

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ МАГНІОСТРИКЦІЙНОГО ТА МАГНІТНО-ДИСПЕРСІЙНОГО ТВЕРДІННЯ ПРОБИВНИХ ПУАНСОНІВ ІЗ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ ПІСЛЯ ОБРОБКИ В ІМПУЛЬСНИХ МАГНІТНИХ ПОЛЯХ

Викладена робота присвячена дослідженню питань, пов'язаних з дослідженням механізмів магніострикційного і магнітно-дисперсійного тверднення робочої частини пробивних пуансонів з швидкорізальної сталі Р6М5 та Р6М5К5 на стійкість після магнітно-імпульсної обробки, що є поєднанням електромагнітного і термодинамічного способів управління нерівноважною структурою речовини. Швидкорізальна сталь, як будь-яке тверде тіло, володіє пружним внутрішнім полем, обумовленим реальною дислокаційною структурою. З накладенням магнітного поля на матеріал, на це власне пружне поле накладається пружне поле, викликане магніострикційною деформацією. В цілому результат магнітної обробки розглядається як прояв ефектів післядії в матеріалах, що знаходяться на кордонах стабільності їх властивостей і підданих дії зовнішнього силового поля. Відмічено, що в результаті дії імпульсного магнітного поля відбувається зміна фізико-механічних властивостей швидкорізальної сталі і інструментального матеріалу стає одноріднішим по структурі. Застосовуючи магнітну обробку можна значно зменшити надмірну енергію матеріалу, пов'язану з концентрацією внутрішніх і поверхневих напруг в інструменті, і знизити до мінімуму ймовірність його поломки. Магнітно-імпульсна обробка являє собою комплексний вплив на матеріал магніострикційних процесів і механічних деформацій, теплових і електромагнітних вихрових потоків, локалізованих в місцях концентрацій магнітного потоку. Показано, що в результаті магнітної обробки швидкоріжуча сталь зазнає об'ємне зміцнення, дисперсійне твердіння, стає більш однорідною за структурою і покращує свої фізико-механічні властивості. Імпульсне магнітне поле, взаємодіючи з матеріалом інструменту, змінює його теплові та електромагнітні властивості, покращує структуру та експлуатаційні характеристики, що покладено в основу технології магнітного зміцнення. Встановлено що першопричиною поліпшення експлуатаційних характеристик інструменту, підданого магнітній обробці, є зміна властивостей інструментального матеріалу. Це відбувається за рахунок магніострикційного зміцнення швидкорізальної сталі, що виражається в підвищенні її теплостійкості.

Ключові слова: пробивний пуансон, імпульсне магнітне поле, магніострикційного твердіння, стійкість, зміцнення, теплостійкість, швидкорізальна сталь.

Холодне штампування є одним з прогресивних методів отримання вузлів і деталей в різних галузях промисловості. Пробивний пуансон: виконує пробивку, просічення отворів в листовому матеріалі, відділяє частину матеріалу, утворюючи внутрішній замкнутий контур. При штампуванні пуансон надає безпосередній тиск на оброблюваний матеріал і піддаються дії високих силових навантажень.

Актуальність зносостійкості і довговічності металообробного інструменту зростає в сучасних умовах ринкової економіки, коли в машинобудуванні особливу роль покликана зіграти якість інструментів, що визначають багато в чому продуктивність і собівартість обробки в цілому. Проблема вдосконалення технологічних процесів механічної обробки деталей інструментом зі швидкорізальної сталі, що забезпечують високу продуктивність, мінімальну собівартість, високу точність, задану якість і експлуатаційні властивості деталей машин, є дуже актуальною.

Причини відмов інструментів найчастіше пов'язані не з їх поломкою, а з втратою ними своєї первинної поверхневої конфігурації унаслідок зносу, сколів, зминання, розтріскування, тобто у зв'язку з руйнуванням або деформацією тонких поверхневих шарів металу [1].

В даний час в теоретичних роботах і практиці машинобудування отримують розвиток питання, пов'язані з технологічним зміцненням поверхневих шарів інструменту і зміною їх властивостей в потрібному напрямі [2, 3].

