

УДК 621:787.785.9.902

ВОДНЕВОДИФУЗІЙНА МЕХАНІЧНА ОБРОБКА КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Я. М. ГЛАДКИЙ, С. С. БИСЬ, В. В. МИЛЬКО

Хмельницький національний університет

Розглянуто новий підхід для підвищення зносотривкості різального інструмента та поліпшення оброблюваності конструкційних матеріалів, який базується на використанні ефектів фізико-механічного та фізико-хімічного впливу водню на зону різання. Запропоновано гіпотезу водневодифузійної механічної обробки та концепцію інструмента-акумулятора водню. Розглянуто різні джерела газоподібного водню. Досліджено різання за присутності водню та проаналізовано отримані результати.

Ключові слова: водневе зношування, конструкційні матеріали, механохімічне зношування, стружкоутворення, акумулятори водню.

Вступ. Застосування важкооброблюваних конструкційних матеріалів (високоміцні, жаротривкі і жароміцні сталі та сплави) пов'язано з проблемою стружководидалення (стружколамавання). Це призводить до передчасного виходу з ладу інструмента і зниження продуктивності. Удосконалення способів підвищення зносотривкості різального інструмента, оброблюваності конструкційних матеріалів і продуктивності різання є актуальним завданням, яке стоїть перед дослідниками і виробниками.

Попереднє насичення заготовок або інструмента електролітичним воднем у певних умовах полегшило стружкоутворення і підвищило зносотривкість, але неконтрольованість глибини проникнення водню під час насичення, необхідність особливо потужного устаткування для великих заготовок і коротка “тривалість життя” електролітичного водню не дає змоги цей спосіб широко застосовувати. Спроба подачі водню в зону різання з балонів і спеціальної установки мала хороші результати: істотно змінювалися температурно-силові режими різання, тривкість інструмента і характер стружкоутворення [1]. Але така технологія має низьку істотних недоліків – використання балонів зі зрідженим воднем в умовах виробництва практично недопустиме відповідно до техніки безпеки, а також з економічної точки зору.

Проаналізувавши існуючі способи подачі водню в зону різання і оцінивши їх позитивні і негативні сторони, запропонували використовувати як джерела атомарного водню т.зв. інструмент-акумулятор – інструмент з воденьвмісним покритвом, здатним акумулювати за підвищених температур водень і можливістю швидкої підзарядки [2]. Теоретично пояснено інтенсифікацію механічної обробки та інтерпретовано отримані результати експериментальних досліджень [3].

Вплив водню на механічні властивості металів – один з найсильніших порівняно з іншими газами [4]. Унікальна рухливість водню – вільне переміщення у кристалічній ґратці металу його ядра, позбавленого електрона, тобто протона. За працею [5] коефіцієнт дифузії водню в залізі може змінюватися від $1,5 \times 10^{-5}$ до $6,3 \times 10^{-4}$ cm^2/s залежно від підвищення температури з 20 до 900°C відповідно.

В основу гіпотези підвищення оброблюваності матеріалів різанням і зносотривкості інструмента покладений принцип зміни механізму руйнування матеріалів у зоні процесу.

Стружкоутворення з позиції механіки руйнування можна розглядати як процес, пов'язаний з утворенням мікротріщин у площинах найбільших дотичних напружень і їх злиття в магістральну (макротріщину) [3]. При цьому руйнування (стружкоутворення) може мати транскристалітний або інтеркристалітний характер. Створюючи в матеріалі особливі умови або змінюючи напружено-деформований стан у зоні різання, можна досягти стану, коли відбувається перехід від енергоємного (внутрішньозеренного) до міжзеренного – низькоенергоємного руйнування. І таку роль у міжзеренному руйнуванні відіграє водень, який сприяє окрихченню матеріалу в зоні різання. Для підвищення зносотривкості інструмента та оброблюваності матеріалів пропонуємо подавати водень безпосередньо в цю зону.

Здатність гідридів металів та інтерметалідів виконувати різні функції, пов'язані з акумулюванням водню, обумовлює їх перспективність. Застосування хімічно пов'язаного в гідридах водню за умови високої сорбційної ємності гідридів з точки зору економічності і безпеки має перевагу перед розглянутими традиційними способами.

