

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», представленій до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство

Актуальність теми дисертації.

Розвиток ефективного виробництва у машинобудуванні, металургійній, електротехнічній галузях вимагає використання інноваційних технологій виготовлення виробів, які базуються, серед іншого, на застосуванні ефективних методів обробки, технологічного оснащення і інструментів. До високопродуктивних методів, безумовно, відноситься штампування. Серед проблем, з якими стикаються підприємства, що використовують технології обробки тиском, особливо гарячого штампування, чи не найголовнішою є недостатній рівень стійкості інструменту при робочих температурах, обмежений температурний інтервал експлуатації. Вирішення цих проблем можливе шляхом підвищення властивостей штампових сталей, що може бути досягнуто оптимізацією їх хімічного складу, розробкою і застосуванням нових і удосконалених методів виплавки і термічної обробки. Незважаючи на велику кількість досліджень і практичних розробок у цих напрямках, залишаються невирішеними важливі питання, у тому числі обґрунтований вибір марок сталей для інструментів під конкретні групи матеріалів, що оброблюються. Розв'язання завдань, які постають перед дослідниками і практиками, можливе лише при комплексному підході, який базується на «чотирьох китах»: Склад–Структура–Технологія–Властивості. Саме тому дослідження Сидорчука О.М., в основі якого лежить саме такий підхід і метою якого є забезпечення високих експлуатаційних властивостей і ресурсу інструменту для гарячого штампування на основі результатів досліджень хімічного складу, процесів і механізмів формування структури і фазового складу традиційних і нових штампових сталей, технології термічної обробки, є актуальним.

Оцінка змісту дисертації.

Дисертація має обсяг основної частини 283 сторінки, складається з анотацій, вступу, 6 розділів, загальних висновків, переліку посилань на першоджерела з 307 пунктів, містить 4 додатка.

Дисертація має струнку загальну структуру, логічно побудована і являє собою завершену комплексну роботу, яка містить результати досліджень від аналізу факторів, що впливають на властивості сталей для гарячого штампування, процесів і закономірностей формування структури, фазового складу та властивостей сталей різного хімічного складу, до розробки і обґрунтування технологічних схем та режимів термічної обробки, при яких досягається високий рівень механічних та експлуатаційних характеристик, а також випробування інструментів у реальних умовах виробництва.

Основний зміст роботи ретельно і вірно відображений у авторефераті.

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

У першому розділі виконано кваліфікований аналіз сучасного стану досліджень структури і фазового складу штампових сталей для гарячої обробки. Критично проаналізовано вимоги до даних сталей, методи отримання і термічної обробки, а також рівень механічних і експлуатаційних властивостей і можливість керувати ними. В результаті визначено не тільки досягнуті успіхи, але і існуючі протиріччя даних різних дослідників, обґрунтовано напрямки і вірно визначено задачі даного дисертаційного дослідження.

Базуючись на висновках першого розділу роботи у другому розділі здійснено вибір основних марок сталей, що досліджуються, методи виплавлення і обробки сталей. Обговорюється комплекс експериментальних методів, які використовуються в роботі для дослідження хімічного складу, структури, фазового складу і властивостей. Використовуються методи хімічного аналізу, оптичної і електронної мікроскопії, рентгенофазового і рентгеноструктурного, дилатометричного, дюрOMETричного і мікродюрOMETричного аналізів, визначення фізико-механічних і експлуатаційних властивостей сталей.

У наступному розділі дисертації наведені результати комплексних досліджень закономірностей формування структури, фазового складу і властивостей сталей 4X3H5M3Φ та запропонованої 4X4H5M4Φ2. Для сталі марки 4X3H5M3Φ встановлені критичні температурні точки  $A_{c1} = 700 \pm 10^0\text{C}$ ,  $A_{c3} = 840 \pm 10^0\text{C}$ ,  $A_{r1} = 230 \pm 20^0\text{C}$  та  $A_{r3} = 380 \pm 20^0\text{C}$ , цей результат дозволив розробити режим неповного відпалу за температури  $750^0\text{C}$ . Отримано цікавий і важливий, на мій погляд, результат щодо опису залежності зміни вмісту аустеніту у сталі 4X3H5M3Φ від температури відпустки рівнянням Арреніуса, але, на жаль, цей результат не розвинено. Доведено можливість керування структурою та фізико-механічними і експлуатаційними властивостями комплексно-легованих доевтектоїдних штампових сталей з вмістом нікелю від 4 до 5 % (типу 4X3H5M3Φ) при одержанні зливок методом електрошлакового лиття у кокіль та термічної обробки. Побудовано діаграму фазового стану сталі 4X4H5M4Φ2 у середовищі „CALPHAD„ за умови термодинамічної рівноваги, використання якої дозволило встановити межі термодинамічно рівноважного існування аустеніту та спрогнозувати наявність різних фаз у сталі, їх кількість та температурний інтервал існування.

