

## **ПІДВИЩЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ФРИКЦІЙНИМ ЗМІЦНЕННЯМ**

*Показано, що поверхнєве фрикційне зміцнення суттєво підвищує втомну міцність сталей 45, 40X та У8А як на повітрі, так і у корозійному середовищі (3 %-й водяний розчин NaCl). Підвищення довговічності становить 1,3-1,6 разів на повітрі та 3,4-6,6 разів у корозійному середовищі.*

Руйнування від втоми є одним із найнебезпечніших видів руйнування деталей машин в експлуатації. Тріщина при знакоперемінних навантаженнях зароджується, як правило, із поверхні або у поверхневих шарах. Як було встановлено в роботах [1, 2], при дослідженнях на опір втомному руйнуванню переважний вплив має стан поверхневого шару металу. Поверхнєве зміцнення є сприятливим технологічним методом для підвищення довговічності деталей, що можуть працювати в умовах втомного руйнування, а особливо в корозійному середовищі.

Технологічні методи поверхневого зміцнення деталей машин з використанням висококонцентрованих джерел енергії суттєво впливають на працездатність деталей машин у різних умовах експлуатації. До даних методів поверхневого зміцнення належить і фрикційне зміцнення. Висококонцентрований потік енергії утворюється в зоні контакту за рахунок високошвидкісного тертя інструмента-диска на оброблюваній деталі. У поверхневих шарах зміцнюваних деталей формується специфічний структурно-напружений стан металу – білі шари. Білі шари мають підвищену твердість та в'язкість, густину дислокацій та кількість залишкового аустеніту, подрібнене зерно, формуються залишкові напруження стиску порівняно з основним металом [3].

Найбільш розповсюдженим на практиці видом деформації при циклічному навантаженні деталей є згин з обертанням. При таких умовах навантаження кожне волокно за один оберт деталі сприйматиме розтяг і стиск однакової величини. Тому великого поширення в лабораторних умовах набули випробування на опір втомному руйнуванню, що імітують таке деформування.

Дослідження на опір втомному руйнуванню виконували за методикою [4] на циліндричних зразках при чистому згині з обертанням з частотою навантаження 50 Гц. База випробувань зразків на повітрі становила 20 млн. циклів, а у корозійному середовищі (3 %-й водяний розчин NaCl) – 50 млн. циклів.

Фрикційне зміцнення робочої частини зразків виконували на спеціальній установці, змонтованій на базі універсального токарно-гвинторізного верстата моделі 16К20. Замість різцетримача на супорті верстата був встановлений спеціальний пристрій з автономним приводом обертання зміцнювального інструмента-диска [5]. Як технологічне середовище при фрикційному зміцненні використовували мінеральне мастило “Індустріальне-30А” та поверхнево активну полімервмісну мастильно-охолоджувальну рідину МХО-64а.

Зразки для дослідження опору втомному та корозійно-втомному руйнуванню виготовляли зі сталей 45, 40X та У8А у загартованому і низьковідпущеному стані. Фрикційно зміцнювали робочу частину діаметром 10 мм та довжиною 66 мм. Для порівняння використовували незміцнені, тільки шліфовані електрокорундовим кругом зразки. Шорсткість робочих поверхонь після фрикційного зміцнення становила  $R_a = 0,25 \dots 0,50$  мкм, а після електрокорундового шліфування -  $R_a = 0,40 \dots 0,50$  мкм.

Металографічні дослідження показали, що товщина білого шару, отриманого на сталі 45 після фрикційного зміцнення з використанням як технологічного середовища мінерального мастила, становила 90-100 мкм, а з використанням МХО-64а – 140-150 мкм. На сталі 40X товщина зміцненого шару становила 120-140 мкм та 170-190 мкм, а

на сталі У8А – 140-160 мкм та 180-200 мкм відповідно. Мікротвердість зміцненого шару зросла на сталі 45 до 8,5-9,1 ГПа порівняно з 4,7-4,8 ГПа основної структури, на сталі 40Х - до 9,1-9,5 ГПа порівняно з 5,3-5,5 ГПа і на сталі У8А - до 10,3-11,2 ГПа порівняно з 6,1-6,5 ГПа відповідно.

При фрикційному зміцненні з використанням як технологічного середовища полімервмісної мастильно-охолоджувальної рідини МХО-64а у зоні контакту інструмента-диска та деталі під дією високих температур та тисків відбувається термо- та механодеструкція полімерів. При цьому утворюються макрорадикали з дальшою їх деполімеризацією, у результаті чого виділяються активний водень та вуглець, а також інші елементи, складники технологічного середовища. На ювенільних поверхнях вони адсорбуються з дальшим масопереносом у поверхневі шари. Водень, що виділяється при цьому, полегшує процеси пластичного деформування поверхневих шарів, що збільшує товщину зміцненого шару, його мікротвердість та ін.

