



ГОГАЄВ

Казбек Олександрович — член-кореспондент НАН України, завідувач відділу диспергування матеріалів та пластичної деформації прокатуванням Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

НОВІ РІШЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ – ШЛЯХ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ

За матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 26 жовтня 2016 року

У доповіді на прикладі трьох розроблених технологій показано переваги методів порошкової металургії. Впровадження у виробництво різального інструменту, виготовленого з порошків швидкорізальних сталей, забезпечує значне підвищення стійкості порівняно з інструментом аналогічних марок, отриманим традиційним способом. При використанні методу асиметричного прокатування порошків забезпечується висока якість прокату і знижуються енерговитрати на його виготовлення, а використання порошкових модифікаторів у виробництві сільськогосподарських знарядь з високоміцного чавуну значно підвищує їх зносостійкість.

Ключові слова: порошкові швидкорізальні сталі, асиметричне прокатування, міцність, деформація, високоміцний чавун з кулястим графітом.

Нині в усьому світі відчувається нестача енергетичних і сировинних ресурсів, що вимагає раціонального підходу до оцінки економічної ефективності використовуваних технологічних процесів. У зв'язку з цим використання методів порошкової металургії при виготовленні деталей для різних галузей машино- і приладобудування, побутової і оргтехніки сприяє істотному скороченню енерго- і ресурсовитрат. Крім того, методи порошкової металургії дають можливість збільшити ресурс роботи матеріалів.

Порошкова металургія інструментальних сталей. У 70-х роках минулого століття в різні галузі промисловості почали широко впроваджувати високоміцні важкооброблювані сталі та сплави на основі нікелю і титану. Одним з найважливіших завдань того часу було підвищення стійкості різального інструменту для обробки цих матеріалів. Проте слід зазначити, що резерви підвищення якості швидкорізальних сталей (ШС) традиційного способу виробництва (плавка, розливання в зливки) дуже обмежені. Встановилася також марочна структу-

ра споживання ШС, що відповідала рівню розвинених країн. Найбільшого прогресу у підвищенні якості ШС було досягнуто при використанні технології порошкової металургії, коли за рахунок високої швидкості охолодження $10^3\text{--}10^6\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ стримується зростання карбідної фази, внаслідок чого середній розмір карбідів становить $0,5\text{--}2\text{ }\mu\text{м}$. Є два методи отримання порошоків ШС: розпилення розплаву металу газом або водою високого тиску. Порошок, розпилений газом, має сферичну форму частинок, високу твердість і погано формується; порошок, розпилений водою, має розгалужену форму і добре формується.

Світова практика використання порошоків інструментальних сталей віддає перевагу порошкам газового розпилення. Це пов'язано з тим, що порошки водного розпилення мають високий вміст кисню (до $0,3\%$) і при спіканні заготовок з цих порошоків для видалення кисню потрібно використовувати рідкофазне спікання, яке призводить до зростання карбідної фази і, як наслідок, до зниження механічних характеристик сталі. Основною промисловою технологією виготовлення ШС з порошоків, отриманих розпиленням газом, є шведська технологія ASEA-STORA — процес, у якому отриманий порошок завантажують у капсули з маловуглецевої сталі діаметром $\varnothing 450\text{ мм}$. Далі капсули піддають гідро- та газостатичному пресуванню, куванню та прокатуванню.

В Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України було розроблено технологію отримання кінцевого різального інструменту з порошоків ШС, розпилених газом. Основними операціями цієї технології є: отримання порошку, вакуумний відпал порошку, холодне пресування, твердофазне спікання порошоків заготовок та їх гаряча екструзія [1]. За розробленою технологією було отримано різні марки порошоків ШС з вмістом легуючих елементів від 18 до 35% та вуглецю від $1,05$ до $2,3\%$. Серед них слід відзначити такі марки, як Р6М5К5 ($W - 6,3\%$; $Mo - 5,0\%$; $Co - 4,8\%$; $Cr - 4,2\%$; $V - 1,9\%$; $C - 1,05\%$) та Р6М7Ф6К10 ($W - 6,45\%$; $Mo - 7,0\%$; $Co - 10,5\%$; $Cr - 4,2\%$; $V - 6,45\%$; $C - 2,3\%$). Для

всіх досліджуваних сталей було відпрацьовано режими термічної обробки.

