

УДК 621.891

М. В. КІНДРАЧУК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, І. А. ГУМЕНЮК, В. В. ХАРЧЕНКО,
Є. П. КОСТЮК

Національний авіаційний університет, Україна

МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ АУСТЕНІТНОЇ СТАЛІ 12Х18Н9Т В ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ЗОВНІШНІХ НАВАНТАЖЕНЬ

Досліджено закономірності зношування сталі 12Х18Н9Т в діапазоні температур від 20 до 800°C з варіюванням швидкості ковзання та питомих навантажень. Встановлено, що низька зносостійкість сталі визначається її гомогенною структурою, знеміцненням при високих температурах та схильністю до інтенсивного окислення в умовах трибоактивації.

Ключові слова: знос, окислення, схоплення, знеміцнення, мартенсит деформації.

Поставка задачі досліджень. Аустенітним нержавним сталям притаманні хороша пластичність, зварюваність і високий опір корозії. Тому їх широко застосовують в атомній енергетиці, хімічному машинобудуванні, біомедицині тощо. Вони використовуються в якості конструкційних матеріалів для роботи в умовах підвищених температур, що виключають застосування рідких і консистентних мастил. В літературі обмежені відомості щодо застосування сталей такого типу у вузлах тертя [1]. З них витікає, що відома сталь 12Х18Н9Т володіє низькою зносостійкістю в умовах тертя без мащення і схильна до схоплення. Однак на сьогоднішній день відсутні дані про природу, механізм і закономірності тертя та зношування сталей цього класу в широкому інтервалі температур, навантажень, швидкостей ковзання. Тому актуальним є експериментальне дослідження механізму зношування сталі 12Х18Н9Т в умовах багатофакторного впливу. Такі дані дозволять визначити шляхи підвищення її зносостійкості і створення на її основі нових матеріалів з високими триботехнічними властивостями в поєднанні з високою жаростійкістю, жароміцністю, стійкістю до впливу хімічно активних середовищ.

Методи дослідження. Випробування на зносостійкість в умовах тертя ковзання без змащування виконували на машині М22–М за схемою вал площина з діапазоном питомого навантаження від 0,5 до 3 МПа, швидкості ковзання від 0,1 м/с до 1 м/с, температури від 20 до 600°C. В якості контртіл використовували жароміцний сплав ЖС6К, сталь 12Х18Н9Т і цементовану сталь 20Х (HRC 59–61). За критерій зношування приймалась втрата маси зразка і при високих температурах, коли спостерігалась пластична плинність – лінійний знос. Зважування зразків проводили на аналітичних вагах ВЛА-200. Рентгеноструктурний аналіз здійснювали на дифрактометрі ДРОН–3 М в Fe-K α випромінюванні. Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили на приладі «Camebax» Sx50. Металографічні дослідження проводились за допомогою оптичного мікроскопу «НЕОРНОТ–21» та растрового мікроскопу - РЕМ106И. Жаростійкість досліджували на термомасометричній установці ТМ-50 на повітрі. Діапазон зміни температури складав 500–900°C за витримки зразків протягом 6 годин. Механічні властивості визначалися методом ідентування за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3.

Результати дослідження та їх обговорення. Низька зносостійкість аустенітних сталей в умовах тертя без мастила, обумовлена складними процесами, що

виникають на поверхні і визначаються одночасним та взаємозв'язаним впливом таких зовнішніх факторів, як температура, швидкістю ковзання та навантаження. Експериментальне дослідження зносу сталі 12Х18Н9Т в широкому діапазоні цих параметрів дозволить встановити закономірності зношування і визначити шляхи підвищення її зносостійкості. Оскільки одночасний вплив температури, швидкості ковзання, навантаження на механізм зношування є складним, був вибраний шлях роздільного вивчення кожного із цих факторів.

