

Клімін В.В.,Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна**ВПЛИВ ОБ'ЄМНОЇ ГАРЯЧОЇ ПЛАСТИЧНОЇ
ДЕФОРМАЦІЇ НА ПРОЦЕСИ АЗОТУВАННЯ
ТА ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ 18ХГТ****Вступ**

Однією з актуальних задач сучасного машинобудування є збільшення терміну служби деталей машин і механізмів. Втрата працездатності вузлів машин і механізмів багато в чому визначається зносом деталей конструкції, тому підвищення їх зносостійкості являє собою важливу і нагальну технічну задачу.

Для цього широко застосовуються нові матеріали, а також різноманітні способи зміцнення та підвищення зносостійкості. Однак їх використання не завжди виправдано з економічних або технологічних міркувань. Так суттєвими недоліками хіміко-термічної обробки (ХТО) є необхідність досить високих температур і тривалих ізотермічних витримок для створення на поверхні виробу збагаченого шару відповідного елемента. В зв'язку з цим багато досліджень спрямовано на пошук нових способів інтенсифікації процесу масоперенесення в умовах хіміко-термічної обробки металів та сплавів.

Технологічні методи створення захисних структур триботехнічного призначення та відновлення працездатності сталевих деталей машин і механізмів, що сьогодні використовуються на ремонтних підприємствах України, обмежені рівнем розвитку галузей науки й техніки, технологій, які їх реалізують, ресурс відновлених ними деталей не завжди відповідає сучасним технічним вимогам. У той же час, спираючись на досягнення науки, можливості виробництва, а також передовий досвід розвитку технологій зміцнення як в Україні, так і за кордоном, існує можливість підвищення триботехнічних характеристик та довговічності деталей машин і механізмів шляхом застосування сучасних технологічних процесів. Експериментальні дослідження підтверджують, що широкі можливості підвищення механічних властивостей металу криються в будові його структури.

Дослідження проблеми підвищення фізико-механічних властивостей металу, зокрема спротиву зношуванню в різноманітних умовах тертя робочих поверхонь, дозволяє зробити висновок про те, що окремо взяті відомі механічні властивості ще не дають підстави відносити будь-яку сталь до розряду зносостійких. Зносостійкість, як характеристика триботехнічних властивостей, стоїть відокремлено по відношенню до її інших механічних властивостей. Для підвищення зносостійкості сталі необхідно домогтися підвищення усього комплексу характеристик її механічних властивостей (Сорокин Г.М., К вопросу повышения износостойкости сталей – Трение и износ, 1992, том 13, № 3, стор. 443-450).

Перспективним для створення зносостійких поверхневих шарів можна вважати метод об'ємної гарячої пластичної деформації з наступною хіміко-термічною обробкою (азотуванням). Однак, його широкому впровадженню у практику підприємств заважають ряд причин, зокрема практична відсутність системних досліджень процесу формування зносостійких азотованих шарів в попередньо об'ємнодеформованих конструкційних сталях, з яких виготовляються деталі машин і механізмів.

Постановка проблеми

Розробити спосіб механіко-хіміко-термічної обробки конструкційних сталей та встановити закономірності впливу його параметрів на структурно-фазовий склад поверхонь тертя і механічні властивості конструкційних сталей після проведення термомеханічної обробки та дослідити вплив фізико-механічних властивостей конструкційних сталей після проведення термомеханічної обробки з наступною хіміко-термічною обробкою на їх триботехнічні характеристики.

Виклад основного матеріалу

Під час пластичної деформації розмір зерна структури металу « μ » залежить в основному від температури « t » та відносної деформації « ξ ». Відносна деформація, що дорівнює $5 \div 10$ %, є критичною, оскільки при ній отримується максимальний розмір зерна. Тому на підставі аналізу факторів – складових процесу високотемпературної термомеханічної обробки у відповідності із запропонованою технологією застосовується мінімальна (докритична, $\xi < 3$ %) об'ємна гаряча пластична деформація (роздача) з обтискуванням деформованого металу матрицею і наступним гартуванням з нагрівом струмами високої частоти (СВЧ), що забезпечує перетворення крупнозернистої вихідної структури в модифіковану структуру високодисперсної будови. Експериментально визначено інтервал температури ($950 \div 1150$ °С) для конструкційної сталі 18ХГТ, який забезпечує найвищі пластичні властивості деталі, що оброблюється методом ОГПД. У цьому інтервалі температури межа плинності для сталі 18ХГТ складає $\sigma_s = 92 \div 60$ МПа.

