

ВІДГУК

офіційного опонента член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук Квасницької Ю.Г.

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»,
 представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 307 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 338 сторінки друкованого тексту, включаючи 115 рисунків, 32 таблиці та 4 додатки.

Актуальність обраної теми дисертації. Актуальний стан розвитку промисловості обумовлює необхідність розв'язання науково-технічної задачі підвищення експлуатаційних властивостей сталевих інструменту в умовах експлуатації при екстремальних температурно-силових навантаженнях. Сучасний рівень результативності сучасних методів точного формоутворення визначається здатністю інструменту зберігати свою працездатність.

Серед штампових сталей особливе значення мають сталі, призначені для гарячого деформування кольорових металів та їх сплавів, а одним із пріоритетних завдань сучасного матеріалознавства є створення сталей із покращеними експлуатаційними характеристиками. Характерною рисою більшості сталей нових марок є легування з використанням порівняно невисоких концентрацій окремих легуючих елементів. Наявні в науковій літературі відомості дозволили суттєво підвищити експлуатаційну стійкість матриць із деформованих сталей. Проте, за результатами низки досліджень встановлено, що після проведення відпалу сталі механічна обробка різанням заготовок при виготовленні матриць характеризується незадовільною якістю. Це зумовлено структурними особливостями сталі, одержаною за традиційною технологією ливарного виробництва, для якої притаманні карбідна неоднорідність, наявність сітки дендритної структури та ділянок евтектики. Додатковим фактором, що негативно впливає на експлуатаційні характеристики сталі з наявністю евтектики, є недостатня оптимізація параметрів термічної обробки – гартування та відпуску – як для литих, так і деформованих заготовок. Крім того, відсутність проведення дослідно-промислових випробувань із гарячого деформування міді, алюмінію та їх сплавів у температурних інтервалах нижче критичної точки A_{c1} та вище A_{c2} суттєво обмежила можливості удосконалення технологічного процесу. Загалом технологія виготовлення таких сталей на сьогоднішній день залишалася трудомісткою та малоефективною. Тому підвищення теплостійкості, розширення робочого інтервалу температур, підвищення експлуатаційного ресурсу штампової сталі для гарячого деформування, а також зниження їх собівартості є **актуальним завданням**.

Про актуальність теми роботи свідчить також її зв'язок з темами відомчих програм, що виконані в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України протягом 2013-2023 років, зокрема: в рамках цільової програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин» "Розробка технології виробництва литої штампової сталі для гарячого деформування з регулюванням аустенітного перетворення"; грантової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом "Розробка наукових і технологічних основ виготовлення формотворного штампового інструменту на основі створення і використання нових перспективних сталей і ливарно-деформаційних методів їх обробки" та тем відомчого замовлення НАН України "Основні закономірності фазово-структурного стану штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення в процесі експлуатації штампового інструменту"; "Штампові сталі для гарячого деформування кольорових металів та сплавів з підвищеними експлуатаційними властивостями".

У реалізації названих робіт дисертант приймав безпосередню участь.

Метою роботи є розробка технології отримання штампових сталей із регульованим аустенітним перетворенням в умовах експлуатації, враховуючи результати досліджень процесів структуроутворення під час лиття, термодформаційної, механічної та завершальної термічної обробки, а також покращення механічних та експлуатаційних характеристик інструменту.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета й основні завдання досліджень, визначені об'єкт та предмет дослідження, сформульовані наукова новизна й практичне значення отриманих результатів роботи, наведені відомості про їх апробацію та представлений перелік публікацій по темі дисертаційної роботи із зазначенням особистого внеску автора.

У першому розділі автором викладено основні вимоги до сталей, призначених для виготовлення штампів та матриць, що застосовуються при гарячому деформуванні кольорових металів та їх сплавів (переважно на основі міді та нікелю). Наведено класифікацію штампових сталей для гарячого деформування. Розглянуто взаємозв'язок між механічними властивостями та фазово-структурним станом сталей, а також охарактеризовано формування проміжних фаз та їхню функціональну роль у процесах термічної обробки. Обґрунтовано доцільність використання сталей із контрольованим аустенітним перетворенням для технологій гарячого деформування кольорових металів та сплавів, разом із критичним аналізом наявних недоліків таких матеріалів. Вивчено та проаналізовано літературу щодо застосування адитивних технологій для відновлення штампів та матриць. На підставі проведеного аналізу літературних джерел автором сформульовані мета та задачі досліджень.