Вплив навантаження. В першій серії експериментів досліджувався вплив навантаження на процеси, що протікають при терті та зношуванні сталі 12Х18Н9Т. В якості контртіла використовувалися зразки із сплаву ЖС6К. Для порівняння проводились випробування одноіменних матеріалів (сталь по сталі) при постійній швидкості ковзання 0,1 м/с і температурі 20°C, при зміні питомого навантаження в діапазоні від 0,5 до 3 МПа.

На рис. 1 представлені криві залежності коефіцієнта тертя f від тиску. Коефіцієнт тертя сталі по сталі при збільшенні тиску спочатку дещо знижується від 1,75 до 1,52, а потім зростає. При терті по ЖС6К коефіцієнт тертя зі збільшенням навантаження зменшується від 1,4 до 0,9 а потім починає зростати. Збільшення коефіцієнта тертя сталі по сталі настає за меншого навантаження (1-1,5 МПа), ніж по ЖС6К (2-2,5 МПа).

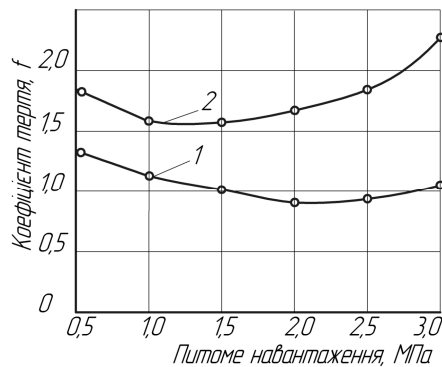


Рис. 1. Залежність коефіцієнта тертя від питомого навантаження при швидкості ковзання 0,1 м/с та температурі 20°C: 1 – 12Х18Н9Т по ЖС6К; 2 – 12Х18Н9Т по 12Х18Н9Т

Такий вплив навантаження на коефіцієнт тертя пов'язаний з видом контактної взаємодії поверхонь, що труться: пружного або пластичного [2]. Відомо, що адгезійна складова коефіцієнта тертя обернено пропорційна фактичному контактному тиску. При пластичному контакті фактичний тиск дорівнює твердості менш твердого із контактуючих матеріалів і не залежить від навантаження. Зі зростанням навантаження в міру переходу від пружного контактного навантаження до пластичного f переходить через мінімум в зоні пружного контакту і зростає при пластичному.

Положення мінімуму залежить від співвідношення між адгезійною і деформаційною складовими коефіцієнта тертя. Зі збільшенням відношення f_a/f_q мінімум зсувається в бік менших навантажень і контурних тисків. В нашому випадку менш твердим матеріалом є сталь 12Х18Н9Т. При терті сталі по сталі відношення f_a/f_q зростає і мінімум f зсувається в бік менших навантажень, а при терті сталі по ЖС6К - в бік більших навантажень.

Залежність величини зносу від питомого навантаження наведена на рис. 2. Зі збільшенням навантаження величина зносу зростає. Характерним при цьому є

більш високі значення величини зносу при терті сталі по сталі порівняно з тертям по ЖС6К.

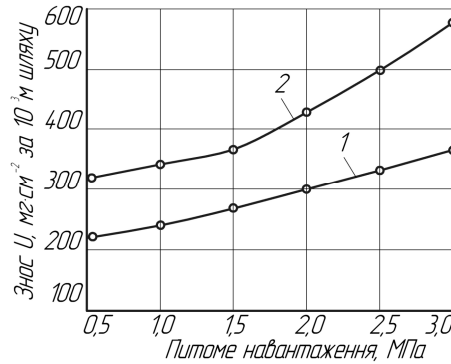
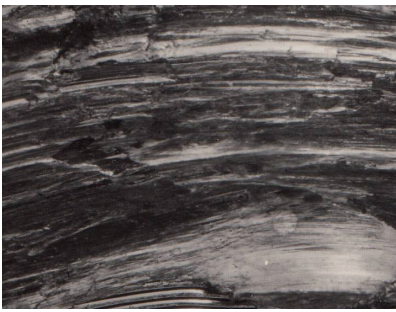


Рис. 2. Залежність зносу від питомого навантаження при швидкості ковзання 0,1 м/с та температурі 20°C: 1 – 12Х18Н9Т по ЖС6К; 2 – 12Х18Н9Т по 12Х18Н9Т

Отриманні закономірності можна пояснити за допомогою металографічного аналізу, результати якого наведені на рис. 3. Поверхні тертя зразків мають хаотичні вириви металу, характерні для процесів схоплення.