Одним з основних напрямів фізичної технології є магнітна обробка матеріалів. Імпульсне магнітне поле, взаємодіючи з матеріалом деталі, змінює її теплові та електромагнітні властивості, покращує структуру і експлуатаційні характеристики, що покладено в основу технології магнітного зміцнення [2–7].

Взаємодія пружного поля, обумовленого магніострикцією сталі, з пружним полем її реальної дислокаційної структури призводить до появи локальних перенапруг. У цих місцях різко зростає ймовірність термофлуктуаційного розриву міжатомних напружених зв'язків.

У тих місцях, де ці локальні перенапруження перевищують межі пружності матеріалу, формуються осередки пластичної деформації. Саме тут можуть інтенсивно протікати процеси розмноження і переміщення дислокацій. Зі збільшенням щільності дислокацій, коли ліс дислокацій все більш ускладнює їх власний рух в інших площинах ковзання, сталь зазнає своєрідний наклеп, що в разі магнітної обробки виразилося в зміні параметра решітки мартенситу і зниженні температури зворотного мартенситного перетворення [4, 6].

Проте немає єдиного, усебічно підтвердженого погляду на причини, що викликають зміну експлуатаційних властивостей інструменту виготовленого зі швидкорізальних сталей, в результаті дії імпульсного магнітного поля.

Метою роботи є розгляд механізмів магніострикційного і магнітодисперсійного тверднення швидкорізальних сталей в імпульсних магнітних полях, ґрунтуючись на уявленні, що під дією магнітного поля інструментальний матеріал зазнає структурні зміни стану.

Швидкорізальна сталь, як будь-яке тверде тіло, має внутрішнє пружне поле, обумовлене реальною дислокаційною структурою. З накладенням магнітного поля на матеріал на це власне пружне поле накладається пружне поле, викликане магніострикційною деформацією.

Позитивний зворотний зв'язок в процесі взаємодії дислокацій з межпитомими атомами може виражатися в зародженні виділень надлишкових фаз всередині металевої матриці.

Стійкість таких фаз проти коагуляції і дислокаційний характер магніострикційного зміцнення швидкорізальної сталі розглядаються як фізична основа ефекту магнітної обробки.

В цілому результат магнітної обробки повинен розглядатися як прояв ефекту післядії в матеріалах, що знаходяться на кордонах стабільності їх властивостей і підданих впливу зовнішнього силового поля [7].

На основі рівнянь термодинаміки отримано вираз, що відображає додаткову напругу, що виникає в матеріалі в результаті магніострикції:

$$\Delta\sigma_m = \frac{\Delta W}{\lambda} = \frac{H \cdot \Delta B}{\lambda},$$

де ΔW – робота намагнічування одиниці об'єму магнетика;

λ – магніострикція (відносна зміна розміру зразка $\Delta l/l$);

H – напруженість магнітного поля;

ΔB – зміна величини магнітної індукції.

Сумарна напруженість в матеріалі $\sigma_{\text{сум}}$ складається з напруги, викликані внутрішнім пружним полем реальної дислокаційної структури σ_δ і напругою $\Delta\sigma_m$.

$$\sigma_{\text{сум}} = \sigma_\delta + \Delta\sigma_m$$

Знаючи межу пружності сталі, можна виділити інтервали значень напруженості магнітного поля. З розгляду фізичних аспектів проблеми магнітної обробки зроблено висновок про доцільність проводити обробку інструменту в імпульсних магнітних полях. За допомогою таких полів легко здійснити інтенсивний енергетичний вплив на матеріал за допомогою електромагнітних хвиль. До того ж вибір імпульсного поля дозволив спростити вимогу до джерел живлення і зробити портативними установки.

Параметром, який дозволяє управляти дислокаційною структурою сталі, є в цьому випадку питома потужність впливу магнітного поля:

$$n = \frac{\Delta W}{\Delta t},$$

де Δt – час впливу магнітного поля.

Підтвердженням показаної вище можливості перебудови дислокаційної структури служать результати рентгеноструктурного аналізу швидкорізальної сталі, що зазнала обробку імпульсним магнітним полем. Виявилось, що вплив імпульсного магнітного поля призвів до зменшення міжатомної відстані.

З метою вивчення впливу магнітної обробки на структуру сталі були проведені спеціальні дослідження на зразки зі швидкорізальної сталі Р6М5К5.