Четвертий розділ дисертації присвячений обговоренню результатів досліджень формування структури та механічних і технологічних властивостей деформованої сталі 4X4H5M4Φ2. Наведено схеми і режими термічної і термдеформаційної обробки сталі. Встановлено, що підвищення температури відпустки деформованої сталі 4X4H5M4Φ2 вище  $630^0\text{C}$  супроводжується утворенням карбідної фази типу  $M_7C_3$ , наявність якої сприяє розміцненню сталі. На основі результатів дослідження структури та властивостей сталі 4X4H5M4Φ2, отриманої за технологією електрошлакового кокільного лиття (для виготовлення крупногабаритних деталей), автором рекомендовано проводити гаряче деформування сталі за температур  $1160...1180^0\text{C}$ .

Дослідження, результати яких обговорюються у наступному розділі, спрямовані на визначення можливості застосування розробленої сталі 4X4H5M4Φ2 в інструменті при обробці заготовок з конкретних матеріалів. Наведені результати

впливу температури (у температурних інтервалах гарячого деформування міді та алюмінієвого сплаву) на фазовий склад, механічні властивості сталі. Встановлено, що температурний інтервал не оберненої відпускної крихкості дослідженої литої та деформованої сталі 4Х4Н5М4Ф2 становить  $450...500^{\circ}\text{C}$ , а температура виникнення оберненої відпускної крихкості -  $650^{\circ}\text{C}$ . Виникнення оберненої відпускної крихкості деформованої сталі 4Х4Н5М4Ф2 пов'язане з виділенням карбідної фази  $\text{M}_7\text{C}_3$  при температурі вище  $630^{\circ}\text{C}$ . Доведено, що причиною не оберненої відпускної крихкості литої сталі 4Х4Н5М4Ф2 при нагріванні є виділення карбідної фази типу  $\text{M}_6\text{C}$  на межах зерен та формування фази твердого розчину заміщення вуглецю на нікель з хімічною формулою  $\text{Fe}_{0,93}\text{Ni}_{0,056}$ .

Заключний розділ роботи носить більш прикладний характер. Наведені і обговорюються результати дослідно-промислові випробувань інструментів зі сталей 4Х3Н5М3Ф та 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування міді та сплавів на основі міді і алюмінію. При виготовленні виробів різного призначення – трубних заготовок, мідних шин, прутків – встановлено підвищення ресурсу експлуатації штампових інструментів з досліджуваних сталей, термооброблених за розробленими раціональними режимами, до 4 разів у порівнянні з інструментами, які традиційно використовуються на підприємствах.

#### Наукова новизна результатів.

Серед результатів, які отримані при виконанні досліджень і, безумовно, мають наукову новизну, слід зазначити наступне.

Установлено, що введення до складу сталі 3Х3М3Ф нікелю (4Х3Н5М3Ф) знижує критичну температуру  $A_{c3}$ . 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 сталі.

Визначено критичні температурні точки сталі марки 4Х3Н5М3Ф ( $A_{c1} = 700 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{r1} = 230 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{c3} = 840 \pm 10^{\circ}\text{C}$  та  $A_{r3} = 380 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ) та розробити режим неповного відпалу між критичними точками  $A_{c1}$  та  $A_{c3}$  (температура  $750 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ), при якому відбувається часткова перекристалізація, внаслідок чого утворюється кулеподібна карбідна складова у структурі металу і забезпечується підвищення ударної в'язкості і оброблюваність заготовок при виготовленні інструменту.