а



б

Рис. 3. Мікроструктура поверхні тертя сталі 12Х18Н9Т після дослідження по сталі 12Х18Н9Т (а) та при терті по ЖС6К (б), $\times 20$

При терті сталі по сталі ці процеси більш ярко виражені та інтенсифікуються зі збільшенням навантаження. Поверхневі шари металу характеризуються пластичною деформацією, що поширюється на глибину до 50 мкм (рис. 4).

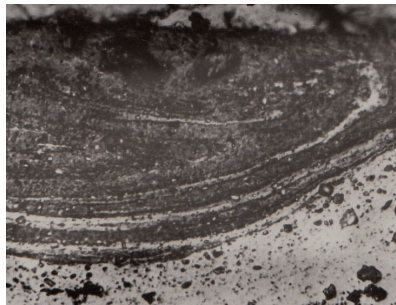


Рис. 4. Мікроструктура сталі 12Х18Н9Т (поперечний шліф) після тертя по сталі 12Х18Н9Т, $\times 850$

Протікання процесів схоплення призводить до зміцнення поверхонь тертя металу, ступінь якого спочатку зростає зі збільшенням навантаження, а потім зменшується.

Підвищення мікротвердості при терті сталі по сталі спостерігається до менших тисків (1-1,3 МПа), ніж по ЖС6К (2,2-2,5 МПа) і складає відповідно 5200 МПа і 6800 МПа (рис. 5).

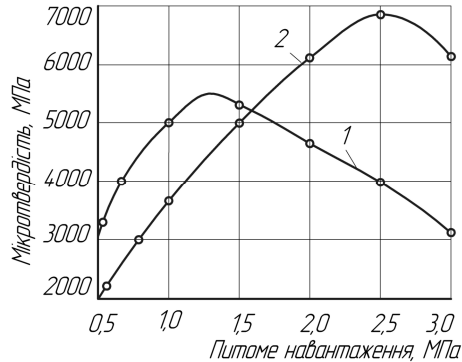


Рис. 5. Залежність мікротвердості поверхні тертя від питомого навантаження при швидкості ковзання 0,1 м/с та температурі 20°C: 1 – 12X18H9T по ЖС6К; 2 – 12X18H9T по 12X18H9T

Пластична деформація при терті з малими навантаженнями, що протікає в тонких поверхневих шарах, призводить до значного зміцнення. Про це свідчить збільшення мікротвердості, подрібнення блоків і ріст напружень II роду. Так, за тиску 1 МПа при терті сталі по ЖС6К мікротвердість досягає 5200 МПа, величина блоків (D) – $3,6 \cdot 10^{-6}$ см і величина напружень II роду $\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) - 4,1 \cdot 10^{-3}$ рад.

З підвищенням навантаження пластичні деформації поверхневих шарів металу зростають, що в свою чергу інтенсифікує процеси схоплення. Процес зношування, при цьому, превалює над процесами зміцнення. Так, при терті сталі по сталі в діапазоні питомих навантажень від 1,5 до 3,0 МПа спостерігається збільшення розмірів блоків від $3,1 \cdot 10^{-6}$ до $4,2 \cdot 10^{-6}$ см і зменшення величини напружень II роду (рис. 6). Мікротвердість знижується з 5200 до 3100 МПа.