Одним з основних технологічних питань обробки тиском є визначення температурного інтервалу деформування. Для визначення оптимальної температури деформування порошоків ШС Р6М5Ф3 і Р6М5К5 було проведено високотемпературні випробування на ударну в'язкість і граничну пластичність. Встановлено, що ударна в'язкість за температури випробування $650\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$ різко підвищується, а за температури більш як $750\text{ }^\circ\text{C}$ зразки деформуються без руйнування. При випробуваннях на граничну пластичність було показано, що максимальна пластичність досліджуваних порошоків ШС перебуває в інтервалі температур $750\text{--}820\text{ }^\circ\text{C}$, причому верхня межа не перевищує температуру фазового перетворення A_{c1} , що дозволяє говорити про можливість деформування порошоків ШС у вказаному інтервалі температур. Після проведених досліджень нагрів порошоків заготовок під екструзію і прокатування сталі проводили до температури $800\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ замість $1100\text{--}1150\text{ }^\circ\text{C}$.

Дослідження особливостей зміни опору деформації в процесі деформування і визначення впливу термомеханічних параметрів (ступеню, швидкості і температури деформації) на опір деформації здійснювалося з використанням даних, отриманих при моделюванні процесу гарячої деформації на кулачковому пластометрі.

Слід зазначити, що дані, отримані в результаті проведених механічних випробувань, свідчили про те, що міцність порошоків ШС перевищувала міцність ШС звичайного способу виробництва аналогічних марок в $1,5\text{--}1,7$ рази, а ударна в'язкість більш ніж удвічі. При цьому теплостійкість і твердість залишалися на тому самому рівні, у зв'язку з чим можна стверджувати, що ці характеристики не залежать від способу виробництва, але залежать від хімічного складу ШС. Високі механічні властивості порошоків ШС є наслідком високої дисперсності карбідної фази. На рис. 1 наведено мікроструктуру сталі Р6М5Ф3 звичайного і порошкового способу виробництва.

Розроблену технологію було впроваджено на ВО «Завод Арсенал», де проводилися промислові випробування фрез діаметром 8 мм з порошкової ШС Р6М5Ф3 при обробці деталей з титану ВТ 1.0. Ці фрези показали підвищення стійкості в 5–6 разів порівняно з інструментом зі сталі Р6М5 традиційного способу виробництва, а при підвищенні режимів різання вдвічі стійкість зростала в 2,4 рази.

Надалі роботи, пов'язані з інструментальною тематикою, проводилися з використанням технології струменевого формування (СФ). Установка для отримання металу СФ відрізняється від установки, що розпилює розплав металу газом, лише тим, що на певній відстані від форсунки встановлюється кристалізатор, який може зворотно-поступально переміщуватися в горизонтальній площині (рис. 2).

Процес струменевого формування відбувається таким чином: рідкий метал з тигля індукційної печі зливається в металоприймач установки, з якого потрапляє на форсунку. Струмінь частинок металу, які перебувають у рідкому, рідко-твердому і твердому станах, потрапляє на кристалізатор. При цьому швидкість охолодження частинок лежить у межах 10^3 – 10^5 °C/с і ці частинки розплющуються і формують зливки (рис. 3) щільністю 96–98% зі структурою дрібнішою і дисперснішою, ніж у литому стані. Технологія СФ стала привабливою завдяки тому, що в ній закладено потенційні можливості поліпшення якості отримуваних матеріалів і зниження витрат енергії внаслідок виключення таких енергозатратних процесів, як гідро- і газостатичне пресування, вакуумний відпал, спікання тощо.