Підготовка поверхні зразків проводилася в наступній послідовності: шліфування, полірування і травлення.

Шорсткість поверхні зразків після полірування відповідала $Ra = 0,05 \dots 0,025$ мм. Травлення зразків проводилося в 4 % розчині азотної кислоти, в етиловому спирті протягом 30-40 сек. Після травлення зразки промивалися в гарячій воді і етиловому спирті.

Підготовлений таким чином шліф вміщувався на предметний столик мікроскопа.

Фотографії вихідної мікроструктури і магнітнооброблених зразків з швидкорізальної сталі наведені на рис. 1.

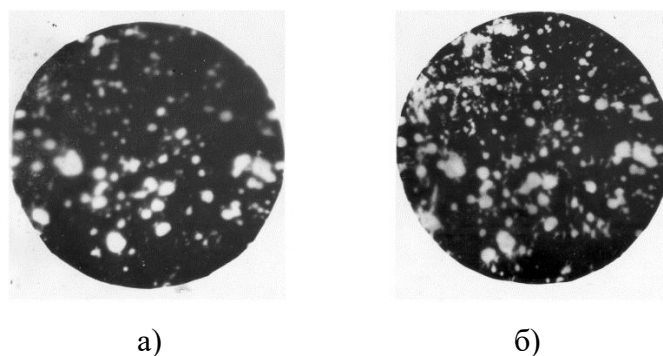


Рис. 1. Структура швидкорізальної сталі Р6М5К5:
а – вихідна структура; б – після магнітної обробки

Мікрофотографії свідчать про те, що процес магнітострикційної деформації швидкорізальної сталі супроводжується подрібненням карбідів, що виділилися з основної фази.

Це пояснюється тим, що під дією локальних напружень може відбуватися сегрегація домішкових атомів і, перш за все, атомів вуглецю на межах зерен і дислокаціях. Це призводить до зародження дискретних частинок фази карбіду, тобто виявляється своєрідна картина твердіння.

З положення о магнітострикційному зміцненні і магнітнодисперсійному твердінні швидкорізальної сталі випливає, що в результаті впливу на інструмент імпульсними магнітними полями відбуваються зміни структури матеріалу. Така зміна мікроструктури і призводить до поліпшення фізико-механічних властивостей інструментального матеріалу.

Аналіз основних положень про магнітострикційне зміцнення і магнітнодисперсійне твердіння дозволяє зробити висновок про те, що в результаті магнітної обробки швидкорізальна сталь зазнає об'ємне зміцнення, дисперсійне твердіння, стає більш однорідною за структурою і покращує свої фізико-механічні властивості [8, 9].

При виготовленні реальних інструментів у матеріалі нерівномірно концентрується деяка кількість надлишкової енергії, зі збільшенням якої зростає ймовірність руйнування інструменту.

Застосовуючи магнітну обробку можна значно зменшити надмірну енергію матеріалу, пов'язану з концентрацією внутрішніх і поверхневих напружень в інструменті, і знизити до мінімуму ймовірність його поломки [9].

Для кожного матеріалу існує оптимальне значення зовнішнього імпульсного магнітного поля, при якому концентрація напружень у матеріалі, а, отже, і надмірна енергія гранично зменшується, внаслідок чого підвищується надійність інструменту [10, 11].

Для кожної сталі існує певна величина напруженості імпульсного магнітного поля, а, отже, і величина магнітної енергії, яка поглинається матеріалом протягом часу обробки і максимально покращує його механічні та технологічні властивості. Причому між підвищенням

стійкості інструменту та магнітною проникністю існує кореляційна залежність. Імпульсне магнітне поле, взаємодіючи з матеріалом інструменту, змінює його теплові та електромагнітні властивості, покращує структуру та експлуатаційні характеристики, що покладено в основу технології магнітного зміцнення [12, 13].

Першопричиною поліпшення експлуатаційних характеристик інструменту, підданого магнітній обробці, є зміна властивостей інструментального матеріалу. Це відбувається за рахунок магніострикційного зміцнення швидкорізальної сталі, що виражається в підвищенні її теплостійкості.