Дослідження структури та фізико-механічних властивостей деформованого металу

Металографічному дослідженню піддавалися зразки сталі 18 ХГТ: стандартні та модифіковані (ОГПД): (зразки «1» та «2») та після азотування (зразки «3» та «4»).

Базовий зразок «1» - виконано з конструкційної сталі 18ХГТ – стану постачання (табл. 1). Мікроструктура базового зразка ферито–перлітна (рис. 1).

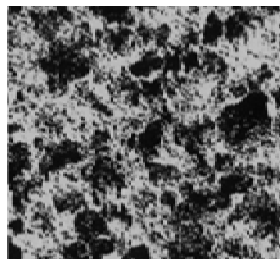


Рис. 1 – Мікроструктура базового зразка «1» стану постачання

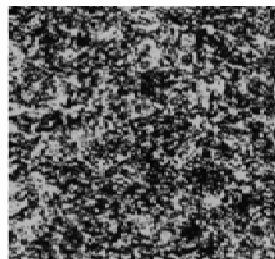


Рис. 2 – Мікроструктура зразка «2» після роздачі з індукційним нагрівом

Модифікований зразок «2» – для проведення ОГПД по запропонованій технології нагрівали СВЧ до температури 1000 ÷ 1050 °С (1273 ÷ 1323 К) протягом 45 секунд замість 20 хвилин при нагріванні у печах опору. Пластична деформація призводить до значного подрібнення ферито-сорбітної мікроструктури (рис. 1). Після роздачі також спостерігається ущільнення подрібнених складових елементів мікроструктури, що супроводжується деяким (10 % і більше) підвищенням мікротвердості вихідного матеріалу. Коливання по мікротвердості не перевищують 1500 МПа (рис. 2).

Результати досліджень структури та фізико-механічних властивостей деформованого, внаслідок проведення ОГПД, металу наведені у Табл.1.

Таблиця 1

Вплив термомеханічної обробки на розподіл твердості

Номер зразка	Стан зразка	Твердість	
		поверхні	серцевини
1	Базовий матеріал сталь 18 ХГТ – стану постачання	HRB $\frac{68,0 - 80,0}{72,7}$	HRB $\frac{76,0 - 79,0}{77,8}$
2	Модифікований проведенням ОГПД з індукційним нагрівом	HRB $\frac{88,5 - 93,0}{90,0}$	HRB $\frac{88,9 - 91,0}{89,3}$

Примітка: В чисельнику наводиться – мінімальне і максимальне, у знаменнику – середнє значення твердості.

Дослідження фізико-механічних властивостей зміцнених сталевих азотованих зразків

Азотування використовують для зміцнення сталей перлітного, феритного, аустенітного і карбідного класів. Поліпшені конструкційні сталі без алюмінію дозволяють підвищити поверхневу міцність після азотування до 650 – 900 HV. Азотований шар на цих сталях має високу зносостійкість і опір крихкому руйнуванню. Відносно низьковуглецевих сталей азотування дає найбільший ефект в поєднанні з наступною термічною обробкою дифузійної зони, яка включає гартування або гартування і відпал. Глибина і поверхнева твердість азотованого шару залежать від ряду факторів, з яких основні: температура азотування, тривалість азотування і склад сталі, що азотується.

Впливу підвищеної температури під час виконання ХТО (азотування при 560 - 600 °С) особливо побоюватися не слід завдяки використанню спадково-дрібнозернистих сталей і правильному підбору наступної термічної обробки (з використанням нагріву СВЧ), тому що в результаті дії явища спадковості фрагментована структура після ТМО є вельми стійкою в умовах, коли повторна термообробка не викличе процесів рекристалізації. Перекристалізація може у ряді випадків привести до ще більшої фрагментації структури й дозволить не тільки зберегти високі механічні властивості, отримані в результаті ТМО, але й досягти ще більшої пластичності.

Інтенсифікувати хіміко-термічну обробку, тобто пришвидшити дифузію атомів азоту, вуглецю та інших елементів вглиб матеріалу і отримати ті ж параметри покриттів (їх товщину, мікротвердість та ін.) при менших температурах і витримках (а значить при менших енерговитратах) або при стандартних режимах насичення отримати покриття більшої товщини за відсутності різкого переходу до основного металу (без ХТО) і з кращими показниками мікротвердості та зносостійкості, можна, за рахунок збільшення

дефектності кристалічної будови матеріалу, а саме збільшення щільності дислокацій, подрібнення зерен і, відповідно, збільшення протяжності їх границь.