Рентгеноструктурний аналіз білих шарів виявив, що білий шар має підвищений вміст вуглецю, і на досліджуваних сталях біля поверхні становив 1,3-1,6 %. Зі збільшенням глибини кількість вуглецю зменшується до вихідного значення. За рахунок збільшеного вмісту вуглецю у білому шарі зростає й кількість залишкового аустеніту. Так, у білому шарі, отриманому на сталі У8А, біля поверхні кількість залишкового аустеніту досягала майже 40 %, що з глибиною зменшувалася до вихідного значення (майже 5 %).

Густина дислокацій характеризує напружений стан металу. Із збільшенням густини дислокацій значно підвищуються механічні характеристики металу. Дослідження виявили, що найбільша густина дислокацій у білому шарі, отриманому на сталі У8А, а найменша - на сталі 45. З глибиною зміцненого шару густина дислокацій різко зменшується. Так, на поверхні білого шару, отриманого на загартованій і низьковідпущеній сталі У8А, густина дислокацій становила  $2-2,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , а у основній структурі – лише  $0,15-0,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Така ж закономірність зміни густини дислокацій у білих шарах, отриманих на інших досліджуваних сталях.

Використання як технологічного середовища мінерального мастила та поверхнево активної полімервмісної мастильно-охолоджувальної рідини МХО-64а не дуже впливає на кількість залишкового аустеніту та густину дислокацій.

Фрикційне зміцнення є ефективним технологічним методом підвищення зносостійкості сталі [6], також ефективно підвищує її опір втомному руйнуванню як на повітрі, так і у корозійному середовищі. Досліди показали, що опір втомному руйнуванню сталі 45 після фрикційного зміцнення зріс у 1,4...1,6 раза, сталі 40Х – у 1,3...1,4 раза, а сталі У8А – у 1,3 раза (рис. 1). При дослідженнях у корозійному середовищі (3 %-й водяний розчин *NaCl*) опір втомному руйнуванню різко збільшився і становив від 3,4...4,1 разів на сталі 45, до 6,6 раза - на сталі У8А. При цьому слід відзначити, що фрикційне зміцнення з використанням як технологічного середовища полімервмісної мастильно-охолоджувальної рідини МХО-64а набагато більше підвищує опір втомному руйнуванню, ніж зміцнення на тих же режимах з використанням мінерального мастила.

Втомна міцність сталей при дослідженнях на повітрі залежить переважно від шорсткості поверхні зразків, величини і знаку залишкових напружень та фізико-механічних властивостей металу. У корозійному середовищі шорсткість поверхні відіграє другорядне значення, основне при цьому мають електрохімічні властивості поверхневих шарів виробу. Також важливі залишкові напруження, менш важлива – міцність металу. Висока міцність металу, отримана після гартування і низького відпуску, часто погіршує опір корозійно-втомному руйнуванню. Білий шар, переважно, має залишкові напруження стиску та більш сприятливі електрохімічні властивості, підвищену в'язкість, опір зародженню і поширенню тріщин порівняно з мартенситом звичайного гартування.