Після обробки імпульсним магнітним полем в інструментальному матеріалі відбуваються зміни, як в кристалічній решітці матриці, так і в карбідній фазі. Атермічне мартенситне перетворення виникає в результаті збільшення амплітуди коливань кристалічної решітки аустеніту, які прагнуть перетворити її в решітку мартенсіту. Під впливом імпульсного магнітного поля збудження викликане зміною напряму спинових моментів електронів, у тому числі в ядрах дислокацій, що супроводжується появою пружної напруги магніострикційної природи і активізацією дислокаційних процесів.

Магніострикційне зміцнення швидкорізальної сталі, що викликає поліпшення фізико-механічних властивостей матеріалу, тісно пов'язане з напруженістю накладеного на інструментальний матеріал магнітного поля.

При магнітній обробці деталі унаслідок неоднорідної кристалічної структури в ній виникають вихрові струми. Вихрові струми обумовлюють магнітне поле і локальні мікрОВихори, які у свою чергу, нагрівають ділянки довкола кристалітів напружених блоків і неоднорідностей структури металу. У місцях концентрації залишкової або втомної напруги, пов'язаної з технологією виробництва, обробки або експлуатації інструмента, теплота наведена при магнітно імпульсній обробці вихровими струмами, частково зменшує надлишкову енергію складових кристалітів і зерен структури зразка особливо в зоні контакту напружених ділянок.

Збільшення кількості карбідів і зменшення їх здібності до коагуляції при зростанні температури при штампуванні повинні виразитися в підвищенні теплостійкості швидкорізальної сталі. В той же час магнітна обробка повинна привести до збільшення холодної твердості швидкорізальної сталі, а більш рівномірна структура матеріалу повинна зменшити розкид значень твердості в об'ємі одного і того ж інструменту. Відносно слабкі магнітні поля не призводять до зміни значень твердості та теплостійкості.

Встановлено, що найбільше підвищення стійкості магнітнообробленого інструменту та найбільше підвищення значень твердості та теплостійкості отримані при тих самих значеннях робочого поля ($H_0 = 1,2 \cdot 10^5$ А/м). Максимальне підвищення твердості та теплостійкості швидкорізальної сталі при напруженості поля $H_0 = 1,2 \cdot 10^5$ А/м відбувається за рахунок магніострикційного субструктурного зміцнення.

На рис. 2 представлені експериментальні дані зміни твердості та теплостійкості сталі Р6М5К5 у вихідному стані після термообробки, через 6 годин і через 24 години після магнітної обробки.

Випробування сталі Р6М5К5 на теплостійкість (рис. 2) показали, що вона підвищується в порівнянні з вихідним станом тільки після обробки в полях напруженістю вище $1,35 \cdot 10^5$ А/м, і досягає найбільших значень, як і твердість при найвищому значенні напруженості поля, що створюється установкою.

Важливим елементом режиму магнітної обробки є час витримки інструменту після магнітної обробки.

Динаміка старіння зразків зі швидкорізальної сталі вивчалася на сталях Р6М5 і Р6М5К5 після магнітної обробки проведеної при наступних режимах: частота проходження імпульсів магнітного поля $f = 5,0$ Гц та часу магнітної обробки $\tau = 60$ с. Закінченням часу старіння вважалася такий час, після закінчення якого припинялася зміна твердості зразків.

Дослідження показали, що в сталі Р6М5К5 через 6 годин після магнітної обробки значення твердості в діапазоні полів $1,5 \cdot 10^4 - 1,2 \cdot 10^5$ А/м зменшуються, досягаючи мінімуму при $H = 1,2 \cdot 10^5$ А/м. При подальшому збільшенні напруженості поля значення твердості зростають і, починаючи з робочих полів напруженістю більше $1,35 \cdot 10^5$ А/м, стають вищими за вихідні.

