

Вакуумная установка, насос, камера, вакуумный баллон, эффективность.

The analysis of the existing technical solutions is shown and there are proposed a number of new technical solutions that improve the performance and reliability of the vacuum systems of milking machines.

Vacuum system, pump, camera, vacuum balloon, effectiveness.

УДК 669.017.002

**ВПЛИВ ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ В ЦЕМЕНТОВАНОМУ ШАРІ
НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛІ**

О.Є. Семеновський, кандидат технічних наук

Виявлені закономірності впливу розподілу внутрішніх напружень в поверхневому зміцненому прошарку деталей після цементації та гартування, на рівень контактної втомної міцності сталі. Встановлено, що екстремальний характер зміни стискаючих внутрішніх напружень провокує виникнення концентраторів напружень, які спричиняють зародження мікротріщин, що знижує експлуатаційні властивості сталі.

Цементация, гартування, стискаючі напруження, експлуатаційні властивості, пitting.

Постановка проблеми. В результаті проведення зміцнюючої хіміко-термічної обробки в деталях, як на поверхні, так і в серцевині, утворюються залишкові напруження, величина і напрямки яких визначаються процесами, що відбуваються при охолодженні. Залишкові напруження можуть знижувати чи підвищувати конструктивну міцність, тому аналіз характеру їх розподілення в поверхневому прошарку зміцнених деталей надасть можливість визначати загальний рівень експлуатаційних властивостей цементувальних сталей.

Аналіз останніх досліджень. Можна стверджувати, що залишкові напруження будуть бажаними в тому випадку, коли їх напрямок буде протилежним напрямку напружень, що виникають у процесі експлуатації виробів.

Відомо [1, 2], що наявність стискаючих напружень на поверхні деталей підвищує втомну міцність і, навпаки, наявність розтягуючих

© О.Є. Семеновський, 2015

напружень, її знижує. У цьому зв'язку деталі, що піддаються в процесі експлуатації високим контактним знакозмінним навантаженням, свідомо піддають зміцнюючим обробкам, за допомогою яких можна створити на поверхні деталі стискаючі напруження [1].

На величину і напрямок залишкових напружень можна впливати шляхом зміни коефіцієнта розміцнення сталі в перший період мартенситного перетворення, в залежності від вмісту вуглецю, кількості залишкового аустеніту й умов охолодження [2].

Якщо розглядати залишкові напруження з погляду фізико-механічних властивостей стиснутого матеріалу, то за інших рівних умов, вони будуть зменшуватися зі зниженням границі плинності, коефіцієнта термічного розширення, з підвищенням структурної однорідності, зниженням температури рекристалізації, зменшенням релаксаційної стійкості і, нарешті, зменшенням розходження в питомих об'ємах структурних складових сталі у вихідному та зміцненому станах [3, 4].

Встановлено, що зниження швидкості охолодження в температурному інтервалі протікання мартенситного перетворення в значній мірі зменшує залишкові напруження. Так, при переході від гартування у воді до гартування в маслі, залишкові напруження зменшуються в 4–6 разів, при гартуванні на повітрі – у 10 разів, при переході від гартування в маслі до гартування в гарячих середовищах – у 3–4 рази [4]. Однак при цьому не пов'язується рівень внутрішніх напружень з експлуатаційними властивостями матеріалу, а визначаються лише технологічні характеристики, такі як тріщиностійкість та рівень деформації.

Виходячи з того, що в процесі підвищення температури відпуску попередньо загартованої сталі підвищується ефективність зниження залишкових напружень, то наслідком цього буде зниження зносостійкості, яка прямо залежить від поверхневої твердості.

Мета досліджень. Встановити закономірності впливу величини та характеру внутрішніх напружень в поверхневому зміцненому прошарку деталей після хіміко-термічної обробки, на рівень контактної втомної міцності сталі.

Результати досліджень. З метою визначення величини внутрішніх напружень у зміцненому шарі комплексно-легованих сталей після хіміко-термічної обробки застосовувалася методика виміру прогину зразка після видалення визначеної товщини зміцненого шару. Для проведення досліджень були виготовлені зразки, що представляють собою бруски прямокутного перерізу 10×14 мм (рис. 1). Зразки були зміцнені хіміко-термічною обробкою, яка включала цементацію при температурі 930°C на протязі 10 годин, та гартування в оливі з низьким відпуском (200°C на протязі 2-х годин). Глибина це-

ментації складала 0,9...1,1 мм. Щоб на точність виміру не впливали внутрішні напруження в бічних гранях зразків, вони були зішліфовані на глибину 2 мм.