З використанням результатів дилатометричних досліджень доведено, що добавки нікелю сприяють підвищенню розгаростійкості штампової сталі за рахунок зменшення коефіцієнту термічного розширення при переході від залишкового мартенситу до аустеніту під час нагрівання загартованої сталі.

Побудовано діаграму фазового стану сталі 4Х4Н5М4Ф2 у середовищі «CALPHAD» за умови термодинамічної рівноваги, використання якої дозволяє встановити межі термодинамічно рівноважного існування аустеніту та надійно прогнозувати наявність різних фаз у сталі, їх кількість та температурний інтервал існування.

З використанням результатів високотемпературного Х-променевого фазового аналізу встановлено залежність збільшення вмісту аустеніту (від 2,7 до 90 %) від температури в сталі марки 4Х3Н5М3Ф в інтервалі температур від кімнатної до  $800^{\circ}\text{C}$ .

Доведено, що в інтервалі температур від 450 до  $800^{\circ}\text{C}$  залежність кількості аустеніту, яка є термічно індукованою величиною, описується залежністю, що відповідає закону Арреніуса ( $R^2 = 0,98397$ ).

Установлено, що підвищення температури гартування до температури початку первинної рекристалізації ( $1110^{\circ}\text{C}$ ) супроводжується збільшенням кількості карбідної фази типу  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ , які розчиняється в аустеніті, зменшенням її виділення і коагуляції при наступному відпуску, що обумовлює зростання теплостійкості сталі 4X4H5M4Ф2.

Визначено причину виникнення оберненої відпускнуї крихкості деформованої сталі 4X4H5M4Ф2, що пов'язано із утворенням на межах зерен карбідної фази типу  $\text{M}_7\text{C}_3$ , при наявності якої при відпуску за температури вище  $630^{\circ}\text{C}$  твердість сталі знижується нижче 40 HRC, і за таким механізмом відбувається її розміцнення.

Доведено, що формування твердого розчину заміщення (хімічна формула фази  $\text{Fe}_{0,93}\text{Ni}_{0,056}$ ) призводить до прояву необерненої відпускнуї крихкості литої сталі 4X4H5M4Ф2. Установлено, що додаткове легування нікелем призводить до затримки процесів коагуляції карбідної фази типу  $\text{M}_6\text{C}$  на межах зерен, що знижує ударну в'язкість, підвищує питомий електричний опір та крихкість сталі в інтервалі температур від 450 до  $500^{\circ}\text{C}$ .

Новизна результатів вірно відображена у висновках дисертації.

#### Практична цінність результатів дисертації.

Результати дисертаційного дослідження є важливими і у прикладному плані.

На основі отриманих наукових результатів при дослідженні штампових сталей марок 4X3H5M3Ф та 4X4H5M4Ф2 з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації, які одержані електрошлаковим кокільним литтям:

- досягнуто скорочення енергоємних традиційних режимів термічної та деформаційної обробок штампових сталей підвищеної теплостійкості та в'язкості, а саме виключено проведення дифузійного відпалу за температури  $1100 \pm 20^{\circ}\text{C}$ , кування заготовок за температури  $1170 \pm 20^{\circ}\text{C}$  та розроблено режим відпалу, який дозволяє якісно підготувати сталь до механічної обробки;

- за рахунок введення до 5 % нікелю до складу литої сталі марки 4X3M3Ф (без додавання мангану та мікролегування азотом), знижено критичну температурну точку  $A_{c3}$  і забезпечено існування аустенітної структури в інтервалі експлуатаційних температур  $900 \dots 950^{\circ}\text{C}$  при гарячому деформуванні мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ5-1, що дозволило підвищити стійкість інструменту до трьох разів у порівнянні з матрицями з деформованої сталі марки 3X3M3Ф, яка традиційно використовувалась на виробництві;

- розроблено сталь марки 4X4H5M4Ф2 і режими її термічної обробки, що дозволило підвищити теплостійкість при одержанні виробів з міді гарячим деформуванням за робочих температур нижче за  $650^{\circ}\text{C}$ , завдяки чому зменшилась величина розгарних тріщин і збільшено величину робочого профілю матриці та продовження гарячого деформування міді після повного циклу експлуатації при виготовленні меншого профілю;