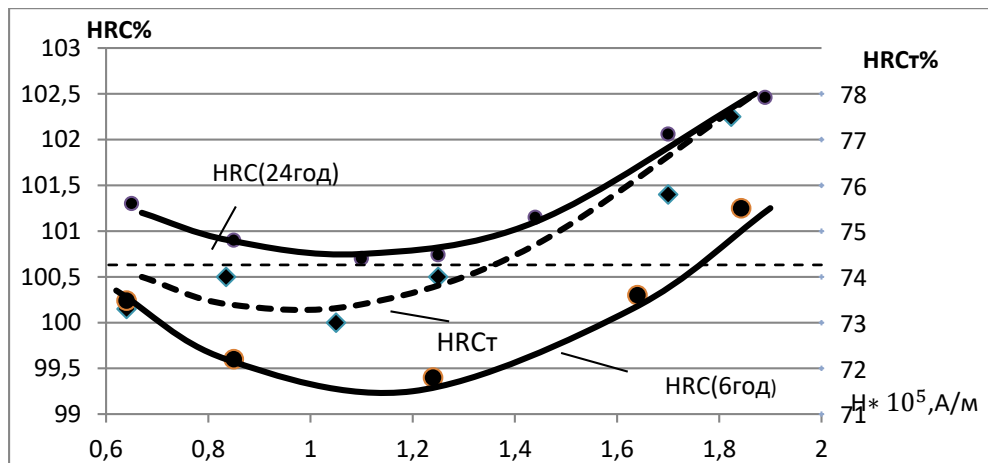


Рис. 2. Залежність зміни твердості та теплостійкості сталі Р6М5К5 від напруженості поля та часу старіння

Потім протягом 24 годин продовжується зростання твердості всіх зразків і після витримки вони мають твердість на 0,75 – 2,25% вище вихідної з максимальною твердістю, отриманої після використання полів максимальної напруженості для експериментальної установки ОІМП-РК1.

Релаксаційний процес в умовах прискореної дифузії протікає в інструментальному матеріалі після дії поля при кімнатній температурі і переводить систему дефектів структури в квазірівноважний стан, який характеризується новим розподілом дефектних комплексів і зниженим рівнем внутрішньої напруги.

Дані про вплив часу старіння зразків після магнітної обробки наведені на рис. 3. Ці дані показують, що зростання твердості зразків зі сталі марки Р6М5 починається після 6-ти годин після обробки і через 24 години після цієї операції досягає максимальних значень.

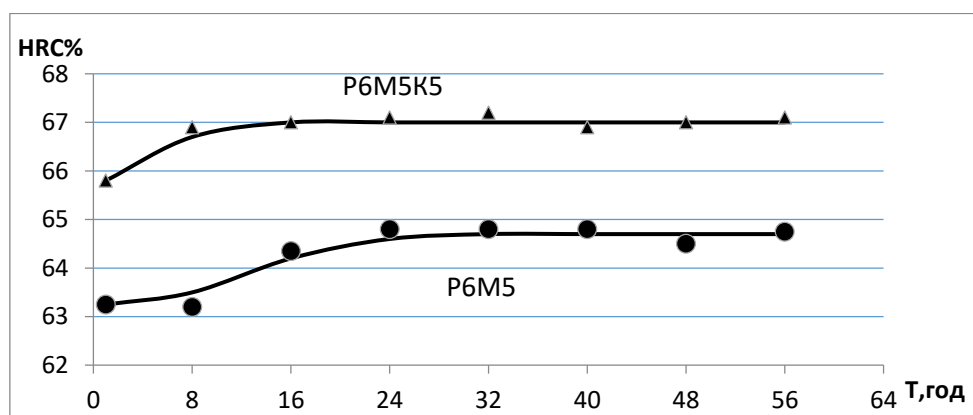


Рис. 3. Залежність твердості швидкорізальної сталі від часу старіння після магнітної обробки

С теоретичної і практичної точок зору найбільший інтерес для поліпшення фізико-механічних властивостей інструменту представляє гаряча твердість швидкорізальної сталі, тобто твердість при температурах, що виникають в процесі штампування.

Ефективність працездатності пробивних пуансонів може бути підвищена в результаті використання технології магнітної обробки інструменту. Інструменти, оброблені імпульсним магнітним полем, мають підвищену поверхневу твердість і теплостійкість, поліпшені експлуатаційні характеристики і властивості швидкорізальної сталі за рахунок тих структурних змін, які відбуваються в ній під дією магнітного поля.