У розділі 2 наведені хімічний склад та механічні властивості дослідних сталей, хімічний та ваговий склад лігатур і шихти для виплавки досліджених штампових сталей. Описана технологія і обладнання для відкритої плавки електрошлаковим кокільним литтям. Наведений опис методу відбору проб та

визначення хімічного складу сталі. Описана методика металографічних досліджень, фазового аналізу та визначення властивостей матеріалу. Представлено сучасне обладнання для проведення термічної обробки досліджуваних сталей. Дослідження проводилися за стандартизованими методиками.

Третій розділ присвячено розробки технології одержання сталі 4X3H5M3Ф, для чого до брухту базової сталі 3X3M3Ф додавали розроблену лігатуру на основі Fe-Ni-Mo-V-Mn з метою коригування хімічного складу. Вивчена структура та властивості зразків дослідної сталі в литому стані. Обґрунтовано можливість застосування литої штампової сталі 4X4H5M4Ф2, розробленої для деформації мідно-нікелевих сплавів, при обробці міді в експлуатаційному температурному діапазоні 550–650 °С, де не фіксується явище відпускнуї оберненої крихкості. Встановлено оптимальні режими термічної обробки (гартування від температури 1100±10 °С та відпуск за температури 590±5 °С) штампової сталі 4X4H5M4Ф2 дозволили підвищити її теплостійкість до температури 650 °С. Виявлено, що структура та теплостійкість сталі визначає характер охолодження після відпуску. Серед застосованих середовищ — охолодження на повітрі, в оливі та з піччю — оптимальним за результатами досліджень є охолодження на повітрі.

В розділі 4 вивчено формування структури та властивостей деформованої сталі 4X4H5M4Ф2. Через складнощі отримання зливків великого діаметру за технологією електрошлакового кокільного лиття, за результатами дослідження структури та властивостей сталі 4X4H5M4Ф2 для виготовлення великогабаритних деталей, таких як екструдерні колеса, було рекомендовано здійснювати гаряче деформування цієї сталі в температурному діапазоні 1160–1180 °С. Запропоновані режими термічної обробки — загартовування з температури 1100±10 °С та відпуск при 590±5 °С — забезпечили підвищення теплостійкості деформованої (кованої) сталі 4X4H5M4Ф2 до 630 °С за твердості HRC40. Це дозволило суттєво покращити показники міцності та твердості порівняно зі сталлю марки 4X5MФ1С, що належить до групи теплостійких та в'язких сталей, які застосовуються для гарячого деформування міді.

У розділі 5 Для визначення можливості керування властивостями на основі проведених експериментальних досліджень після гартування та відпуску сталі 4X4H5M4Ф2 за оптимальних режимів термічної обробки та додаткового нагріву, який моделює умови експлуатації оснащення, порівняли фазовий склад, кристалічну структуру та механічні характеристики литої та деформованої сталі. Встановлено, що зміна легуючих елементів матриці не відбувається після відпуску сталі за температур 450–500 °С. Під час проведення хімічного аналізу у точках вимірювання поверхні зразків, після відпуску, були встановлені типи карбідних фаз у структурі металу: карбіди M_6C MC . Вірогідно, що під час гартування сталі карбід типу M_6C розчиняється в аустеніті, а в процесі відпуску за підвищених температур він виділяється з мартенситу. Натомість карбід MC , що формується переважно за участю ванадію, майже не розчиняється в аустеніті. Водночас, у разі наявності у сталі молібдену, частина ванадію може переходити до складу карбіду M_6C . В

результаті експериментальних досліджень було встановлено, що за температури відпуску від 450 до 475 °С параметр кристалічної ґратки сталі збільшувався, що пояснювалося тим, що відбувається утворення твердого розчину заміщення.