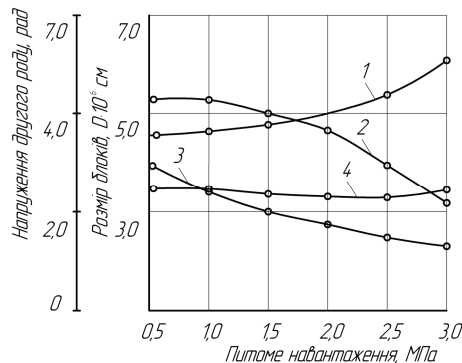


Рис. 6. Залежність тонкої кристалічної структури поверхнього шару від питомого навантаження при швидкості ковзання 0,1 м/с та температурі 20 °C: 1, 3 – 12X18H9T по ЖС6К; 2, 4 – 12X18H9T по 12X18H9T

В поверхневих шарах зразків, випробуваних при малих навантаженнях, рентгенівським дифракційним аналізом встановлено наявність мартенситу деформації. Деформація тертям сприяє утворенню в сталі високих напружень, які викликають у метастабільному аустеніті $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення [3, 4]. Напевно зміц-

ненням, підвищення твердості, утворенням мартенситу в поверхневих шарах сталі можна пояснити більш високий знос контртіла. При більш високих навантаженнях, коли процес зношування випереджає процес зміцнення, наявності феритної фази не відмічено. При цьому має місце підвищення температури поверхневого шару до 400°C і збільшення глибини деформації до 65 мкм.

Вплив швидкості ковзання. Дослідження проводилися при постійному тиску 1 МПа і температурі 20°C при зміні швидкостей ковзання від 0,1 до 1,0 м/с. На рис. 7 наведені криві залежності коефіцієнта тертя від швидкості ковзання. При збільшенні швидкості ковзання коефіцієнт тертя по ЖС6К зменшується, а при терті сталі по сталі збільшується.

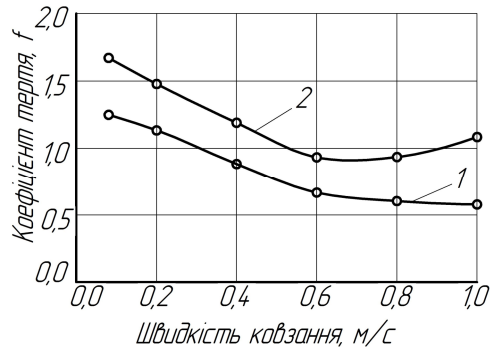


Рис. 7. Залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання при питомому навантаженні 1 МПа та температурі 20°C: 1 – 12Х18Н9Т по ЖС6К; 2 – 12Х18Н9Т по 12Х18Н9Т

Величина зносу має максимальне значення при швидкості ковзання 0,1 м/с (рис. 8). Зі збільшенням швидкості ковзання темп зношування знижується. При цьому величина зносу при терті сталі по сталі значно більша, ніж при терті по ЖС6К. При терті сталі по сталі зі швидкістю ковзання 1,2 м/с поверхні тертя зварюються. При випробуванні в діапазоні швидкостей ковзання 0,1-0,6 м/с мають місце процеси схоплення, які характеризуються збільшенням зносу сталі при зменшенні швидкості ковзання.

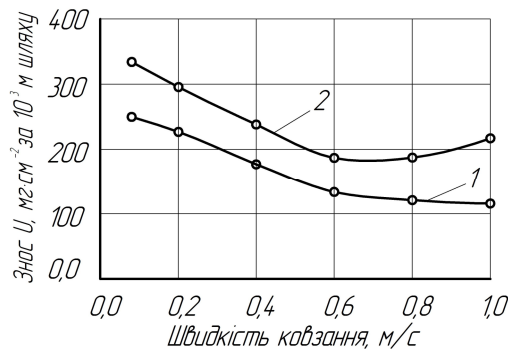


Рис. 8. Залежність зносу від швидкості ковзання при питомому навантаженні 1 МПа та температурі 20°C: 1 – 12Х18Н9Т по ЖС6К; 2 – 12Х18Н9Т по 12Х18Н9Т