Найбільший інтерес викликають гідриди BeH_2 , MgH_2 , ScH_2 , $\text{TiH}_{n(n = 1,63 \dots 2,00)}$, $\text{ZrH}_{n(n = 1,54 \dots 2,00)}$. Однак невеликий відсоток водню в цих з'єднаннях обмежує їх використання.

Інтерметалідні з'єднання металів з воднем здатні накопичувати великі кількості водню порівняно зі звичайними металами. Серед основних інтерметалідів, які заслуговують на увагу, можна виділити такі: $\text{Mg}_2\text{Ni-H}$, TiFe-H , суміші $(\text{Mg}_2\text{Ni} + \text{Mg})\text{-H}_2$; $(\text{Mg}_2\text{Cu} + \text{Mg})\text{-H}$; $\text{LaMg}_{12}\text{-H}$.

Воднева ємність зазначених вище з'єднань ще недостатньо висока (до 6%). Для її підвищення і запобігання диспергування інтерметалідних сполук додають дрібнодисперсні порошки для сорбції водню, які не руйнуються за тривалої експлуатації і мають поліпшені технічні характеристики порівняно з чистими інтерметалідними сполуками. До таких видів матеріалів належать: каркасні – робоча речовина і наповнювач утворюють жорсткий каркас, компоненти матеріалу не повинні взаємодіяти (псевдосплави $\text{Ti}_2\text{Ni-H}$, $(\text{Ti-Mg} + \text{додаток})\text{-H}$); шаруваті – метали або інтерметаліди з нанесеним покритвом з нетривких окислів, які прискорюють сорбцію та десорбцію водню (застосовують покриття нікелю, міді, рідше заліза, які можна наносити напиленням у вакуумі, електролізом, точковим зварюванням та іншими доступними методами) суміші кількох інтерметалідів, де кожен з компонентів є хорошим акумулятором. Основною умовою є відсутність їх взаємодії під час експлуатації. Найперспективнішими є суміші $(\text{TiFe} + \text{LaNi}_5)\text{-H}$ та $(\text{Ti}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{Cr}_{0,8}\text{Mn}_{1,2})\text{H}$.

Для синтезу гідридів використовують апаратуру низького тиску [6]. Розроблені кілька спеціальних технологій отримання гідриду титану як покриття на ріжучому інструменті. На поверхні створюється т.зв. “бар’єрний шар” для захисту від проникнення водню [7] і покриття титану формується методом конденсації з йонним бомбардуванням і подальшим гідруванням (рис. 1а). Джерелом водню служить покриття на поверхні інструмента, який акумулює водень. Однак така технологія не забезпечує його достатній запас для тривалої роботи різального інструмента.

Тому запропоновано використовувати як джерело водню спеціальний інструмент-акумулятор, який складається зі звичайного інструмента і акумулятора водню (рис. 1б), який притискається до поверхні інструмента спеціальним захисним кожухом-захватом. Тривалість роботоздатності такого пристрою – 80...100 min.

Методика досліджень. Випробовували на роботоздатність інструментів-акумуляторів за поздовжнього точіння конструкційних матеріалів на токарному вер-

статі мод. 1К62 з безступінчатим регулюванням частоти обертання. Визначали вплив водню на силові характеристики різання (складові сили P_z, P_x, P_y), температуру різання (визначеною термопарою термоелектрорушійну силу Ω (ТЕРС)), оптимальну швидкість різання V_0 , ступінь пластичної деформації оброблюваного матеріалу K_L , зносотривкість. Для фіксування силових характеристик різання застосовували універсальний вимірювальний комплекс УДМ-600. Вимірювали ТЕРС у зоні різання за допомогою натуральної термопари. Ступінь пластичної деформації оброблюваного матеріалу K_L визначали за ДСТУ. Вимірювали ступінь зношування за допомогою оптичного мікроскопа БМИ-1. Твердість поверхні визначали мікротвердоміром ПМТ-3 відповідно до ДСТУ.