В розділі 6 проведені дослідно-промислові випробування інструментів зі сталей 4ХЗН5МЗФ та 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування міді, мідно-нікелевого та алюмінієвого сплаву. Експлуатаційні випробування матриць із литої штампової сталі складу 4ХЗН5МЗФ показали, що при виготовленні трубних заготовок діаметром 60–70 мм із мідно-нікелевого сплаву МНЖС-1 при температурі 900–950 °С стійкість інструменту зросла у три рази порівняно з деформованою сталлю марки 3ХЗМЗФ. Проведені дослідження дозволили значно спростити умови експлуатації інструменту з розробленої сталі із контрольованим аустенітним перетворенням, завдяки відмові від традиційного попереднього нагріву до температур вище A_{c1} і наступного охолодження до 350–450 °С, характерного для використання сталей цього типу.

У висновках відображені основні результати дисертаційної роботи.

У дисертаційній роботі було визначено основні вимоги до структури сталі з регулюванням аустенітного перетворення під час експлуатації. Показано, що нікель, розчиняючись у матриці заліза, сприяє зниженню температури поліморфного перетворення та розширенню температурного діапазону стабільності γ -Fe. Це, у свою чергу, дозволяє зберегти аустенітну структуру сталі протягом усього циклу високотемпературного навантаження інструменту.

У додатках надані відомості, щодо практичного застосування результатів досліджень і список опублікованих праць.

Слід додати, що при наведеному вище огляді змісту розділів дисертації коротко відзначені ті результати, які є найбільш вагомими.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність.

Обґрунтованість та достовірність основних наукових положень, висновків і рекомендацій роботи визначається наступним:

- використанням у роботі праць визнаних учених і фахівців у галузі прикладного матеріалознавства;
- верифікацією та доброю збіжністю результатів аналітично-розрахункових і експериментальних досліджень;
- застосуванням автором добре апробованих методів та методик досліджень, зокрема методів оптичної та електронної мікроскопії, високотемпературного Х-променевого фазового аналізу та результатами механічних випробувань;
- значним обсягом експериментальних даних, отриманих шляхом проведення прямих експериментів;
- наявністю чисельних публікацій у фахових виданнях та апробацією основних результатів роботи на всеукраїнських та міжнародних конференціях.

Отримані автором теоретичні закономірності підтверджені дослідженнями реальних зразків. Вони не мають протиріч з існуючими

теоретичними уявленнями та накопиченим досвідом. Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями. Їх достатня обґрунтованість підтверджується визнанням на відомих міжнародних конференціях з матеріалознавства.

Таким чином, основні результати представленого наукового дослідження є достовірними та обґрунтованими, що підтверджується великим обсягом проведених досліджень. Наукові положення, висновки і рекомендації, що сформульовані у дисертації, відповідають всім вимогам МОН України щодо дисертаційних робіт.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в теоретичному узагальненні та розвитку наукових засад формування структури та властивостей при виготовленні сталей з регульованим аустенітним перетворенням для гарячого деформування міді, мідно-нікелевих та алюмінієвих сплавів.

Положення наукової новизни відповідають поставленим завданням наукової роботи.

Встановлено, що легування сталі 3Х3М3Ф нікелем із утворенням сталі 4Х3Н5М3Ф сприяє зниженню критичної температури A_{c3} . Поєднання цього ефекту з попереднім нагріванням штампового інструменту до 400–450 °С забезпечує в умовах гарячого деформування мідно-нікелевих сплавів досягнення температури робочої частини матриці, що перевищує критичну точку A_{c3} . Це, у свою чергу, дозволяє формувати в структурі сталі стабільний аустенітний стан під час експлуатації.

Вперше визначено критичні температурні інтервали фазових перетворень для сталі марки 4Х3Н5М3Ф, а саме: $A_{c1} = 700 \pm 10$ °С, $A_{r1} = 230 \pm 20$ °С, $A_{c3} = 840 \pm 10$ °С та $A_{r3} = 380 \pm 20$ °С. На основі отриманих даних розроблено оптимальний режим неповного відпалу у температурному діапазоні між критичними точками A_{c1} та A_{c3} (750 ± 20 °С), за якого реалізується процес часткової перекристалізації. Внаслідок цього формується структура з рівномірно розподіленою кулеподібною карбідною фазою, що сприяє підвищенню ударної в'язкості сталі.