Механічні властивості сталі Р6М5Ф3 залежно від технології виготовлення

Технологія	$\sigma_{зг}$, МПа	КС, Дж/см ²	HRC
Лиття	1400–1750	3–4	63–64
СФ	2200–2500	18–21	63–64
СФ+деф. (прок.)	2960–3210	28–33	64–65
ГОСТ 19265-78 (прок.)	2100–2400	19–20	64–65
ПМ (екструзія)	4200–4400	36–40	65–66

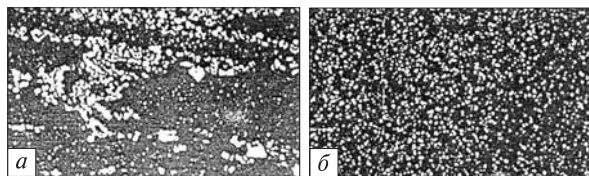


Рис. 1. Мікрофотографії структур швидкорізальної сталі Р6М5Ф3: а — звичайного способу виробництва; б — порошкового способу виробництва

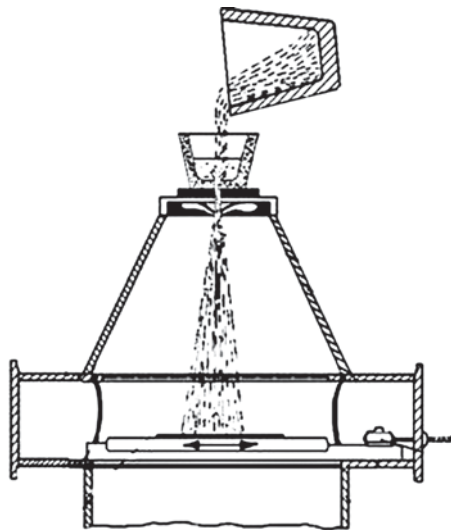


Рис. 2. Установка розпилення розплаву з кристалізатором для отримання заготовок методом струменевого формування

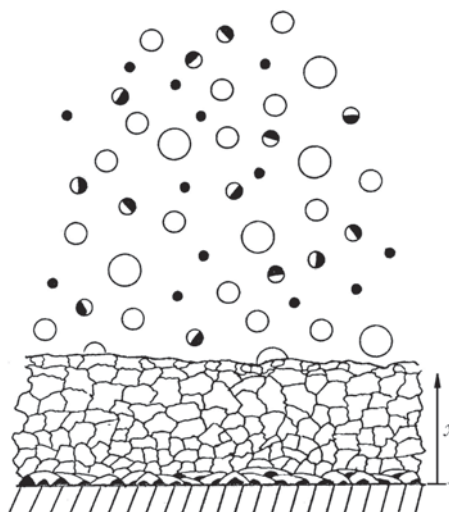


Рис. 3. Зливки після струменевого формування

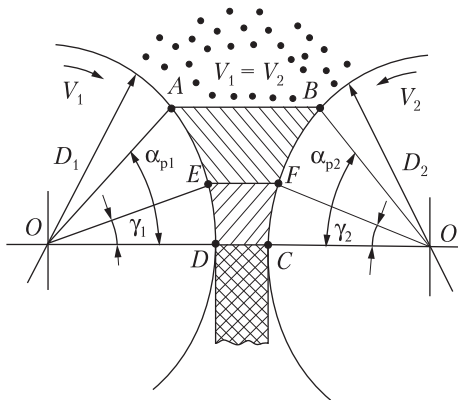


Рис. 4. Схема осередку деформації при симетричному прокатуванні

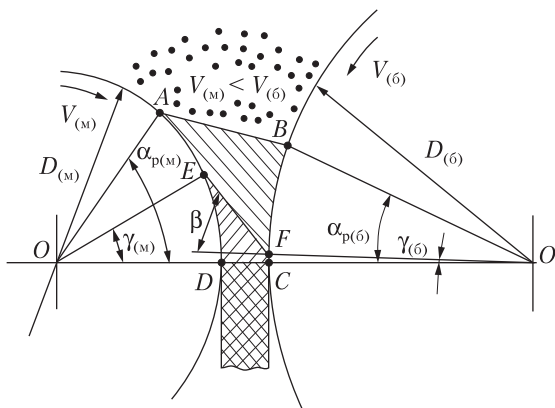


Рис. 5. Схема осередку деформації при асиметричному прокатуванні

У таблиці наведено механічні характеристики сталі Р6М5Ф3 залежно від технології виготовлення.