Поверхні тертя зразків мають безладні вириви і налипання металу (рис. 9). Поверхневі шари металу характеризуються яскраво вираженою пластичною деформацією, що розпоширюється на глибину до 40 мкм. Вони значно зміцненні ($H_\mu = 400$ МПа), а на окремих ділянках поверхні виникають структури, що слабо травляться, мають високу мікротвердість ($H_\mu = 7500-900$ МПа) і утворюють

різку межу з основним металом, Так звані «білі» шари виникають в зоні максимальної пластичної деформації.

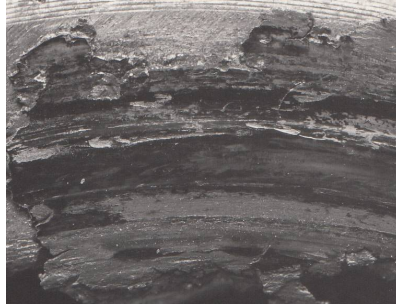


Рис. 9. Мікроструктура поверхні тертя сталі 12X18H9T при швидкості ковзання 0,1 м/с, питомому навантаженні 1 МПа та температурі 20°C, $\times 850$

Експериментально встановлено, що при терті аустенітної сталі 12X18H9T, коли має місце пластичний контакт, швидкість ковзання впливає на процеси тертя через швидкість розпоширення пластичної деформації. Зі збільшенням швидкості ковзання від 0,1 до 0,6 м/с процеси деформування локалізуються в меншому приповерхневому об'ємі і коефіцієнт тертя знижується. Температура поверхневих шарів підвищується від 200 °C до 500 °C. Нагрів до 300 °C запобігає процеси схоплення внаслідок інтенсифікації утворення вторинних структур (рис. 10). Коефіцієнт тертя при цьому знижується.



Рис. 10. Мікроструктура поверхні тертя сталі 12X18H9T при швидкості ковзання 0,6 м/с, питомому навантаженні 1 МПа та температурі 20°C, $\times 850$

В указаному діапазоні швидкостей ковзання при терті сталі по сталі спостерігається збільшення розміру блоків від $3,7 \cdot 10^{-6}$ см до $6,7 \cdot 10^{-6}$ см і зменшення величини напружень II роду від $4,8 \cdot 10^{-3}$ рад. до $2,5 \cdot 10^{-3}$ рад., мікротвердості від 5000 МПа до 1200 МПа. В продуктах зносу спостерігаються (рентгенографічно) оксиди заліза і хрому (Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3).

З подальшим збільшенням швидкості ковзання до 1,0 м/с спостерігається перехідний процес від окиснювального зношування до процесу схоплення. При цьому підвищується температура в поверхневих шарах металу до 600-800°C, збільшується глибина деформованого шару, матеріал знеміцнюється, коефіцієнт тертя та знос збільшуються. Істотне зниження міцності сталі відбувається за рахунок процесів повернення та перетворення мартенситу деформації в аустеніт [4]. За швидкості ковзання 1 м/с при терті сталі по сталі поверхні тертя зварюються. При терті сталі по сплаву ЖС6К перехід до процесу схоплення відбувається за швидкості 1,2 м/с.

Вплив температури. Дослідження проводилися при постійному навантаженні 1 МПа і швидкості ковзання 0,1 м/с при зміні температури від 20 до 600 °С.

На рис. 11 наведені криві залежності коефіцієнта тертя від температури. З підвищенням температури коефіцієнт тертя при терті сталі по ЖС6К зменшується, а при терті сталі по сталі на початку зменшується, а потім збільшується.