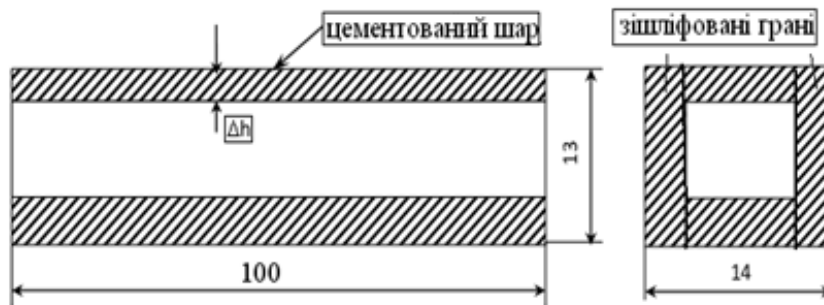


Рис. 1. Ескіз зразка для досліджень внутрішніх напружень.

Суть методу виміру внутрішніх напружень полягає в тому, що у вихідному стані напруження на двох протилежних сторонах зразка взаємно рівноважуються.

При видаленні зміцненого шару з однієї з граней на визначену глибину, зразок вигинається під дією внутрішніх напружень зміцненого шару протилежної сторони.

Для зменшення впливу механічних факторів на точність досліджень при знятті зміцненого шару застосовувався метод багаторазового травлення 20% спиртовим розчином азотної кислоти.

При виведенні формули для розрахунку величини внутрішніх напружень виходили із залежності крутного моменту, що згинає брусок, викликаного невірноваженими напруженнями стиску в напрямку подовжньої осі бруска після видалення визначеного шару з протилежної сторони зразка і механічними властивостями матеріалу, виходячи з цього:

$$M_x = \frac{E_I \cdot I}{\rho}, \quad (1)$$

де: M_x – крутний момент; E_I – модуль пружності першого роду; I – момент інерції перерізу бруска; ρ – радіус прогину зразка.

Зазначені величини визначають з наступних рівнянь:

$$M_x = \frac{N_x \cdot h}{2}; \quad (2)$$

$$I = \frac{bh^3}{12}; \quad (3)$$

$$\rho = \left(\frac{l}{2}\right)^2 + (\rho - \Delta x)^2; \quad (4)$$

де: N_x – зусилля, викликане напруженням стиску в напрямку подовжньої осі бруска;

x – величина прогину після видалення прошарку, у якому визначаються напруження;

h – товщина бруска після зняття прошарку, у якому визначають напруження;

b – ширина бруска;

l – довжина бруска;

зважаючи на те, що:

$$\sigma_H = \frac{N_x}{b\Delta h} \quad (5)$$

де: σ_H – напруження в досліджуваному прошарку;

$b\Delta h$ – площа перерізу видаленого прошарку;

можемо вивести наступну залежність для визначення внутрішніх напружень у зміцнених прошарках:

$$\sigma_H = \frac{4E \cdot h^2 \cdot \Delta x}{3l^2 \cdot \Delta h} \quad (6)$$

Для підвищення точності запропонованого методу при вимірі прогину використовувався інструментальний мікроскоп УИМ-1, що забезпечує точність вимірів до 10^{-4} мм.

Розподіл напружень у цементованному шарі після хіміко-термічної обробки досліджувався шляхом з травлення поверхонь зразків з однієї сторони в розчині азотної кислоти, з наступним ручним шліфуванням, для зняття окисної плівки. Після декількох циклів травлення вимірювалась товщина зразка, а за цим показником визначалась глибина з травленого прошарку, в якому і визначалась сумарна величина залишкових внутрішніх напружень, що є наслідком процесів, які відбуваються при гартуванні.

Для встановлення взаємозв'язку напруженості поверхневого зміцненого шару з іншими параметрами, котрі визначалися в ході вивчення процесів, що відбуваються при термічній обробці деталей, для дослідження величини залишкових напружень у зміцненому шарі, були обрані сталі з тими ж композиціями легуючих елементів, що і для визначення прогартуваності і механічних властивостей [5]. Результати обмірювання зразків після з травлення частини цементованного шару, а також розрахунків внутрішніх напружень у вилучених прошарках металу, зведені в табл. 1.