Сталь, отримана струменевим формуванням з наступним прокатуванням, значно перевершує за міцністю і ударною в'язкістю сталь, отриману за ГОСТом 19265-78, при цьому в її мікроструктурі відсутня суцільна карбідна сітка, карбіди помітно менші і мають більш рівномірний розподіл за розмірами.

Високі службові характеристики при використанні процесу СФ з подальшим прокатуванням були отримані і на модельних сплавах системи Fe—Cr—C та малолегованих ШС [2—4].

Асиметричне прокатування порошків. Симетрична традиційна схема прокатування

(валки однакового діаметра обертаються з однаковою швидкістю) не набула широкого застосування при прокатуванні порошків і гранул через нестабільність властивостей прокату та велику кількість браку при виробництві високощільних виробів. Її застосування обмежене отриманням пористого листового прокату, який використовують для фільтрів рідин і газів, каталізаторів, електродних стрічок та модифікаторів. Ці вироби з щільністю не більш як 75% отримують за один прохід з подальшим спіканням.

Виготовлення безпористих листів, смуг та стрічок методом симетричного прокатування не має широкого застосування з таких причин:

- наявна нерівномірність розподілу контактних тисків в осередках деформації по ширині прокату призводить до появи напружень, що розтягують і руйнують;
- через відсутність переднього та заднього натягування при прокатуванні відбувається відхилення прокату від прямолінійних розмірів (явище серпоподібності);
- високий тиск при прокатуванні через великі кути захвату матеріалу, особливо при прокатуванні гранул, створює значний пружний прогин валків, що призводить до повздовжньої і поперечної різновтовщинності, а також до неплоскостності.

При симетричному прокатуванні (рис. 4) нейтральний переріз EF паралельний лінії центрів валків і в осередку деформації наявні активні розтягувальні напруження при нерівномірній деформації в зоні випередження EFDC.

Для зменшення тиску на валки і підвищення точності отриманого прокату було використано асиметричну схему прокатування (рис. 5), де розузгодження швидкостей валків створювалося завдяки різниці їх діаметрів.

У роботах [5—7] наведено результати комплексних досліджень з визначення основних параметрів при асиметричному прокатуванні порошків: зусилля прокатування P , максимальних нормальних контактних напружень на веденому (σ_m) та ведучому (σ_6) валках, кутів прокатування (α_m) та (α_6), нейтральних

кутів (γ_m) та (γ_c), а також величин випередження. При цьому роботи проводилися на стані ДУО-170 на 5 парах валків з різними діаметрами, що дало змогу змінювати розузгодження швидкостей валків від 1,0 до 1,42. Досліджували порошки Al, Fe, Ti, а також алюмінієві гранули [5].

Порівняльний аналіз традиційного (симетричного) і асиметричного прокатування металевих порошоків показав великі переваги останнього, що полягають насамперед у значному зменшенні максимального нормального контактного напруження. Зниження тиску на валки відбувається в міру збільшення розузгодження швидкостей валків.

При асиметричному прокатуванні (рис. 5) нейтральний переріз EF розташований під кутом β до лінії центрів валків, через що активізується зсувна деформація частинок і зменшується вплив розтягувального напруження. Чим більший кут β , тим активніші зсувні процеси в осередку деформації, при цьому поліпшується здатність порошку формувати міжчастинкові контакти. Це дозволяє значно підвищити механічні властивості початкового (неспеченого) порошкового прокату. Так, модуль пружності і міцність смуг, отриманих з титанового порошку, при асиметричному прокатуванні у 10 разів більші, ніж при симетричному. Структура контактів, сформованих асиметричним прокатуванням, значно досконаліша, ніж при традиційних схемах компактування, і, як наслідок, краще підготовлена до формування досконалого контакту при подальшому спіканні. Розглядаючи структуру руйнування спеченої за оптимальної температури (1000 °C) титанової смуги, можна зробити висновок, що характер руйнування внутрішньокристалітний ямковий, що свідчить про повне пригнічення міжчастинкового руйнування завдяки формуванню досконалого механічного і фізичного контактів між частинками порошку.