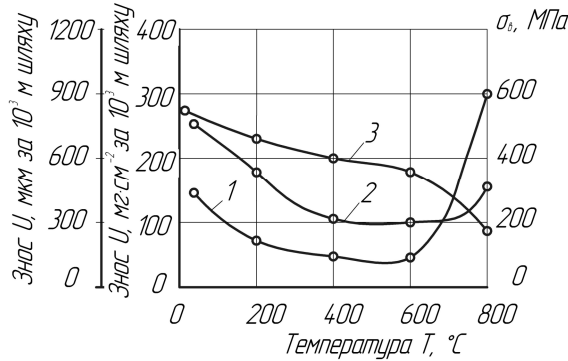


Рис. 11. Залежність коефіцієнта тертя від температури при питомому навантаженні 1 МПа та швидкості ковзання 0,2 м/с: 1 – 12X18H9T по ЖС6К; 2 – 12X18H9T по 12X18H9T

Залежність зносу від температури наведена на рис. 12. Величина зносу має максимальне значення за температури 200 °С.

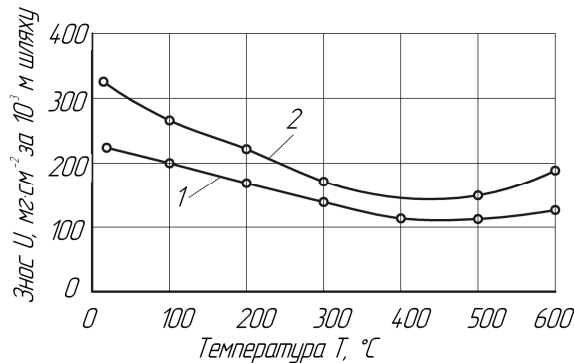


Рис. 12. Залежність зносу від температури при питомому навантаженні 1 МПа та швидкості ковзання 0,1 м/с: 1 – 12X18H9T по ЖС6К; 2 – 12X18H9T по 12X18H9T

З підвищенням температури темп зносу зменшується, а за температури 500 °С і вище при терті сталі по сталі величина зносу починає рости. Подальше підвищення температури до 600 °С призводить до різкого збільшення лінійного зносу і при тиску 2 МПа відбувається зварювання зразків.

Аналіз даних, одержаних при дослідженні температури і стану поверхонь тертя свідчить, що в діапазоні температур 20-300 °С розвивається процес схоплення. Поверхневі шари пластично деформовані та значно зміцнені. Наприклад, при терті сталі по сталі за температури 20 °С мікротвердість поверхонь тертя складає 5200 МПа, а при терті сталі по сплаву ЖС6К – 3400 МПа. З підвищенням температури до 300 °С мікротвердість знижується і складає відповідно 2900 і 2300 МПа.

При зміні температури від 300 до 600 °С відбувається процес окиснювального зношування, який характеризується відносно малими значеннями зносу

(110-120 мг/см² за 10³ м) і коефіцієнта тертя (0,7-0,8). Шар оксидів, що розділяє поверхні тертя, знижує сили адгезії, а отже, і сили тертя, тим самим зменшуючи пластичну деформацію поверхневих шарів. Це зменшує ріст температури поверхневих шарів і стабілізує процес зовнішнього тертя в діапазоні від 300 до 600 °С.

В інтервалі температур 500-600 °С тертя сталі по сталі порівняно з тертям по сплаву ЖС6К характеризується збільшенням зносу та коефіцієнта тертя. Напевно, знеміцнення металу і інтенсивне окислення поверхонь тертя обох зразків сталі призводить до продавлювання і руйнування оксидних плівок. Відомо, що при терті державної сталі процеси окислення інтенсифікуються [5].

На зносостійкість сталі в даному інтервалі впливає не тільки товщина оксидної плівки, але її склад та якість. В процесі окислення металів досить часто в окаліні утворюються пори. Причинами утворення пор може бути збільшення об'єму, термічні коливання, плинність [6].