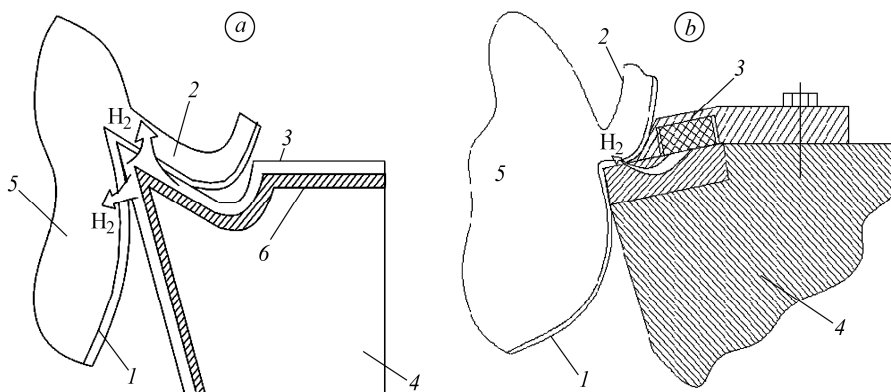


Рис. 1. Схема подавання водню в зону різання. *a* – воденьвмісний покрив; *b* – інструмент-акумулятор: 1 – наводнений шар; 2 – стружка; 3 – акумулятор водню; 4 – інструмент; 5 – оброблюваний матеріал; 6 – бар’єрний шар.

Fig. 1. Scheme of hydrogen supply in the cutting area. *a* – hydrogen-containing coating; *b* – tool battery: 1 – hydrogenated layer; 2 – chip; 3 – hydrogen battery; 4 – tool; 5 – treated material; 6 – barrier layer.

Досліджували матеріали: сталь Ст3, 40Х, 03Х18Н10Т, жароміцний сплав ХН35ВТЮ, які відрізняються як за хімічним складом, так і за структурою. Точили інструментом зі швидкорізальної сталі Р6М5 та твердого сплаву ВК6М. Під час точіння сталей інструментом Р6М5, який обмежений теплотривкістю (до 650°C), як джерела водню використовували акумулятори Mg_2NiH_2 , MgH_2 , TiH_x , $Ti_2Ni(H_x)$, які мають температурний інтервал початку дисоціації водню 200...300°C. Досліджуючи роботоздатність інструмента-акумулятора на базі твердого сплаву ВК6М як джерела водню, використовували акумулятори Ti_2NiH_x , $(Ti-Mg)-H$, $TiFe$ з температурним інтервалом початку дисоціації водню вище 300°C.

Результати досліджень та їх обговорення. Результати досліджень різання інструментом-акумулятором з Р6М5 свідчать, що у всіх випадках оброблення з подачею водню призводить до зниження зусиль різання, ступеня пластичної деформації оброблюваного матеріалу. Температура в зоні контакту пари в середовищі водню суттєво зменшується, внаслідок чого підвищується оптимальна швидкість різання V_0 (рис. 2). Відносні зміни деяких характеристик різання сталей інструментом-акумулятором з Р6М5 порівняно зі звичайним інструментом подані в табл. 1.

Зношування інструмента-акумулятора на основі швидкорізальної сталі Р6М5 під час точіння у середовищі водню в кілька разів менше порівняно зі зношуванням для звичайного інструмента в таких же умовах. Крім того, в межах оптимальної швидкості різання спостерігаємо полегшене видалення стружки внаслідок зміни механізму стружкоутворення – замість характерної для різання звичайним інструментом зливної стружки утворюється суглобиста, яка переходить в елементну.