Проведене дослідження механізмів магніострикційного і магнітно-дисперсійного тверднення швидкорізальних сталей пробивних пуансонів, після обробки в імпульсних магнітних полях, дозволяє зробити наступні висновки:

- застосовуючи магнітну обробку можна значно зменшити надмірну енергію матеріалу, пов'язану з концентрацією внутрішніх і поверхневих напруг в інструменті, і знизити до мінімуму ймовірність його поломки;
- магнітно-імпульсна обробка являє собою комплексний вплив на матеріал магніострикційних процесів і механічних деформацій, теплових і електромагнітних вихрових потоків, локалізованих в місцях концентрацій магнітного потоку;
- в результаті дії імпульсного магнітного поля відбувається зміна фізико-механічних властивостей швидкорізальних сталей, зростає холодна і гаряча твердість і інструментальний матеріал стає одноріднішим по структурі;
- після обробки імпульсним магнітним полем в інструментальному матеріалі відбуваються зміни, як в кристалічній решітці матриці, так і в карбідній фазі;
- в результаті магнітної обробки швидкоріжуча сталь зазнає об'ємне зміцнення, дисперсійне твердіння, стає більш однорідною за структурою і покращує свої фізико-механічні властивості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алієва Л.І., Таган Л.В. Ресурсозберігаючі процеси холодного видавлювання: посібник для студентів спеціальностей 131–136. Краматорськ: ДДМА. 2020. 180 с. ISBN 978-966-379-927-8.
2. Преображенский А. А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. Москва: Высшая школа. 1972. 460 с.
3. Винтер Э. К. Магнитный резонанс в металлах. Москва: Мир. 1976. 486 с.
4. Мальгин Б. В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. Москва: Машиностроение. 1989. 112 с.
5. Овчаренко А. Г., Козлюк А. Ю. Эффективная магнитно-импульсная обработка режущего инструмента. *Обработка металлов*. 2009. № 1. С. 4–7.
6. Володин В. Л., Зуев Л. Б., Володин Т. В., Гайдук В. В. Исследование влияния магнитно-импульсных поверхностных воздействий на эксплуатационные характеристики инструментальных сталей и инструмента. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. Москва: 2009. № 6. С. 61–65.
7. Берштейн М. Л., Пустовойт В. Н. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. Москва: Машиностроение. 1987. 256 с.
8. Кинденко Н. И. Анализ гипотез о причинах, вызывающих повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали в результате воздействия магнитного поля. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. Краматорськ: ДДМА. 2019. № 2 (46). С. 83–88.
9. Кинденко М. І. Аналіз методів магнітної обробки обсічених матриць для холодної і об'ємної штамповки болтів і гайок. *Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське. ДДТУ. 2020. – Том 1. № 36. С. 58–62.
10. Алифанов А. В., Малеронок В. В., Богданович И. А., Лях А. А., Милюкова А. М., Толкачева О. А. Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на температуру и структурные преобразования в поверхностных слоях образцов из быстрорежущей стали. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. Новополоцк: 2021. (3). С. 11–14.
11. Алифанов А. В., Ционенко Д.А., Милюкова А.М., Ционенко Н.М. Магнитоострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии. *Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук*. 2016. № 4. С. 31–36.
12. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Харьков: МОСТ-Торнадо. 2003. 288 с.
13. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитноимпульсной обработки тонкостенных металлов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2004. № 2. С. 80–84.

REFERENCES

1. Aliieva L.I., Tahan L.V. Resource-saving processes of cold treatment: a guide for students. Kramatorsk: DSEA. 2020. 180 p. ISBN 978-966-379-927-8. (in Ukrainian).
2. Preobrazhensky A. A. Theory of magnetism, magnetic materials and elements. Moscow: Higher school. 1972. 460 p. (in Russian).
3. Winter E. K. Magnetic resonance in metals. Moscow: Mir. 1976. 486 p. (in Russian).
4. Malygin B. V. Magnetic hardening of the tool and machine parts. Moscow: Mechanical engineering. 1989. 112 p. (in Russian).