В роботі [7] показано, що основний вплив на виникнення пористості в окаліні виявляє фактор: $\Delta = \frac{\mu' \rho}{\mu \rho'}$, який називається коефіцієнтом збільшення об'єму (критерій Піллінга і Бедворта). Він являє собою відношення об'єму еквівалента одержаного оксиду $\frac{\mu \rho}{\mu \rho'}$ (μ' – маса в грам-еквівалентах, ρ' – густина) до відповідного об'єму металу. Якщо це відношення менше одиниці, то доля (1- Δ) об'єму металу, витраченого на утворення оксиду, може бути занята порами. В цьому випадку оксид не є захисним. Коли коефіцієнт збільшення об'єму більше одиниці видима пористість виключається. Згідно даного критерію, опосередковано можна вважати, що пори відсутні в оксидах заліза і хрому (Fe₃O₄, Fe₂O₃, Cr₂O₃).

За температури нижче 570 °С оксид FeO не утворюється. При підвищенні температури випробування до 600 °С знос сталі 12X18H9T росте. Пов'язувати це тільки з утворенням оксиду FeO, в якого коефіцієнт збільшення об'єму менший, ніж у Fe₂O₃, не можна оскільки за температури 600 °С інтенсивно знеміцнюється сама сталь і вона не може слугувати твердою основою для шару оксидів. Крім того, це можна пояснити кінетикою окислення і співвідношення процесів утворення оксидів та їх зносу. Відомо, що на початковому етапі окислення металу спостерігається епітаксціальний ріст плівки. Таку плівку треба вважати метастабільною, оскільки різниця параметрів ґраток металу і оксиду така, що коефіцієнт збільшення об'єму виявляється більшим одиниці. Тому при переході до стабільного стану в мірі збільшення товщини оксидного шару в її поперечному шарі виникають внутрішні напруження, які можуть досягати таких значень, за яких буде відбуватися руйнування оксидної плівки та утворення в ній пор [7]. В інтервалі температур 400-600 °С знос сталі мінімальний оскільки утворюються оксидні плівки оптимальної товщини. За температури вище 600 °С утворюються оксидні плівки великої товщини, які при терті інтенсивно зношуються згідно вказаної причини. З підвищенням температури зразків до 800 °С відбувається подальше знеміцнення металу. Границя міцності в інтервалі температур 600-800 °С зменшується з 380 до 190 МПа. В цьому інтервалі температур спостерігається різке збільшення лінійного зносу (рис. 13).

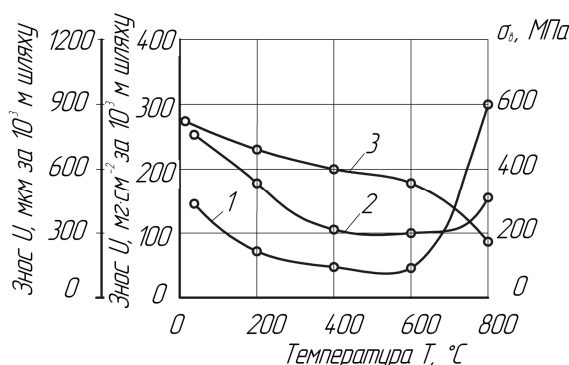


Рис. 13. Залежність зносу від температури при питомому навантаженні 1 МПа та швидкості ковзання 0,1 м/с при терті по ЖС6К: 1 – лінійний знос; 2 – ваговий знос; 3 – границя міцності

На поверхні тертя зразка сталі, випробуваного за температури 800°C, видно товсті оксидні шари та їх руйнування внаслідок знеміцнення і пластичної плинності поверхневих шарів металу (рис. 14).