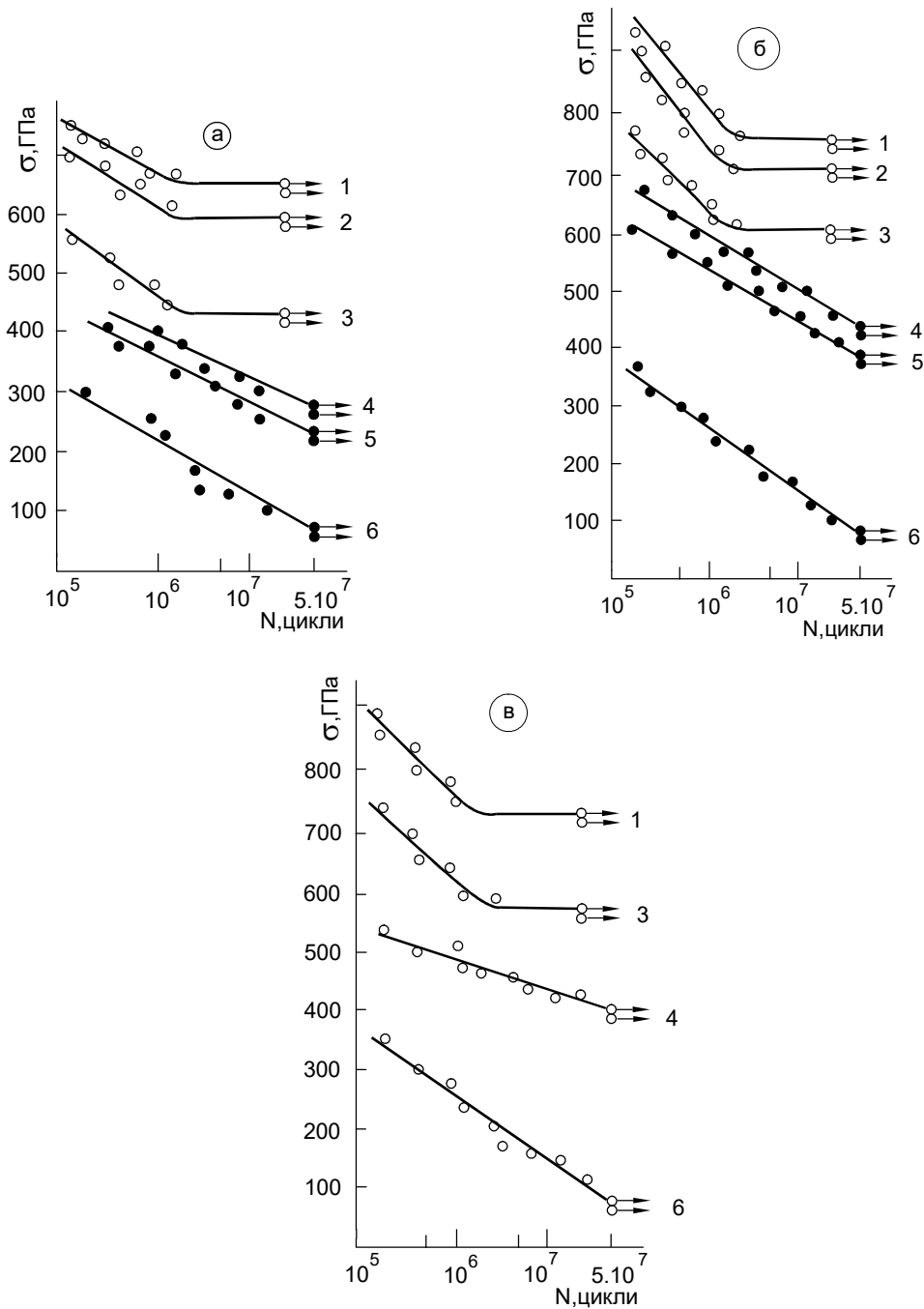


Рис.1. Криві втомного руйнування зразків зі сталей 45 (а), 40Х (б) та У8А (в) у загартованому і низьковідпущеному стані після фрикційного зміцнення у повітрі (1, 2, 3) та корозійному (3 %-й розчин  $NaCl$ ) середовищі (4, 5, 6): 1, 4 – вихідні зразки; 2, 5 – фрикційне зміцнення, мінеральне мастило; 3, 6 – фрикційне зміцнення, МХО-64а.

Дослідження виявили, що при фрикційному зміцненні біля поверхні зразків формуються залишкові напруження стиску. З глибиною величина залишкових напружень зменшується, і вони переходять у розтягуючі. Зона зміни знаку залишкових напружень знаходиться на глибині, значно більшій за товщину білого шару, і проходить на основній структурі металу. При фрикційному зміцненні з використанням як технологічного середовища МХО-64а глибина залягання і величина залишкових напружень є більшими, ніж при зміцненні з використанням мінерального мастила (рис.2).

При електрокорундовому шліфуванні загартованих сталей відбувається частковий відпуск поверхневого шару металу, біля обробленої поверхні формуються

залишкові напруження розтягу, проходить шаржування шліфованої поверхні, що є основною причиною зниження їх опору корозійно-втомному руйнуванню.

Із збільшенням вмісту вуглецю у сталі максимальне значення опору втомному руйнуванню існує в межах його вмісту 0,45...0,65 %, при дослідженнях у корозійному середовищі (3 %-й водяний розчин  $NaCl$ ) опір втомному руйнуванню монотонно спадає. Для зразків із білим шаром властивий інший характер корозійно-втомного руйнування. На кривих залежності втоми від вмісту вуглецю в сталі для зразків з білим шаром також властивий максимум в області 0,45-0,65 % вмісту вуглецю. Зниження опору корозійно-втомному руйнуванню сталі з білим шаром при меншому вмісті в ній вуглецю обумовлене гіршою якістю білих шарів. Підвищений вміст вуглецю у вихідній сталі приводить до збільшення його концентрації в білому шарі, що є однією з основних причин різкого збільшення кількості в ньому залишкового аустеніту і зниження опору корозійно-втомному руйнуванню. Опір сталі корозійно-втомному руйнуванню здебільшого залежить від різних факторів, що впливають на зародження й розвиток корозійних тріщин.