Для вирішення цих задач і пропонується спосіб об'ємної гарячої пластичної деформації (роздача з обтискуванням нагрітої деталі в матриці), який окрім інтенсифікації хіміко-термічної обробки і підвищення триботехнічних властивостей матеріалів дає змогу надавати об'ємній термомеханічній обробці деталі (заготовки) тіла-обертання (вали, шестерні, вал-шестерні та ін.) з можливістю компенсації зносу на зношених ділянках для відновлення їх працездатності не використовуючи для цього додаткових деталей і матеріалів.

Зразки «3» та «4» (стандартний та модифікований) були піддані хіміко-термічній обробці - азотуванню. Азотований поверхневий шар чітко проглядається на протравлених мікрошліфах зразків «3» та «4» і вирізняється більш темним забарвленням у порівнянні з основним металом, а також підвищеною твердістю – HV 7960 МПа. Товщина азотованого шару на мікрошліфі 250 і 390 мкм для зразків «3» та «4» відповідно.

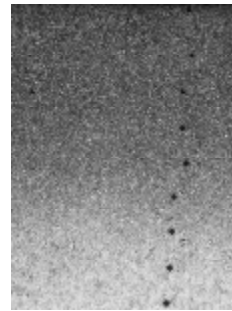


Рис. 3 – Азотований шар (×50) стандартного зразка «3»

Рис. 4 – Азотований шар (×50) модифікованого зразка «4»

Порівнюючи результати металографічних досліджень стандартного зразка «3» та модифікованого об'ємною гарячою пластичною деформацією зразка «4» необхідно зазначити, що хіміко-термічну обробку – азотування в газовому середовищі, вони проходили одночасно, тобто умови для дифузії атомів азоту вглиб матеріалу були створені абсолютно однаковими, але при цьому товщина азотованого поверхневого шару зразка «4» зростає більш ніж в 1,5-рази порівняно зі зразком «3». Це свідчить про прискорення дифузії та збільшення масоперенесення азоту в підданому термомеханічній обробці ОГПД зразку «4». За таких режимів обробки матеріалу спостерігається переважне формування в дифузійному шарі ϵ -фази, при наявності невеликої кількості θ -фази. При цьому окрім збільшення глибини дисперсності шару з підвищеною мікротвердістю у модифікованих ОГПД зразках є наявним плавний перехід азотованого шару з підвищеною мікротвердістю до основного металу з поступовим зниженням мікротвердості до відповідних показників. Основний метал має твердість HV 2750÷2870 МПа. Мікроструктура біля поверхні представляє собою ферито-карбідну суміш, а в центральній частині – бейніт, причому в зразку «4» (модифікованому) структура більш дрібнодисперсна.

Дозована ОГПД призводить до інтенсифікації процесів насичення азотом конструкційних сталей типу 18ХГТ у газовому середовищі, суттєво впливаючи на фазовий склад дифузійного шару.

Таблиця 2

Параметри азотованих поверхневих шарів зразків сталі 18ХГТ

Вид обробки	Товщина шару, мм	Поверхнева мікротвердість, ГПа	Вміст азоту, %	Фазовий склад дифузійного шару
Азотування без ОГПД, (зразок I)	0,250	7,36	0,071	α - Fe ₂ O ₃ ; γ - Fe ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃ ; FeC; FeS; Fe ₃ C; FeC; FeO; Fe ₃ N; Fe ₂ N; Fe ₄ N; ϵ - Fe
Азотування після ОГПД, (зразок II)	0,390	7,96	0,150	FeS ₂ ; Fe ₃ O ₄ ; Fe ₂ O ₃ ; FeO; α -Fe ₂ O ₃ ; γ - Fe ₂ O ₃ ; FeO; Fe ₂ C; Fe ₃ C; FeC; Fe ₂ N; Fe ₃ N; Fe ₄ N; FeS; α - Fe; ϵ -Fe

Відносна кількість ϵ -фази та θ -фази в дифузійному шарі в залежності від ступеню ОГПД змінюється. Дифузійні шари з оптимальними характеристиками (максимальною глибиною та високою мікротвердістю) формуються після дозованої докритичної (до 3 %) деформації, при цьому спостерігається переважне формування в дифузійному шарі ϵ -фази, при наявності невеликої кількості θ -фази.