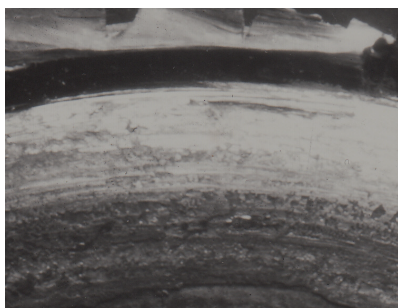


Рис. 14. Мікроструктура поверхні тертя сталі 12X18H9T при швидкості ковзання 0,6 м/с, питомому навантаженні 1 МПа та температурі 800°C, $\times 850$

Хімічний склад вторинних структур наведений в таблиці.

Таблиця

Результати мікрорентгеноспектрального аналізу поверхні тертя сталі 12X18H9T

Концентрація елементів, ат. %				
Залізо	Кисень	Хром	Нікель	Титан
58,235	22,837	10,835	0,574	0,494

Аналізуючи ці результати, можна відзначити, що основними елементами, що утворюють вторинні структури на поверхневих тертя є залізо та кисень. Слід зауважити малу кількість нікелю у поверхневих шарах.

Висновки:

1. На основі експериментальних даних досліджень механізм зношування аустенітної сталі 12X18H9T в широкому діапазоні температур, швидкостей ковзання та навантажень. Знос сталі визначається трьома процесами: до температури 300°C домінуючим є захоплення, в інтервалі температур 300 - 600°C протікає механохімічне (окиснювальне) зношування і вище 600°C відбувається високо-температурне знеміцнення сталі та інтенсивне утворення оксидних плівок, що призводить до захоплення і катастрофічного зносу.

2. Низька зносостійкість сталі визначається її гомогенною структурою, знеміцненням при високих температурах та схильністю до інтенсивного окислення в умовах трибоактивації, що є суттєвим недоліком сталей цього класу, який може бути усунений нанесенням захисних дифузійних покриттів та створенням композиційних сплавів на їх основі з використанням зміцнюючих фаз.

Список літератури

1. Трибологія: [підруч.] / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашечко, Є. В. Корбут. – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ- друк». – 2009. – 392с.
2. Гаркунов Д. Н. Триботехніка / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение. – 1985. – 424 с.
3. Химушин Ф. Ф. Нержавеющие стали / Ф. Ф. Химушин. – М.: Металлургия. – 1967. – 798с.
4. Днепренко В. Н. Особенности превращения в различных компонентах текстуры прокатанной нержавеющей стали / В. Н. Днепренко, В. В. Карпович, Л. Н. Ларионов // Металлофизика. – 1987. - № 1. – С. 15 – 21.
5. Костецкий Б. И. Износостойкость и антифрикционность деталей машин / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский. – Киев: Техніка. – 1965. – 205с.
6. Окисление металлов / Под ред. Бенара Ж. Пер с Французкого. – 1968. – 499 с.
7. Pilling N. B. et Bedworth R.E. j. Inst. Met., 1923, v. 1, p. 529.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2015

*M. V. KINDRACHUK, R. G. MNATSAKANOV, I. A. HUMENIUK,
V. V. KHARCHENKO, Ye. P. KOSTIUK*

WEAR MECHANISM OF 12X18H9T AUSTENITIC STEEL IN A BROAD RANGE OF EXTERNAL LOADINGS

The wear behavior of steel 12X18H9T was investigated of temperature range 20 – 800°C under various normal load and sliding speed. It was found that low wear resistance of the steel is due to its homogeneous structure, loss of strength at high temperature and its natural tendency to intensive oxidation in triboactivated condition.

Keywords: wear, oxidation, galling, loss of strength, martensitic deformation.

Кіндрачук Мирослав Васильович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел./факс: +38 044 406 77 73, E-mail: Kindrachuk@ukr.net.

Мнацаканов Рудольф Георгійович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри організації авіаційних робіт та послуг, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 68 75, E-mail: koarp@nau.edu.ua.

Гуменюк Ігор Анатолійович – пошукач кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058.

Харченко Володимир Володимирович – студент, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058.

Костюк Євгеній Павлович – студент, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058.