Для теоретичного визначення опору деформації використовувалася модель, запропонована Друкером і Прагером, на основі умови пластичності Мізіса. Ця модель припускає монотонне зміцнення за об'ємної деформації і

розвиток зсувних деформацій. За її допомогою отримали лінію граничного навантаження в координатах «еквівалентне напруження Мізіса (q) — гідростатичний тиск (p)», криву границі плинності. Запропоновану модель опору деформації порошку титану при прокатуванні було покладено в основу загальної математичної моделі. Модель прокатування реалізована методом скінченних елементів [8]. Побудована модель процесу асиметричного прокатування порошку є каліброваною. З її допомогою можна визначати нормальне контактне напруження, дотичні напруження вздовж напрямку прокатування, зусилля і щільність прокату в процесі асиметричного прокатування.

Після першого проходу при прокатуванні порошку методом асиметричного прокатування можна досягти щільності прокату в межах 90–96%. У подальшому після спікання і ущільнювального прокатування щільність збільшується до 100%. Показано, що при ущільнювальному прокатуванні пористих смуг асиметрична схема забезпечує збільшення величин деформації на 15–20% порівняно з симетричним прокатуванням. При цьому відсутнє випередження матеріалу з боку прилеглого до валка великого діаметра, незалежно від співвідношення діаметрів валків і щільності прокатої смуги [7]. Отриманий прокат товщиною 0,5–1,5 мм за своїми службовими характеристиками не поступається прокату, виготовленому за традиційною технологією (прокатування зливка). Отже, ці результати свідчать про ефективність розробленої технології отримання прокату у вигляді листів і смуг з металевих порошоків порівняно з багаторазовим прокатуванням зливка.

Технологія виробництва литих деталей ґрунтообробної сільгосптехніки з високоміцного чавуну. Незважаючи на значні переваги, зумовлені унікальними ливарними властивостями, вироби з чавуну впродовж багатьох десятиліть програвали конкуренцію конструкціям зі сталі, оскільки значно поступалися за комплексом механічних властивостей через підвищену крихкість, пов'язану з великим вмістом вуглецю. Однак у другій половині

XX ст. ситуація змінилася завдяки створенню чавунів нового покоління. Значний внесок у цей процес зробили українські вчені К.І. Ващенко, Ю.М. Таран, М.В. Волощенко, В.Л. Найдек та ін. Розроблені сплави бейнітного високоміцного чавуну з кулястим графітом (ВЧКГ) за комплексом властивостей виявилися конкурентоспроможними щодо сталевих виробів у багатьох галузях промисловості, зокрема в конструкціях, які працюють на знос.

Прогресивні аграрні технології ставлять підвищені вимоги до сільськогосподарської техніки і особливо до змінних знарядь виробництва: плугів, лемешів, лап культиваторів тощо. Ці елементи конструкцій зазнають основних навантажень при обробленні ґрунтів.

При виробництві високоміцного чавуну особливу увагу приділяють стану виробництва модифікаторів. Модифікування сприяє утворенню найбільш сприятливої форми і рівномірному розподілу графіту. Найпоширенішою залишається технологія модифікування чавуну в ковшах, яка є досить простою, проте має істотні недоліки. Передусім це відносно низьке і нестабільне засвоєння модифікатора, особливо магнію, а також підвищене димовиділення і піроефект. Це стосується кускового модифікатора. Для збільшення і стабілізації освоєння модифікатора було прийнято рішення використати його в порошковому варіанті. Однак великою проблемою виявилось формування цього модифікатора, з огляду на те, що він є сумішшю порошкових матеріалів, компоненти яких мають різні характеристики пластичності. Всі компоненти модифікатора були розділені на дві групи: пластичні і крихкі. До першої групи належать алюміній, магній і залізо, до другої — силікокальцій, силікобарій, феросиліцій, рідкісноземельні метали і рефракон. При цьому використовувалися пластичні порошки промислових марок фракцією понад 150 мкм. Крихкі порошки отримували розмелом зливків. Подрібнення здійснювали в щоківій дробарці.