Автором уперше доведено, що легування нікелем сприяє підвищенню окалиностійкості штампової сталі, що підтверджено результатами дилатометричних досліджень. Виявлено, що присутність нікелю знижує коефіцієнт термічного розширення в процесі фазового перетворення залишкового мартенситу в аустеніт під час нагрівання загартованої сталі, що, у свою чергу, сприяє підвищенню термостійкості матеріалу.

Вперше, використовуючи метод високотемпературного рентгенівського фазового аналізу, встановлено нелінійний характер зростання вмісту аустеніту в сталі марки 4Х3Н5М3Ф у температурному діапазоні від кімнатної температури до 800 °С, причому його кількість змінюється від 2,7 % до 90 %.

Доведена перспективність та визначені рекомендовані способи термічної обробки для регулювання структури, фазового складу та забезпечення високих властивостей, а саме вперше встановлено, що підвищення теплостійкості сталі 4Х4Н5М4Ф2 досягається за рахунок підвищення температури гартування до рівня початку первинної рекристалізації (1110 °С). За таких умов у структурі

аустеніту розчиняється більша кількість карбідної фази типу $M_{23}C_6$, що, в подальшому, при відпуску знижує інтенсивність її виділення та коагуляції.

Наукова новизна сформульована зрозуміло, з розкриттям суті.

Практичне значення роботи. На основі встановлених автором закономірностей процесів структуроутворення розроблена спрощена та економічно ефективна технологія електрошлакового кокільного лиття для сталей марок 4X3H5M3Ф та 4X4H5M4Ф2 з регульованим аустенітним перетворенням, що забезпечує вищі фізико-механічні та експлуатаційні властивості порівняно зі сталями, виготовленими за традиційною технологією.

Розроблені та запропоновані режими термічної та деформаційної обробки сталі марки 4X4H5M4Ф2 дозволили успішно експлуатувати великогабаритні деталі, зокрема колеса екструдерів, під час гарячого деформування міді марки М1 за температур нижче 630 °С.

Впровадження результатів. Матриці, виготовлені з розробленої сталі 4X3H5M3Ф, продемонстрували втричі вищу стійкість матриць порівняно з матрицями зі сталі 3Х3М3Ф, яка застосовувалася до цього часу на підприємствах України, що підтверджено актами дослідно-промислової перевірки.

На основі отриманих дисертантом результатів досліджень на ливарних підприємствах України можливо реалізувати технології виготовлення перспективних сталей 4X3H5M3Ф та 4X4H5M4Ф2 з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації.

Повнота викладу основних результатів роботи в наукових фахових виданнях. Основні результати досліджень дисертації опубліковані в 38 наукових роботах, 19 з них – у виданнях, які є в переліку ДАК України як фахові, в тому числі 6 статей у провідних наукових фахових виданнях, що віднесено до квартилів Q2 та Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank, 11 публікацій за матеріалами доповідей, які розглядались на конференціях.

Автором одержано 2 патенти України.

Висновки дисертації відображають найважливіші наукові та практичні результати дисертації, в якій наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення актуальної науково-технічної задачі, що полягає у проведенні комплексного дослідження структур, фізико-механічних та експлуатаційних властивостей сталей з регульованим аустенітним перетворенням при оптимальних температурах гарячого деформування міді, мідно-нікелевих та алюмінієвих сплавів, що буде менш енергоємним та трудомістким у порівнянні з існуючими технологічними процесами.

Висновки сформульовані конкретно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

Зміст дисертації і автореферату ідентичний. Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює наведені в самій дисертації результати.

Зауваження та коментарі до дисертації:

1. Робота має деякі неточності в застосуванні термінів та помилки, наприклад, на стор.21 в переліку умовних значень вказано « $\sigma_{0,2}$ – межа плинності, σ_n – межа міцності при розтягу», далі в тексті на стор.31

«...границю міцності ($\sigma_{\text{в}}$, МПа), плинності ($\sigma_{0,2}$, МПа)»; на стор. 50 «За умовами праці інструмент...» та ін., хоча в цілому написана грамотно, логічно та зрозуміло.