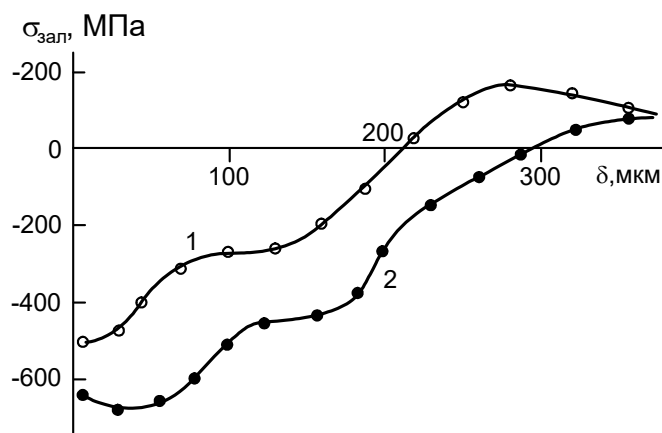


Рис. 2. Залишкові напруження в зразках зі сталі 40X (гартування і низький відпуск) після фрикційного зміцнення з використанням мінерального мастила (1) та МХО-64а (2).

Аналіз зламів фрикційно зміцнених зразків після втомного руйнування виявив, що тріщини зароджуються на границі зміни знаку залишкових напружень і переходу їх у розтягуювальні. При дослідженнях у корозійних середовищах тріщини зароджуються, здебільшого, із поверхні зразка. При зміцненні загартованих і низьковідпущених сталей під білим шаром є зона з пониженою твердістю, меншою, ніж мартенсит серцевини. Зона з пониженою твердістю утворюється за рахунок того, що при зміцненні метал нагрівається до температур, нижчих, ніж для утворення білого шару, але достатніх для відпуску попередньо загартованої структури. Дана зона є буферним прошарком, у якому при циклічному навантаженні відбуваються пластичні зсуви, що забезпечують зниження піків навантажень та зменшують можливість виникнення тріщин та відшарування білого шару.

Весь комплекс фізико-механічних властивостей, що мають білі шари (підвищена мікротвердість, в'язкість, кількість залишкового аустеніту, густина дислокацій, залишкові напруження стиску та інші) приводить до блокування процесів утворення та поширення мікротріщин у поверхневих шарах деталей машин. У корозійному середовищі за рахунок більшої гомогенності структури білого шару, а також оптимальніших електрохімічних характеристик, сповільнюються процеси корозії поверхні металу.

В експлуатації деталі машин можуть працювати як при низьких, так і високих температурах. Для оцінки стабільності зміцнених шарів при експлуатації були виконані дослідження після додаткової термічної обробки, що полягала у штучному старінні – нагріванні до температури 150 °С і витримці 2 год, а також охолодженні у рідкому азоті

протягом 2 год. Експерименти виявили, що штучне старіння та обробка холодом незначно підвищують опір втомному і корозійно-втомному руйнуванню зміцнених зразків. В усіх досліджуваних сталей це підвищення становило приблизно 6...8 %.

Дослідження виявили, що фрикційне зміцнення значно підвищує опір втомному руйнуванню досліджуваних сталей як на повітрі, так і у корозійному середовищі. При використанні як технологічного середовища поверхнево активної полімервмісної мастильно-охолоджувальної рідини МХО-64а при фрикційному зміцненні опір втомному та корозійно-втомному руйнуванню більший, ніж при зміцненні з використанням мінерального мастила. При цьому дуже важливі фізико-механічні властивості отриманого зміцненого шару.

*It's shown, that the friction hardening of steel 45, 40H and U8A essentially increases the fatigue failure when conduction reseach both in the air and in the corrosion environment (3% water solution of NaCl). The durability increases about 1.3-1.6 times at air and 3.4-6.6 times at the corrosion environment.*

### Література

1. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. - М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
2. Обработка поверхности и надежность материалов / Пер. с англ. /Под ред. Дж.Бурке, Ф.Вайса. - М.: Мир, 1984. - 192 с.
3. Пашечко М.І., Гурей І.В. Вплив хімічного складу на параметри поверхневого шару при фрикційному зміцненні // Металознавство та обробка металів. – 1999. - № 4. – С. 19-23.
4. Каличак Т.Н., Гурей И.В., Товтин М.Д. Установка для испытаний на коррозионную усталость образцов при стационарном и циклическом нагреве // Заводская лаборатория. – 1982. - № 8. – С. 65-66.
5. Бабей Ю.И., Швец В.В., Гурей И.В. Упрочнение поверхностных слоев стальных и чугуновых деталей фрикционной обработкой // Вестник машиностроения. – 1987. - № 10. – С. 39–40.
6. Гурей І.В., Пашечко М.І. Зносостійкість сталі та чавуну при реверсивному терті після фрикційного зміцнення // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 1999. - № 1. – С. 52-55.

Одержано 15.05.2000 р.