Проведено модельні експерименти на системах Fe—FeSi і Al—FeSi за різного вмісту крихкої складової. Пресування цих систем здійсню-

вали з різними зусиллями. При цьому було отримано циліндричні зразки, які піддавалися діаметральному стисненню. Модельні випробування підтвердили одне з основних положень теорії пресування і прокатування порошків про визначальну роль насипної щільності (форма частинок) для отримання якісних заготовок. При цьому було встановлено, що технологічно міцні зразки можна отримати в разі вмісту пластичної складової не менш як 35%, [9, 10]. С.М. Волощенко розробив модифікатор КМК-1, у якого вміст пластичних елементів становить 40,5%. Модифікатор виготовляють методом прокатування порошкової суміші.

Вибір хімічного складу чавуну визначався з одного боку впливом легуючих елементів на структуроутворення у бейнітному чавуні з кулястим графітом, а з іншого — формою і розмірами деталей, а також умовами їх навантаження. Для поліпшення прогартованості було використано Mo — 0,2—0,3%, Cu — 0,3—0,5%, Ni — 0,3—0,5%. Такий невеликий вміст легуючих елементів зумовлений малою товщиною виробів, яка не перевищує 15 мм. При зменшенні вмісту вуглецю до 3,2% погіршуються ливарні властивості чавуну, при вмісті вуглецю понад 3,6% зменшуються параметри міцності. Тому оптимальний вміст вуглецю було вибрано на рівні 3,2—3,5%.

Було визначено механічні характеристики і структурний стан бейнітних чавунів, при виготовленні яких використовували різні модифікатори, в тому числі й КМК-1. Встановлено, що оптимальні співвідношення міцності, пластичності та ударної в'язкості демонструє модифікатор КМК-1. Структура одержаного чавуну складається з перліто-феритної суміші і кулястого графіту, при цьому величина сфероїдизації графіту становить 90—93%, що значно вище, ніж при використанні відомих модифікаторів. При цьому слід зазначити, що в структурі вихідного чавуну не повинно бути первинної карбідної фази (відбілу).

Важливу роль у технології виробництва литих деталей ґрунтообробної сільгосптехніки з ВЧКГ з використанням порошкових модифікаторів відіграють режими термічної обробки,

які впливають на процес структуроутворення бейніту і залишкового аустеніту [11]. Тому було визначено оптимальну температуру аустенізації. Результати дослідів показали, що температура аустенізації $890 \pm 10^\circ\text{C}$ є оптимальною для ВЧКГ, оскільки за цієї температури перехід усього фериту в аустеніт завершено. Структура чавуну складається з аустеніту, слідів фериту і кулястого графіту. Фазовий склад $A = 98\%$, $\Phi_{\text{ст}} = 2\%$.

Далі було проведено ізотермічне гартування за 310 і 350°C [11, 12], після якого основу металевої матриці становить бейніт (до 75%), а також залишковий аустеніт і кулястий графіт. Результати механічних випробувань свідчать про те, що при підвищенні температури гартування твердість дещо знижується, а пластичність, ударна в'язкість та тріщиностійкість трохи зростають. Тому підвищення температури гартування сприяє підвищенню службових характеристик деталей, які працюють при ударних навантаженнях.

Для визначення оптимальної температури гартування було проведено модельні випробування на знос зразків, загартованих за температур 310 і 350°C , при питомих навантаженнях $0,8$ МПа, що відповідають навантаженню на лемеші при їх роботі. Проведені досліди показали, що зносостійкість зразків, загартованих за 350°C , значно вища. При цьому твердість поверхневого шару (2 мкм) становить 8 ГПа, що в $1,6$ рази більше, ніж твердість матриці. Було зроблено припущення, що це відбувається внаслідок TRIP (Transformation Induce Plasticity) ефекту — перетворення залишкового аустеніту на мартенсит в процесі деформації. Для підтвердження цього припущення було проведено досліди на одновісне стиснення зразків. Дослідження виявило більш високу швидкість зміцнення зразків, загартованих за температури 350°C . Відповідно до TRIP-теорії сталей перетворення залишкового аустеніту на мартенсит різко збільшує швидкість зміцнення і як наслідок підвищує службові характеристики. Це дає змогу вважати, що підвищення зносостійкості відбувається в результаті дії механізму TRIP-ефекту.