- розроблено і реалізовано у промислових умовах режими термдеформаційної обробки сталі марки 4X4H5M4Ф2, що дозволило, за відсутності оберненої відпускнуї крихкості, успішно експлуатувати крупногабаритні деталі у вигляді колес екструдерів за робочих температур гарячого деформування міді марки М1 (нижче за  $630^{\circ}\text{C}$ );

- розроблено режими остаточної термічної обробки, яка полягає у гартуванні та відпуску, литої сталі марки 4X4H5M4Ф2, що дало змогу, за відсутності необерненої відпускнуї крихкості, успішно експлуатувати матриці для гарячого деформування алюмінієвого сплаву марки АК7ч за робочої температури нижче  $450^{\circ}\text{C}$ ;

- розроблено технологічні схеми і параметри виготовлення матриць із сталі з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації з підвищеним ресурсом експлуатації в широкому інтервалі робочих температур – вище критичної точки  $A_{c3}$  ( $850^{\circ}\text{C}$ ) для гарячого деформування мідно-нікелевого сплаву та нижче критичної точки  $A_{c1}$  ( $700^{\circ}\text{C}$ ) гарячого деформування міді та алюмінієвого сплаву.

Розроблені технологічні рішення і вироби зі сталі 4X4H5M4Ф2 пройшли успішні випробування в умовах промислових виробництв (акти випробувань від 10.11.2014, 16.08.2017).

#### Достовірність та обґрунтованість результатів.

Використання комплексу сучасних та взаємодоповнюючих методів вивчення структури й властивостей сталей, дослідження технологічних методів і режимів забезпечують високу достовірність отриманих результатів.

Наукові положення, висновки та рекомендації, розвинуті у дисертації, добре обґрунтовані, базуються на глибокому аналізі явищ та процесів, що досліджуються, проведеному на сучасному рівні комплексі експериментальних досліджень, моделюванні та підтверджені практичною реалізацією результатів роботи. Висновки, що сформульовані в роботі, не суперечать класичним уявленням щодо формування структури та властивостей штампових сталей.

#### Зауваження до дисертації.

Відзначаючи хороший рівень роботи, наукове та прикладне значення результатів доцільно зробити деякі зауваження і побажання:

- окремі пункти наукової новизни і практичної цінності результатів потребують конкретизації. Наприклад, п. 7 Наукової новизни – бажано навести кількісні показники, а не «більша кількість фази...» і «...менше виділяється...». Це відноситься і до, наприклад, п. 4 Практичного значення отриманих результатів – до якого рівня підвищено теплостійкість розробленої сталі?

- на стор. 168 автором рекомендовано для сталі 4X3H5M3Ф «проведення неповного відпалу при температурі нагрівання  $750\pm 20^{\circ}\text{C}$  та ізотермічній витримці від 2,5 до 3 годин (рис. 3.12)». Але на рис. 3.12 зазначено тривалість витримки 1 година. На стор. 170 для цієї ж сталі рекомендована тривалість ізотермічної витримки не менше 5,5 годин. Що є вірним?

- автором не пояснюється, як з наведених фотографій заготовок на рисунку 3.14 зроблено висновок, що використання неповного відпалу сталі «полегшило механічну обробку при виготовленні інструменту» (стор. 168);

- автором зазначається (стор. 191 та 192): «було встановлено, що підвищення вуглецю у складі дослідженої сталі зменшує твердість», але результати досліджень, які підтверджують цей висновок, не наведено;

- автором запропоновано (рис. 3.29) схема і режими термічнодеформаційної обробки сталі 4X3H5M3Ф з гартуванням від температури  $1090-1100^{\circ}\text{C}$ , та відпуском при  $590\pm 5^{\circ}\text{C}$ . На основі яких результатів дослідження зроблено цей висновок? Адже у попередніх розділах розглядаються температури гартування  $1020\pm 10^{\circ}\text{C}$  та  $1025\pm 5^{\circ}\text{C}$ , а на стор. 185 зазначено як раціональний режим гартування від  $1030\pm 10^{\circ}\text{C}$  та відпуск при  $580\pm 5^{\circ}\text{C}$ ;