2. Перший пункт наукової новизни має декларативний характер. Мають бути вказані рекомендовані межі вмісту нікелю.

3. В першому розділі на сторінці 38 має місце некоректне висловлювання «при цьому їх поверхня завдяки короткочасному контакту інструменту з заготовкою **розігрівається до більш низьких температур**».

Також на стор. 39-40 викликає сумніви щодо визначення терміну «**Жароміцність**, [3, 17, 21-23] тобто метал повинен характеризуватись високою межею плинності і високим опором зносу при високих температурах, щоб уповільнити процеси стирання та деформування елементів фігури інструменту, який розігрівається від контакту з гарячим матеріалом, що обробляється. Жароміцність сталі забезпечується високою міцністю міжатомних зв'язків та її структурою в умовах підвищених температур [17, 21].» Жароміцність – це властивість матеріалів при високих температурах чинити опір деформуванню і руйнуванню під дією навантажень.

4. На стор. 43 При поверхневому розширенні за високої температури на контакті між заготовкою та матрицею може виникати негативне явище – зчеплення (холодне зварювання), яке призводить до підвищеного стирання матриці та робочого матеріалу. В даному контексті вірогідно малось на увазі холодне зчеплення, *тому що холодне зварювання — технологічний процес зварювання тисненням із пластичним деформуванням з'єднаних поверхонь заготовок без додаткового нагрівання зовнішніми джерелами тепла.*

5. стор. 51. «Сталі для прес-форм для лиття під тиском металів з високими температурами плавлення (мідні, алюмінієві та магнієві сплави) повинні мати [69]...». Сплави алюмінію та магнію важко віднести до матеріалів з високою температурою плавлення та посилення на джерело 69 не виглядає коректним.

6. На стор. 56 «При введенні до складу сталей 3-4 % V спостерігається значне погіршення шліфованості, через **збільшення карбіду МС**, що обмежує їх широке застосування [7]». Що малось на увазі, кількість карбідів або їх розмір?

7. Наведені в розділі 1 окремі підпункти, а саме: 1.5.5 Кріогенна обробка; 1.5.6 Азотування 1.5.7 Дифузійне хромування 1.5.8 Дифузійне алітування; 1.5.9 Дифузійне борування, які загалом використовуються в промисловості, можна було б скоротити, оскільки більшість з них в роботі не розглядаються.

8. В загальних висновках бажано б було підкреслити додатки В, Г., які важливі для розуміння практичної значимості та впровадження результатів роботи.

Однак відзначені недоліки та зауваження не зменшують загального високого рівня роботи та цінності отриманих результатів.

Дисертація відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України. Назва та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

Загальний висновок. Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що дисертаційна робота Сидорчука Олега Миколайовича «Розвиток наукових засад формування структури та властивостей при виготовленні штампових сталей для гарячого деформування міді, мідно-нікелевих та алюмінієвих сплавів» є завершеною науково-дослідною розробкою, яка присвячена актуальній науково-практичній проблемі підвищення службових властивостей інструменту із сталі з регулюванням аустенітного перетворення під час експлуатації при екстремальних температурно-силових режимах експлуатації.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство», не містить елементів академічного плагіату та запозичень, здобувач дотримується вимог академічної доброчесності, дотримується норм законодавства про авторське право.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем представлена робота відповідає вимогам пункти 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою № 1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року щодо докторських дисертацій, а її автор Сидорчук Олег Миколайович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент,
завідувач відділом спеціальних сталей та сплавів
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів
Національної академії наук України,
член-кореспондент НАН України



Юлія КВАСНИЦЬКА

Підпис завідувача відділом спеціальних сталей та сплавів
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів
НАН України, чл.-кор. НАН України,
доктора технічних наук засвідчую:

Вчений секретар Фізико-технологічного інституту
металів та сплавів НАН України,
к.т.н., ст.н. сп.




Володимир ЛАХНЕНКО