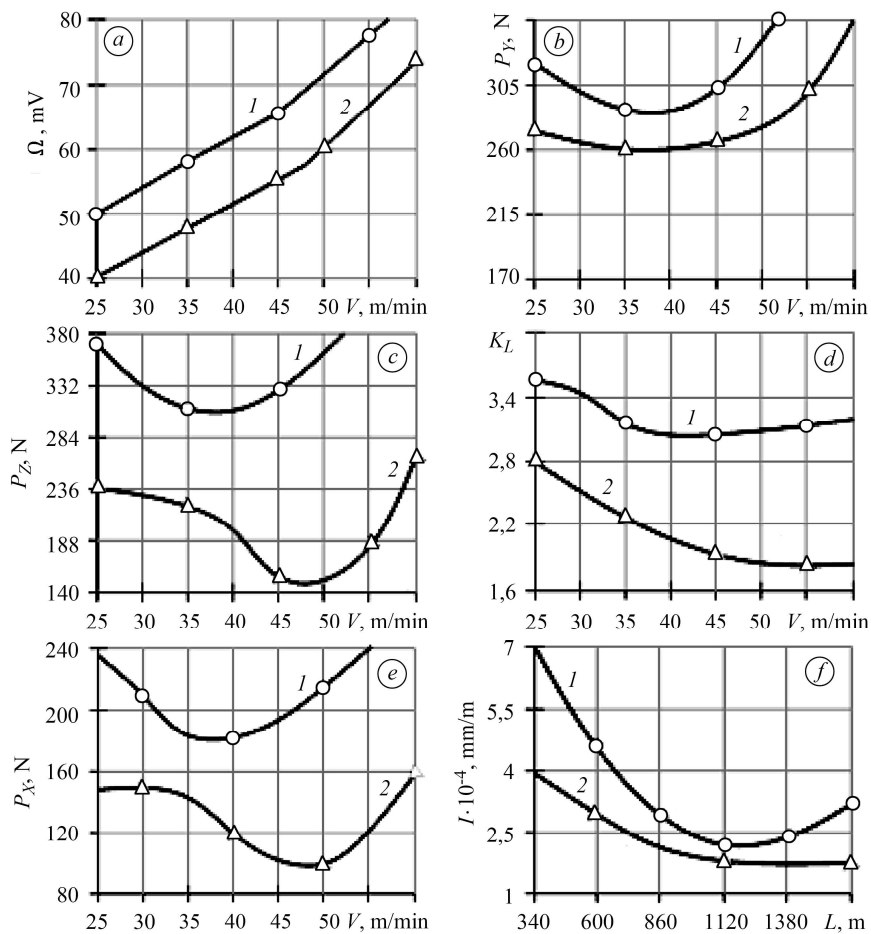


Рис. 2. Залежності параметрів різання жароміцного сплаву ХН35ВТЮ (ТЕРС (а); вектора зусилля (b, c, e); ступеня пластичної деформації (d); зносотривкості (f) від швидкості обертання (a–e) та довжини шляху (f)) стандартним інструментом (1) та інструментом-акумулятором з ВК6М (2).

Fig. 2. Dependences of the parameters of the process of cutting heat-resistant ХН35ВТЮ alloys (thermo-e.m.f (a); load vector (b, c, e); plastic deformation degree (d); wear resistance (f) on rotation speed (a–e) and path length (f)): using common tool (1) and tool-battery of ВК6М alloy (2).

Таблиця 1

Оброблюваний матеріал	Відносна зміна параметрів різання у воднево-повітряному середовищі				
	V_0	P_Z	P_X	P_Y	K_L
	%				
Р6М5					
Ст3	+34	-42	-33	-22	-22
40Х	+43	-63	-50	-45	-57
03Х18Н10Т	+34	-60	-150	-88	-60
ВК6М					
40Х	+27	-20	-	-	-
03Х18Н10Т	+33	-35	-32	-15	-50
ХН35ВТЮ	+36	-114	-100	-30	-63

Пояснити зміну механізму руйнування оброблюваного матеріалу можуть закономірності впливу напружень і деформацій на наводнення. Так, деформація ґратки металу підвищує її енергетичний рівень, істотно впливає на розвиток дислокаційно-вакансійних структур, що визначає наводнення сталі [8]. Слід розрізняти три випадки наводнення (за кожного інтенсивність збільшується): наводнення металу з недеформованою ґраткою, з деформованою ґраткою та під час деформації металу. Невеликі деформації, які супроводжуються порівняно незначними спотвореннями ґратки (матеріалу інструмента), мало впливають на дифузію водню і на схильність металу до водневої крихкості. Великі деформації (за зрізаного металу) викликають розриви кристалічної ґратки і утворення дефектів у вигляді мікропорожнин у суцільному матеріалі. Дослідження [9] підтверджують проникаючу здатність водню в область пластичних деформацій, результати яких свідчать, що збільшення деформацій на 1% підвищує проникність водню у сталі P_H на 100%.

Подані результати (табл. 1) відносних змін деяких параметрів різання в середовищі водню порівняно з обробкою на повітрі, з яких випливає, що існує зв'язок між ефектом, викликаним водневодифузійною обробкою, і властивостями конструкційних сталей.