Триботехнічні випробування зміцнених сталей

Експериментально-теоретичні дослідження зносостійкості базового і модифікованого гарячим роздаванням матеріалів проводилися за схемою «перехресних циліндрів» для чого запропоновано застосувати двохфакторну залежність (контактний тиск, швидкість ковзання) інтенсивності зношування. Згідно розробленої методики були проведені випробування на зношування базових і модифікованих зразків зі сталі 18ХГТ, після азотування.

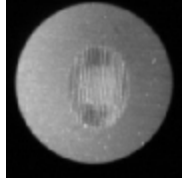


Рис. 5 – Площадка трибоконтакту базового зразка «3»

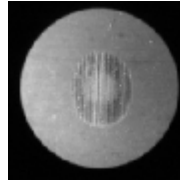


Рис. 6 – Площадка трибоконтакту модифікованого зразка «4»

По завершенню випробування, для проведення порівняльних досліджень, за допомогою великого інструментального мікроскопу БМІ-1Ц, вимірювалися розміри осей еліптичної плями зношування ($2a$ та $2b$), розраховувався середній радіус площадки контакту (\bar{a}) і максимальний знос в центрі площадки (u_w).

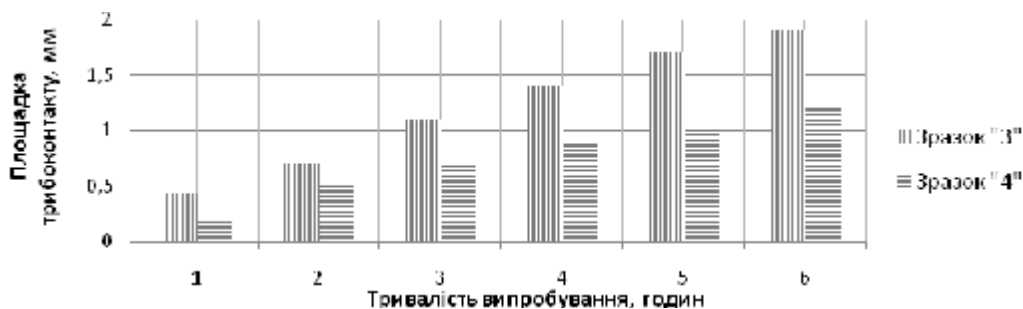


Рис. 7 – Залежність середнього розміру площадки зношування сталі 18ХГТ від тривалості випробувань та виду попередньої механіко-хіміко-термічної обробки

За результатами проведених порівняльних трибо технічних випробувань (рис. 7) показано, що зносостійкість ОГПД модифікованого зразка в $1,5 \div 2$ рази вища, ніж у базового для всього розглянутого діапазону дослідження, що кількісно підтверджує кращу зносостійкість зразків, відновлених гарячим пластичним деформуванням.

Встановлено, що існує діапазон концентрації азоту, при якому трибологічні характеристики мають мінімальні значення (рис. 8). Тобто діапазон оптимальної за триботехнічними критеріями концентрації азоту знаходиться у межах $6,5 \dots 7,5$ %.