5. Ovcharenko A.G., Kozlyuk A.Y. Effective magnetic-pulse processing of cutting tools. Metal processing. 2009. № 1. pp. 4–7. (*in Russian*).
6. Volodin V. L., Zuev L. B., Volodin T. V., Gaiduk V. V. Investigation of the influence of magnetic-pulse surface impacts on the performance characteristics of tool steels and tools. *Izvestia of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*. Moscow: 2009. № 6. pp. 61–65. (*in Russian*).
7. Bershtein M. L., Pustovoi V. N. Heat treatment of steel products in a magnetic field. Moscow: Mechanical engineering. 1987. 256 p. (*in Russian*).
8. Kindenko N. I. Analysis of Hypotheses on the Causes of Increasing the Tool Life of High-Speed Steel as a Result of the Influence of a Magnetic Field. *Visnik Donbass State Engineering Academy*. Kramatorsk: DSEA. 2019. № 2 (46). pp. 83–88. (*in Russian*).
9. Kindenko M.I. Analysis of methods of magnetic processing of trimming matrices for cold and volume stamping of bolts and nuts. Collection of scientific papers of Dnepropetrovsk State Technical University (technical sciences). Kamianske. DGTU. 2020. – Volume 1. № 36. pp. 58–62. (*in Ukrainian*).
10. Alifanov A.V., Maleronok V.V., Bogdanovich I.A., Lyakh A.A., Milyukova A.M., Tolkacheva O.A. transformations in the surface layers of samples from high-speed steel. *Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science*. Novopolotsk: 2021. (3). pp. 11–14. (*in Russian*).
11. Alifanov A.V., Tsionenko D.A., Milyukova A.M., Tsionenko N.M. Magnetostrictive mechanism of finely dispersed structure formation in steel products under magnetic-pulse exposure. *News of the National Academy of Sciences of Belarus. Ser. fiz.-mat. navuk*. 2016. № 4. pp. 31–36. (*in Russian*).
12. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I., Khimenko L.T. Pulsed Magnetic Fields for Progressive Technologies. Kharkiv: MOST-Tornado. 2003. 288 p. (*in Russian*).
13. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Khimenko L.T. Physical Foundations of Possible Directions for the Development of Magnetic-Pulse Processing of Thin-Walled Metals. *Electrotechnics and Electrical Mechanics*. 2004. № 2. pp. 80–84. (*in Russian*).

Kindenko M. Study of the mechanism of magnetostrictive and magnetodispersive hardening of punches made of high-speed steel after processing in pulsed magnetic fields.

The presented work is devoted to the study of issues related to the study of the mechanisms of magnetostriction and magnetic dispersion hardening of the working part of punches made of high-speed steel P6M5 and P6M5K5 for stability after magnetic pulse processing, which is a combination of electromagnetic and thermodynamic methods of controlling the non-equilibrium structure substances. High-speed steel, like any solid body, has an elastic internal field due to the real dislocation structure. When a magnetic field is applied to a material, an elastic field caused by magnetostrictive deformation is superimposed on this own elastic field. In general, the result of magnetic processing is considered as a manifestation of aftereffects in materials that are at the boundaries of the stability of their properties and are exposed to the action of an external force field. It was noted that as a result of the pulsed magnetic field, the physical and mechanical properties of high-speed steel change and the tool material becomes more uniform in structure. Applying magnetic processing, it is possible to significantly reduce the excessive energy of the material associated with the concentration of internal and surface stresses in the tool, and reduce the probability of its breakage to a minimum. Magnetic pulse processing is a complex effect on the material of magnetostrictive processes and mechanical deformations, thermal and electromagnetic eddy currents localized in places of magnetic flux concentrations. It is shown that as a result of magnetic treatment, high-speed steel undergoes volume strengthening, dispersion hardening, becomes more homogeneous in structure and improves its physical and mechanical properties. The pulsed magnetic field, interacting with the material of the tool, changes its thermal and electromagnetic properties, improves the structure and operational characteristics, which is the basis of the magnetic strengthening technology. It was established that the root cause of the improvement of the operational characteristics of the tool subjected to magnetic treatment is the change in the properties of the tool material. This happens due to the magnetostrictive strengthening of high-speed steel, which is expressed in an increase in its heat resistance.

Key words: *piercing punch, pulsed magnetic field, magnetostrictive hardening, stability, hardening, heat resistance, high-speed steel.*

Кінденко Микола Іванович – канд. техн. наук, доц. ДДМА

Kindenko Mykola – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor DSEA

E-mail: mykolay.kindenko@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8532-4623>

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.

Стаття надійшла до редакції 12.07.24 р.