Хімічний склад заготовок впливає на дифузію водню в сталі, його розчинність у її ґратці, поглинання водню колекторами. На дифузію кожного елемента впливає присутність інших елементів. Ймовірно, одні елементи змінюють кристалічну ґратку заліза, через яку проходять інші. Присутність у сталі Ni (сталь 03X18H10T) сприяє високій проникності водню. Так, наприклад, енергія активації дифузії водню в нікелеву сталь 35H3 з 3,25% Ni, за результатами [10], становить 75,6 kJ/mol, а в сталь 40X з 0,89% Cr – 186,1 kJ/mol.

Є ще одна закономірність. На невеликих швидкостях обробки суттєвого зниження зусиль різання не спостерігаємо. Це можна пояснити тим, що температура розігріву інструмента-акумулятора і швидкість деформації ще недостатня для початку посиленої дисоціації водню та істотного окрихчення матеріалу стружки.

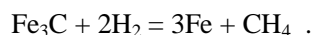
Для водневого зношування необхідний гідروفільний стан поверхневого шару (локальне підвищення концентрації водню в поверхневому шарі внаслідок дифузії, що більш ніж на порядок перевищує концентрацію поза ним). Одними з основних чинників, які впливають на цей стан, є структура металу і її зміна за тертя, а також його хімічний склад.

Зміни у поверхневому шарі металу під час тертя призводять до складних структурних перетворень і зростання дефектності, що впливає на поведінку водню в цій зоні. Дифузія водню з різних структурних елементів металу відбувається нерівномірно. Водень послаблює межі кристалів і знижує зчеплення на площинах спайності та може переміщатися головно в цих напрямках. Показано [11], що швидкість дифузії водню залежить від структури сталі – метал з різною структурою за однакових умов насичення поглинає різну кількість водню (табл. 2).

Оскільки розчинність водню в аустеніті більша, ніж в фериті, і суттєво більша, ніж у мартенситі, а швидкість дифузії водню в фериті вища, ніж в аустеніті, то можна припустити, що поглинання водню сталлю і оброблюваність залежить від структури, параметрів кристалічної ґратки і наявності в ній колекторів, де б міг накопичуватися молекулярний водень, який, створюючи великі тиски, сприяє окрихченню сталі. Тому, як видно з табл. 1, найбільше зростає оптимальна швидкість у сталях з феритної структурою і найменше – аустенітного класу (нержавна сталь).

Одним з найважливіших чинників, які впливають на тривкість сталі, є концентрація в ній вуглецю, оскільки в сплавах системи Fe–C з ростом концентрації вуглецю істотно знижується коефіцієнт дифузії D_H . Так, підвищення концентрації

вуглецю з 0,01 до 0,8% призводить до зменшення D_H в сталях з $4 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ м²/с [9]. Також вміст вуглецю впливає на водневу проникність сталей P_H . Приймаємо, що його зростання на кожні 0,1% знизить P_H на 4,1% [12]. Хімічна спорідненість водню до вуглецю може призводити до відновлення карбідних фаз сталей згідно з реакцією:



Таблиця 2

Структура	Кількість водню, поглиненого 100 g металу, см ³
Мартенсит	6
Троостит	15,9
Сорбіт	46,5
Перлітоферитна нормалізована	25,5

Цей процес відбувається зі зменшенням об'єму, що спричиняє додаткові напруження на межах зерен. Товщина шару, яка піддається зневуглецюванню й істотно змінює свої властивості, зменшується зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі [13].

Легувальні елементи, які утворюють хімічні сполуки (гідриди), впливають на здатність сталі поглинати водень [14]. Наприклад, гідридоутворювальні домішки молібдену, ванадію, хрому та інших елементів утримують атомарний водень у стані твердого розчину проникнення, уповільнюють його десорбцію з металу, і цим гальмують перехід водню в молекулярну форму і перешкоджають руйнуванню.

У швидкорізальній сталі Р6М5, яка складається з дрібнодисперсного мартенситу, легованого вольфрамом, молібденом, ванадієм і хромом, з підвищеним порівняно з конструкційними сталями вмістом вуглецю (до 1%) за період роботи до переточування (період тривкості) гідрофільного стану не виникає, тому катастрофічне водневе зношування не відбувається.