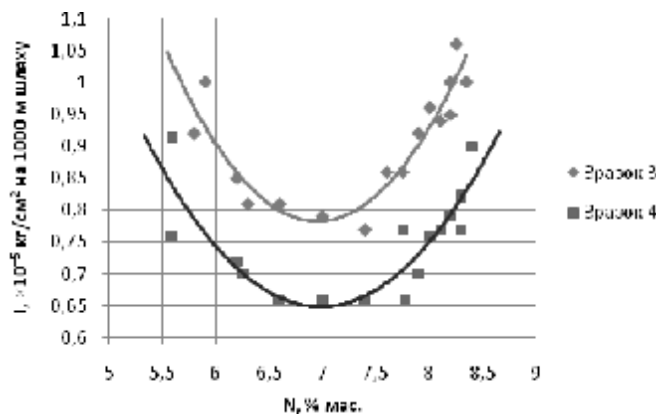


Рис. 8 – Залежність інтенсивності зношування зразків від концентрації азоту

Знаходження вищевказаного діапазону саме у таких межах можна пояснити тим, що за такої концентрації азоту поверхневі нітридні шари пар тертя складаються переважно з ϵ - фази (гексагонального карбонітриду $\text{Fe}_{2-3}(\text{NC})$), близької до своєї нижньої межі розчинності азоту. Така структура ϵ - фази дозволяє виключити її крихкість, пороутворення та отримання у шарі крихкого нітриду Fe_2N . (ϵ - фаза є більш пластичною, але менш твердою, ніж гранецентрований нітрид Fe_4N). За вказаної концентрації твердість зміцненого шару наближується до твердості γ' - фази, з одночасним збереженням пластичності ϵ - фази, створюючи, таким чином, оптимальні структурні передумови для підвищення зносостійкості деталей.

Отже хіміко-термічна обробка (дифузійне насичення азотом) конструкційних сталей дрібнодисперсної будови, що отримується внаслідок проведення ОГПД, завдяки інтенсифікації процесів насичення азотом значно покращує їх механічні властивості, зокрема зносостійкість (у $2 \div 2,5$ рази).

Висновки

1. Дослідження показали, що термомеханічна обробка (об'ємна гаряча пластична деформація) конструкційних сталей (18ХГТ) до хіміко-термічної обробки за певних умов може суттєво прискорювати процеси азотування, а також справляє помітний вплив на кінетику росту, фазовий і хімічний склад, структуру та властивості поверхневих дифузійних шарів.

2. Об'ємна гаряча пластична деформація (ОГПД) суттєво впливає на фазовий склад дифузійного шару сталі 18ХГТ, відносна кількість ϵ - фази та θ - фази в дифузійному шарі в залежності від ступеня ОГПД змінюється. Дифузійні шари з оптимальними характеристиками (максимальною глибиною та високою мікротвердістю) формуються після дозованої (до 10 %) деформації, при цьому спостерігається переважне формування в дифузійному шарі ϵ - фази, при наявності невеликої кількості θ - фази.

3. Встановлено, що діапазон оптимальної за триботехнічними критеріями концентрації азоту на поверхні зразків знаходиться у межах 6,5 ... 7,5 %.

4. Встановлено, що дозована (до 3 %) докритична деформація забезпечує інтенсифікацію процесів насичення конструкційних сталей в азотному газовому середовищі та призводить до значного (в 1,5 рази) збільшення глибини дифузійного шару та підвищення його мікротвердості (на $10 \div 20$ %). Що, в свою чергу, поєднуючись з поліпшенням, внаслідок проведення ОГПД мікро і макроструктури сталі призводить до покращення її механічних характеристик, зокрема зносостійкості (у $2 \div 2,5$ рази).

Література

1. А.с. №1290607 Установка для восстановления деталей типа вал-шестерня / Климин В.В. и др. Заявл. от 15.10.1986.
2. А.с. №1706829 Способ ремонта шестеренных гидронасосов / Климин В.В. и др. Заявл. от 22.09.1991.
3. А.с. №1729724 Способ ремонта шестеренных гидронасосов / Климин В.В. и др. Заявл. от 03.01.1992.
3. Климин В.В. Применение метода горячей пластической деформации для восстановления конструктивных параметров и повышения износостойкости тяжело нагруженных деталей / В.В.Климин, Ю.М.Билык // Проблемы тертя та зношування. – 2006. – Вип.46. – С. 76-83.
4. Климин В.В. Применение специальной термомеханической обработки для компенсации износа деталей узлов трения // Проблемы тертя та зношування. – 2007. – Вип. 47. – С. 58-66.
5. Климин В.В. Установка для восстановления и повышения износостойкости деталей методом горячей пластической деформации / Климин В.В., Киндрачук М.В. // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2009. – № 4. – С. 75-79.
6. Кузьменко А.Г. Методирозрахунків та випробувань на зношування та надійність. – Хмельницький, ТУ Поділля – 2002. –150 с.
7. Дыха А. В. Закономерности изнашивания и испытания образцов со смазочными материалами / А. В. Дыха // Проблемы тертя та зношування: науково-технічний збірник. – К. : НАУ, 2007. – Вип. 47. – С. 228–241.
8. Вельбой В.П. Багатофункціональна лабораторна установка для дослідження трибологічних властивостей конструкційних і мастильних матеріалів / В.П. Вельбой, А.Г. Кузьменко, О.В. Дыха, М.О. Дыха // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2008. – № 1. – С. 94-98.

Надійшла 24.03.2011