Рис. 6. Лемеші з різною конфігурацією ребер жорсткості



Рис. 7. Дослідна партія литих лап культиваторів для ПП «Агроекологія»

У сучасних екологічно чистих технологіях обробки ґрунту велику увагу приділяють культивативації. Для цього виду сільгоспробіт характерна значно менша глибина переробки ґрунту, яка потребує менших зусиль. Розрахункові дані свідчать про те, що на лапу культиватора діє питомий тиск $0,2$ МПа. У нашому випадку зразки піддавалися ізотермічному гартуванню за температур 300 , 320 , 350°C і випробувалися за питомих навантажень $0,2$ МПа. Зносостійкість ВЧКГ після різних режимів гартування в діапазоні температур 300 – 350°C при всіх досліджених витримках практично не відрізняється, що вказує на вплив базового механізму, який відповідає за підвищену зносостійкість. На перший план також виходять механізми шаржування твердими частинками та змащення поверхні тертя графітом.

У результаті проведених дослідів було розроблено технологію виробництва литих де-

талей для ґрунтообробної сільгосптехніки з ВЧКГ з використанням порошкових модифікаторів, отриманих прокатуванням. Також було розроблено нові конструкції лемешів (рис. 6) і лап культиваторів для вітчизняної і зарубіжної техніки.

На рис. 7 показано дослідно-промислову партію лап-плоскорізів, що самозагострюються, коли підрізають ґрунт на глибині 20–40 мм. Цю партію виготовлено для ПП «Агроєкологія». Польові випробування сільгоспзнарядь, виготовлених з ВЧКГ, пройшли в господарствах Київської, Черкаської, Одеської і Полтавської областей. Стійкість лемешів, виготов-

лених за розробленою технологією, збільшилася у 3–5 разів, а лап культиваторів у 5–7 разів порівняно з вітчизняними аналогами. Порівняно із зарубіжними аналогами стійкість була майже втричі вищою.

Нині лапи культиваторів і розпушувачі глибокого розпушування, виготовлені за розробленою технологією з ВЧКГ, використовуються у великих господарствах, таких як ПП «Агроєкологія» і агрохолдинг ASTARTA Шишацького району Полтавської області. Тривають заходи з впровадження ґрунтообробного інструменту з ВЧКГ в інші великі агрохолдинги України.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

- Gogaev K.A., Ulshin V.I. *Powder metallurgy of tool steels*. (Donetsk: Knowledge, 2012).
[Гогаєв К.А., Ульшин В.И. *Порошковая металлургия инструментальных сталей*. Донецк: Ноулидж, 2012].
- Ulshin V.I., Gogaev K.A., Ulshin S.V. Effect of high-speed cooling on structure formation and mechanical properties of tool materials. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2009. **48**(9): 547.
[Ульшин В.И., Гогаєв К.О., Ульшин С.В. Вплив високих швидкостей охолодження на структуроутворення і механічні властивості інструментальних матеріалів. *Порошковая металлургия*. 2009, № 9/10. С. 72–80].
- Ulshin V.I., Gogaev K.A., Ulshin S.V. Anisotropy of the mechanical properties of tool materials produced by jet forming. *Journal of Mechanical Engineering the NTUU KPI*. 2011. (62): 66.
[Ульшин В.И., Гогаєв К.О., Ульшин С.В. Анізотропія механічних властивостей інструментальних матеріалів, одержаних струменевим формуванням. *Вісн. НТУУ КІП, сер. Машинобудування*. 2011. № 62. С. 66–69].
- Gogaev K.A., Sydorchuk O.M., Radchenko O.K. High-speed steel with low tungsten content produced by jet forming. *Metal Science & Treatment of Metals*. 2015. (1): 24.
[Гогаєв К.О., Сидорчук О.М., Радченко О.К. Швидкорізальна сталь струменевого формування з низьким вмістом вольфраму. *Металознавство та обробка металів*. 2015, № 1. С. 24–29].
- Gogaev K.A., Kalutskii G.Ya., Voropaev V.S. Asymmetric rolling of metal powders. I. Powder compactibility under asymmetric rolling. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2009. **48**(3): 152.
[Гогаєв К.А., Калущкий Г.Я., Воропаєв В.С. Асиметрична прокатка металіческих порошків. I. Уплотняемость порошків при асиметричній прокатці. *Порошковая металлургия*. 2009. № 3/4. С. 36–42].
- Gogaev K.A., Kalutskii G.Ya., Voropaev V.S. Asymmetric rolling of metal powders. II. Angular parameters in asymmetric rolling. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2009. **48**(5): 474.
[Гогаєв К.А., Калущкий Г.Я., Воропаєв В.С. Асиметрична прокатка металіческих порошків. II. Угловые параметры при асиметричній прокатці. *Порошковая металлургия*. 2009. № 5/6. С. 35–42].
- Gogaev K.A., Kalutskii G.Ya., Voropaev V.S. Asymmetric rolling of metal powders. III. Advance in asymmetric rolling. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2009. **48**(7): 384.
[Гогаєв К.А., Калущкий Г.Я., Воропаєв В.С. Асиметрична прокатка металіческих порошків. III. Опережение при асиметричній прокатці. *Порошковая металлургия*. 2009. № 7/8. С. 18–22].
- Prikhodko I.Yu., Dedyk M.I., Gogaev K.A., Voropaev V.S., Itsenko A.I. Optimization of parameters of asymmetric rolling of titanium powder by the finite-element method. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2016. **55**(1): 12.
[Приходько І.Ю., Дедик М.И., Гогаєв К.А. и др. Оптимизация параметров процесса несиметричній прокатки порошка титана с использованием метода конечных элементов. *Порошковая металлургия*. 2016. № 1/2. С. 17–23].
- Gogaev K.A., Radchenko O.K. *Powder system forming process*. (Donetsk: Knowledge, 2011).
[Гогаєв К.А., Радченко А.К. *Формование порошковых систем*. Донецк: Ноулидж, 2011].