Під час роботи за форсованих режимів різання в зоні контакту інструмент–заготовка виникають високі температури, які призводять до посилення окиснювальних процесів на контактних поверхнях і перегріву (втрати теплотривкості) інструмента. Водень, будучи сильним відновником, потрапляючи в цю зону, насамперед реагує з киснем повітря і захищає інструмент від окисного зношування.

Під час різання металів у середовищі газоподібного водню в інструментальному матеріалі спостерігаємо явище воднево-фазового наклепу (ВФН). Зміцнення матеріалу за ВФН обумовлено двома фізичними причинами: внутрішньою деформацією – фазовим наклепом матеріалу за насичення воднем і розвитком гідридних перетворень за участю фаз, які мають різний питомий об'єм, та активною взаємодією оклюдованого водню і гідридних фаз, які формуються з дефектами кристалічної будови [15]. ВФН може піддаватися будь-який метал за дії на нього воденьвмісного середовища відповідних параметрів, наприклад, активного газоподібного водню, воденьвмісних газів, плазми, електролітичного водню тощо. У всіх випадках за ВФН істотно (на 2–4 порядки) збільшується щільність дефектів кристалічної структури, що супроводжується подрібненням блокової структури і збільшенням кутового розорієнтування. Ще одним підтвердженням цієї гіпотези є аналіз мікротвердості поверхні різального леза інструмента-акумулятора після роботи в середовищі газоподібного водню. Мікротвердість поверхні інструмента із Р6М5 зростає майже в два рази.

Під час різання твердосплавним інструментом відбувається його прискорене зношування в середовищі водню – за перших 10 min випробувань. У зв'язку з цим висунули гіпотезу про те, що атомарний водень проникає в дефекти типу пор і мікротріщин, а також в області між карбідами вольфраму і кобальту. Там водень моляризується і, створюючи високий тиск, руйнує інструмент.

Тому запропонували заліковувати всі дефекти в спеченому порошковому сплаві. Найстійкішим до водню хімічним елементом є хром і тут використали запатентований спосіб підвищення тріщиностійкості інструмента, розроблений в Хмельницькому національному університеті [2, 3, 7]. Шар хрому, названий “бар’єрним”, здатний підвищити в'язкість руйнування матеріалу і захистити його від проникнення водню. Як свідчать дослідження (рис. 2, табл. 1), така додаткова обробка, як і застосування змащувально-охолоджувальних рідин [16], полегшує стружкоутворення.

ВИСНОВКИ

Подані результати досліджень підтверджують підвищення оброблюваності конструкційних матеріалів у газоподібному водні, який проникає в зону різання під дією високих температур, великих контактних напруг та пластичної деформації, окрихчує зону передруйнування, полегшуючи стружкоутворення. В результаті такої взаємодії зменшуються складові сили різання, температура в зоні різання і, природно, знос інструмента. Як джерела водню запропоновано використовувати акумулятори водню на основі інтерметалідів і композиційних матеріалів промислового виготовлення, які забезпечують достатню його кількість для тривалого використання: Mg_2NiH_2 , MgH_2 , TiH_x , $Ti_2Ni(H_x)$ для швидкорізальних сталей та Ti_2NiH_x , $(Ti-Mg)-H$, $TiFe$ для твердих сплавів.

Встановлено зв'язок між структурою, хімічним складом, термообробкою інструментального матеріалу, а також навантажувально-температурним чинником з одного боку і опором руйнуванню під впливом водню з іншого.

РЕЗЮМЕ. Рассмотрен новый подход к повышению износостойкости режущего инструмента и улучшения обрабатываемости конструкционных материалов, который базируется на использовании эффектов физико-механического та физико-химического воздействия водорода на зону резания. Предложена гипотеза водорододиффузионной обработки и концепция инструмента-аккумулятора водорода. Рассмотрены разные источники газообразного водорода. Исследовано резания в присутствии водорода и проанализированы полученные результаты.

Ключевые слова: водородный износ, конструкционные материалы, механохимический износ, стружкообразование, аккумуляторы водорода.

SUMMARY. A new approach to solving the problem of increasing the wear resistance of the cutting tool and improving the workability of structural materials is considered, which is based on the use of the effects of physicomachanical and physicochemical influence of hydrogen on the cutting zone. The hypothesis of hydrodynamic mechanical treatment and the concept of the tool-accumulator of hydrogen are proposed. Different sources of gaseous hydrogen are considered. The process of cutting in the presence of hydrogen is investigated and the obtained results are analyzed.