- на стор. 196 автор стверджує, що «Для дослідженої сталі після низькотемпературного відпуску твердість знижувалася до 2-3 HRC», але результати, наведені на рис. 3.34, свідчать про протилежне;

- наведені на рисунках 3.15 та 3.27 дифрактограми за результатами фазового аналізу сталі 4X3H5M3Ф після гартування і відпуску при 500<sup>0</sup>С та 550<sup>0</sup>С суттєво розрізняються, але пояснення цьому немає;

- при визначенні зміни кількості аустеніту при зміні температури, розділ 3.4, наведені дані відносно сталі 4X3H5M3Ф, а на стор. 176 на рисунку 3.21 показано залежність від температури для сталі 4X4H5M4Ф2, але про дослідження цієї сталі у даному розділі не йдеться;

- перший розділ дисертації, на мою думку, необґрунтовано великий за обсягом у порівнянні з іншими розділами, складає 38% від загального обсягу дисертації;

- необхідно уважніше ставитись до формулювання викладеного: «сталь стає термодинамічно нестійкою і перетворюється на аустеніт ( $\gamma$ -Fe)» (стор. 189). На стор. 193 зазначено, що «Встановлено оптимальну температуру гартування литої сталі» 4X4H5M4Ф2, на стор. 210 «гартування за оптимальним режимом», на стор. 198 – «така структура забезпечила оптимальні фізико-механічні властивості сталі», аналогічно і у 6-му розділі, але процедура оптимізації не проведена. Можливо, краще говорити про раціональну температуру і високі властивості? Це ж відноситься і до визначення теплостійкості сталі, яке зустрічається в окремих розділах, наприклад «Теплостійкість прийнято визначати твердість за кімнатної температури після відпуску на трооститну або трооститно-сорбідну структуру» (стор. 40).

Але зазначені зауваження не стосуються основних положень, висновків і рекомендацій дисертації, не знижують наукової та практичної цінності виконаної роботи.

#### Повнота викладу результатів у публікаціях.

Основні положення дисертації опубліковані у 25 статтях в українських та зарубіжних журналах, з них 6 у журналах, що індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science з Q2 та Q3, 19 публікацій у журналах, що входять до переліку фахових видань України, новизна технічних рішень підтверджена 2 патентами України на корисну модель. На підставі аналізу опублікованих автором робіт, а також численних доповідей на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях можна з упевненістю сказати, що матеріали дисертації достатньо повно висвітлені у статтях та доповідях, пройшли широку апробацію.

Автореферат відповідає змісту дисертації, його написано у відповідності до існуючих нормативних вимог.

#### Загальний висновок.

Проведений аналіз змісту і основних положень дисертації О.М.Сидорчука дозволяє стверджувати, що робота являє собою завершене дослідження, в ній отримані нові і достовірні результати, які дозволяють ефективно вирішити наукову і прикладну проблему підвищення ефективності виготовлення виробів на основі розробки і впровадження інноваційних матеріалів і технологій, що мають високу конкурентоздатність. Наукові і прикладні результати вказують на шляхи і перспективи розвитку сталей для штампового інструменту, тому необхідне їх

подальше використання і розвиток у рамках державних і галузевих наукових та прикладних програм.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство, тому що вона присвячена встановленню закономірностей зв'язку між показниками різних властивостей матеріалів, а саме штампових сталей, а також визначенню принципів і шляхів створення нових прогресивних матеріалів.

Враховуючи викладене, вважаю, що дана дисертація є завершеною науковою працею, за своїм обсягом, кількістю та якістю публікацій, науковою та практичною значимістю повністю відповідає існуючим вимогам Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567 (зі змінами) та Положення про присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук № 1197 від 17.11.2021 до докторських дисертацій, має бути оцінена позитивно, а її автор, Сидорчук Олег Миколайович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
декан фізико-технічного факультету  
Дніпровського національного  
університету імені Олеся Гончара

Анатолій САНІН

*Анатолій Санін*  
30.04.2025

Підпис проф. Саніна А.Ф. засвідчую.

Проректор з наукової роботи  
ДНУ, к.б.н., доцент

Олег МАРЕНКОВ

