності необерненої відпускнуї крихкості, успішно експлуатувати матриці для гарячого деформування алюмінієвого сплаву марки АК7ч за робочої температури < 450 °С;

7) *розроблено* технологію виготовлення матриць, із сталі з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації, з підвищеним ресурсом експлуатації в широкому інтервалі робочих температур – вище критичної точки A_{c3} (850 °С) для гарячого деформування мідно-нікелевого сплаву та нижче критичної точки A_{c1} (700 °С) гарячого деформування міді та алюмінієвого сплаву.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні положення та результати досліджень дисертації Сидорчука О.М. викладені в 38 наукових працях, з яких 6 статей у провідних наукових фахових виданнях, що входять до наукометричних баз даних SCOPUS та Web of Sciense (квартилі Q2 та Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank, 19 публікацій, що входять до переліку фахових видань України, 2 патенти та 11 публікацій за матеріалами доповідей, які розглядались на конференціях.

Зміст автореферату повністю ідентичний основним положенням дисертації і відображає основні її наукові результати, що отримані здобувачем.

Зауваження по дисертаційній роботі.

Попри загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, в ній присутній ряд недоліків, по яким можна сформулювати наступні зауваження:

1. Деякі пункти загальних висновків по роботі співпадають із висновками по розділам (наприклад п. 5, 7, 11 розділу 3 ідентичні п. 3,5,7 загальних висновків). Це не бажано. Загальні висновки повинні бути узагальнюючі.

2. Описуючи процес термічного оброблення дослідних сталей, автор використовує такі поняття як охолодження з піччю, на повітрі, в оливi. Бiльш коректна було б у цих випадках визначати та приводити дані по швидкості охолодження, тоді результати були б бiльш науковi та в загальному вигляді характеризували процес термічного оброблення.

3. Автор в дисертації неодноразово робить посилання на ГОСТи, які на сьогодні в Україні не діють. Так, зокрема, характеризуючи методики випробувань на ударний згин та статичний розтяг, вказано, що вони проводились відповідно за ГОСТ 9454-84 та ГОСТ 1497-84. Але на сьогодні в нашій країні є діючі стандарти ДСТУ ISI 148-1-2022 та ДСТУ ISI 6892-1-2019, на які і потрібно робити посилання.

4. Не зрозуміло позначення такої характеристики механічних властивостей як ударна в'язкість. В табл. 3.8 (с.193 дисертації) та деяких інших вона позначена як «КС», а в таблиці 5.5 (с.266) як «КСU». І чому для проведення випробувань використовується зразок без надрізу (про це сказано на с.152)?

5. На рис. 3.33 дисертації та 11 автореферату приведено залежність ударної в'язкості литої сталі 4Х4Н5М4Ф2 від температури відпуску, загартованої від двох різних температур: 1100 ± 5 °C та 1080 ± 5 °C. Показано, що підвищення температури гартування на 20°C приводить до збільшення ударної в'язкості майже в два рази. Це дуже цікавий науковий результат, але за матеріалами дисертації не достатньо обґрунтоване пояснення цього явища (зокрема, металографічно).

В дисертації мають місце деякі неточності: замість «добавок нікелю» краще писати «легування нікелем» (с.32 дисертації); на рисунку 16 (автореферату) та рисунку 3.45 (дисертації) бажано замість «...гартована при» написати «...загартована від»; замість «карбідна складова» бажано було б написати «карбідна фаза» (с. 144 дисертації); написано «зниження твердості від 33 до 34 HRC» (с.168 дисертації); на рисунку 21 (автореферату) та рисунку 5.2 (дисертації) є описка, замість «змісту мартенситу» треба писати «вмісту мартенситу»; загальний об'єм дисертації становить 332 сторінки, а не 338 як вказано в авторефераті.

Загальний висновок по дисертації.

Дисертація Сидорчука Олега Миколайовича є завершеною кваліфікаційною науковою роботою, що характеризується системністю викладених положень, базується на фундаментальних законах сучасної науки і містить нові науково обґрунтовані результати, які не викликають сумніву.

Отримані в дисертаційній роботі результати у сукупності розв'язують актуальну науково-технічну проблему, яка полягає в підвищенні

експлуатаційної надійності та довговічності інструменту для гарячого деформування без легування сталі дорогими елементами.

Зроблені зауваження та побажання не є принциповими до суті дисертації і не знижують її загальної позитивної оцінки.

Наукові положення дисертації, висновки та рекомендації є достовірними та відповідають об'єктивній дійсності.

Мова та стиль дисертації відповідають вимогам до науково-технічних текстів та публікацій.

Дисертаційна робота відповідає всім вимогам пунктів 7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою КМУ №1197 від 17.11.2021 року, є закінченою кваліфікаційною науковою роботою, а її автор Сидорчук Олег Миколайович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 - Матеріалознавство.

Офіційний опонент:

директор інституту

чорної металургії

ім. З.І. Некрасова

НАН України,

член-кореспондент НАН

України,

доктор технічних наук



Олександр Бабаченко