Keywords: hydrogen wear, structural materials, physicomachanical wear, chips formation, hydrogen accumulator.

1. А.с. 1009715 А СССР, МКИ В 23 Q 11/10. Система подачи газа в зону резания / Э. А. Станчук, А. П. Шумилов (СССР). – № 3372853/25-08; Заявл. 23.12.81. – Опубл. 07.04.83; Бюл. № 13.
2. Патент 23912 А Украина, МКИ В23Н3/00, С23С16/00. Спосіб підвищення стійкості ріжучого інструменту та оброблюваності конструкційних матеріалів / Р. І. Сілін, Я. М. Гладкий, А. А. Бурлаков, В. О. Остаф'єв. – Опубл. 31.08.98.

3. *Гладкий Я. М.* Науково-прикладні основи підвищення зносостійкості інструментальних матеріалів шляхом використання прогресивних технологій: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04. – Хмельницький, 1998. – 300 с.
4. *Особливості руйнування наводнених високоазотних марганцевих сталей в умовах тертя кочення / О. І. Балицький, В. О. Колесніков, Я. Еліаш, М. Р. Гаврилюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2014. – **50**, № 4. – С. 110–116.
(*Specific features of the fracture of hydrogenated high-nitrogen manganese steels under conditions of rolling friction / O. I. Balyts'kyi, V. O. Kolesnikov, Y. Elias, M. R. Havrylyuk // Materials Science.* – 2015. – **50**, № 4. – P. 604–611.)
5. *Арчаков Ю. И.* Водородоустойчивость стали. – М.: Металлургия, 1978. – 150 с.
6. *Механические сплавы магния – новые материалы для водородной энергетики / Е. Ю. Иванов, И. Г. Констанчук, А. А. Степанов, В. В. Болдырев // ДАН СССР.* – 1986. – **286**, № 2. – С. 385–388.
7. *Патент 22093 А Україна, МКИ С23С16/00; С21D7/02.* Спосіб підвищення тріщиностійкості інструмента / Я. М. Гладкий, Р. І. Сілін, В. І. Семенюк. – Опубл. 30.04.98.
8. *Карпенко Г. В., Василенко И. И.* Коррозионное растрескивание сталей. – К.: Техника, 1971. – 212 с.
9. *Schwartz W., Zitter H.* Loslichkeit und Diffusion von Wasserschtoff in Eisenlegirungen // Arch. Eisen – hutten. – 1965. – **Bd. 36.** – S. 343.
10. *Гаркунов Д. И.* Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.
11. *Защита от водородного износа в узлах трения / А. А. Поляков, Д. Н. Гаркунов, Ю. С. Симаков, В. Я. Матюшенко / Под ред. А. А. Полякова.* – М.: Машиностроение, 1980. – 136 с.
12. *Андрейкив А. Е., Харин В. С.* Распределение диффундирующего водорода в окрестностях вершины трещины в деформируемом металле // Физ.-хим. механика материалов. – 1982. – № 3. – С. 113–115.
13. *Матюшенко В. Я.* Износостойкость наводороженных металлов // Исследование водородного износа. – М.: Наука, 1977. – С. 24–27.
14. *Денис Р. В., Березовець В. В., Завалій І. Ю.* Матеріали-сорбенти водню на основі магнію // Фундаментальні проблеми водневої енергетики / За ред. В. Д. Походенка, В. В. Скорохода, Ю. М. Солоніна. – К.: КІМ, 2010. – С. 245–265.
15. *Гольцов В. А.* Явление управляемого водородофазового наклепа металлов и сплавов // Свойства конструкционных материалов при воздействии рабочих сред. – К.: Наук. думка, 1980. – С. 151–165.
16. *Балицький О. І., Колесніков В. О., Гаврилюк М. Р.* Вплив змащувально-охолоджувальної рідини на формування продуктів різання сталі 38ХНЗМФА // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 5. – С. 103–107.
(*Balyts'kyi O. I., Kolesnikov V. O., Havrylyuk M. R.* Influence of lubricating liquid on the formation of the products of cutting of 38KhN3MFA steel // *Materials Science.* – 2019. – **54**, № 5. – P. 722–727.)

Одержано 28.08.2018