10. Gogaev K.A., Voloshchenko S.M., Podrezov Yu.N., Radchenko A.K., Radchenko L.A. Process approaches for producing complex composite inoculants by rolling of powder mixtures. I. Inoculant powder mixtures. composition, structure, and properties. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2016. 55(5): 270.
[Гогаєв К.А., Волощенко С.М., Подрезов Ю.Н. и др. Технологические принципы получения композиционных модификаторов методом прокатки порошковых смесей. I. Порошковые модифицирующие смеси. Состав, структура, свойства. *Порошковая металлургия.* 2016. № 5/6. С. 27–36].
11. Gogaev K.A., Voloshchenko S.M. Features of heat treatment for the attached implements of agricultural equipment. In: *The problems of service life and safety in exploitation of the constructions, buildings, and machines.* Target-oriented complex program of NAS of Ukraine. (Kyiv, 2012). P. 464.
[Гогаєв К.А., Волощенко С.М. Особенности термообработки деталей навесного оборудования для сельхозтехники. В кн.: *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин.* Цільова комплексна програма НАН України. Київ, 2012. С. 464–468].
12. Gogaev K.A., Voloshchenko S.M. Bainite cast-iron for wearing replaceable components of soil-cultivating equipment. *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.* 2015. (9): 64.
[Гогаєв К.О., Волощенко С.М. Бейнітний чавун для швидкозношуваних змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки. *Вісн. НАН України.* 2015. № 9. С. 64–68].

K.A. Gogaev

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science
of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

NEW APPROACHES IN THE POWDER METALLURGY TECHNOLOGY — A WAY TO UPGRADE THE QUALITY OF METAL PRODUCTS

According to the materials of scientific report at the meeting
of the Presidium of NAS of Ukraine, October 26, 2016

The advantages of powder metallurgy methods are demonstrated on the example of the technology developed. The application of the technology for manufacturing cutting tools from high-speed steel powders provides an essential increase in the tool life compared to the tools of similar types produced by traditional technology. Using the powder asymmetric rolling method results in improvement of the rolled products quality and decrease in energy consumption. The utilization of the powder modifiers in production of farm implements from high-duty cast iron results in considerable increase in their durability.

Keywords: powder high-speed steel, asymmetric rolling, strength, deformation, high-duty cast iron with globular graphite.