Найбільші напруження на поверхні має сталь 15ХГН4, в порівнянні з нею сталь 12ХНЗА має нижчий рівень залишкових напружень, що пояснюється зниженням ступеню її легування. Найнижчі залишкові напруження в поверхневому шарі сталі 15ХГН, яка містить найменшу кількість нікелю. У розробленій нами сталі 15ХГНБТЧ напруження в поверхневому шарі нижчі, ніж у високолегованої сталі 15ХГН4 і знаходяться майже на одному рівні із серійною сталлю

12ХН3А. Про порівняння ступеню легованості цих сталей важко говорити, тому що титан і ніобій у малих кількостях значно сильніше зміцнюють сталь, ніж нікель.

1. Розподіл внутрішніх напружень у зміцненому шарі.

| Марка сталі | Глибина вимірювання, мм | Зміна прогину, мкм | Напруження σ_B , кПа |
|-------------|-------------------------|--------------------|-----------------------------|
| 12ХН3А | 0,1 | 21,1 | 86,7 |
| | 0,3 | 19,4 | 78,4 |
| | 0,5 | 10,9 | 41,8 |
| | 0,7 | 4,1 | 16,2 |
| | 0,9 | 1,2 | 4,3 |
| 15ХГН4 | 0,1 | 23,8 | 98,2 |
| | 0,3 | 22,9 | 90,2 |
| | 0,5 | 9,8 | 38,2 |
| | 0,7 | 3,9 | 14,9 |
| | 0,9 | 1,5 | 5,2 |
| 15ХГН | 0,1 | 9,9 | 46,5 |
| | 0,3 | 6,6 | 27,9 |
| | 0,5 | 5,5 | 22,7 |
| | 0,7 | 1,7 | 6,7 |
| | 0,9 | 1,1 | 3,5 |
| 15ХГНБТЧ | 0,1 | 19,7 | 79,9 |
| | 0,3 | 11,0 | 43,7 |
| | 0,5 | 5,3 | 20,7 |
| | 0,7 | 1,1 | 4,0 |
| | 0,9 | 0,1 | 0,4 |
| 18ХГТ | 0,1 | 15,3 | 63,2 |
| | 0,3 | 13,9 | 55,4 |
| | 0,5 | 3,7 | 14,2 |
| | 0,7 | 3,6 | 13,5 |
| | 0,9 | 1,1 | 4,0 |

Підтвердженням цих міркувань може бути порівняння рівнів залишкових напружень у сталей 15ХГН і 18ХГТ, з меншим вмістом легуючих елементів. Як бачимо сталь, що містить лише 0,05% титану, має в 1,5 рази вищий рівень внутрішніх напружень у поверхневому шарі, ніж сталь з 1% нікелю. Однак, якщо порівнювати величину внутрішніх напружень у комплексно-легованій сталі 15ХГНБТЧ і сталі легованій трьома відсотками нікелю – 12ХН3А з їх механічними властивостями [5], то тут є деякі невідповідності, тобто сталі з практично

однаковою величиною внутрішніх напружень мають різний рівень характеристик міцності.

Це пояснюється тим, що механічні характеристики визначалися згідно стандартним методикам випробувань на зразках зміцнених об'ємним гартуванням і низьким відпуском, а поверхневий шар, у якому визначалися внутрішні напруження, був зміцнений цементациєю і, як наслідок, відрізнявся і хімічним складом, і структурою.

Крім того, відповідно до робочої гіпотези, величина залишкових внутрішніх напружень повинна бути зв'язана саме з мікротвердістю структури поверхневого зміненого прошарку. Але якщо ми порівняємо отримані дані з результатами досліджень контактної втомної міцності сталі, отриманими в лабораторних умовах (6), то ми побачимо невідповідність результатів цих досліджень. У всякому разі, коли за критерій визначення напружень приймати їх максимальну величину на поверхні. Однак, на контактну втомну міцність, яка є визначальною характеристикою експлуатаційних властивостей шестерень впливають напруження, що виникають у всьому поперечному перерізі, а також, як свідчать подальші дослідження, характер зміни цих напружень.

З цієї причини в нашій роботі напруження визначалися не тільки на поверхні, але й по всій глибині зміцненого шару. Для вивчення характеру зміни абсолютної величини залишкових внутрішніх стискаючих напружень були побудовані графічні залежності (рис. 2).

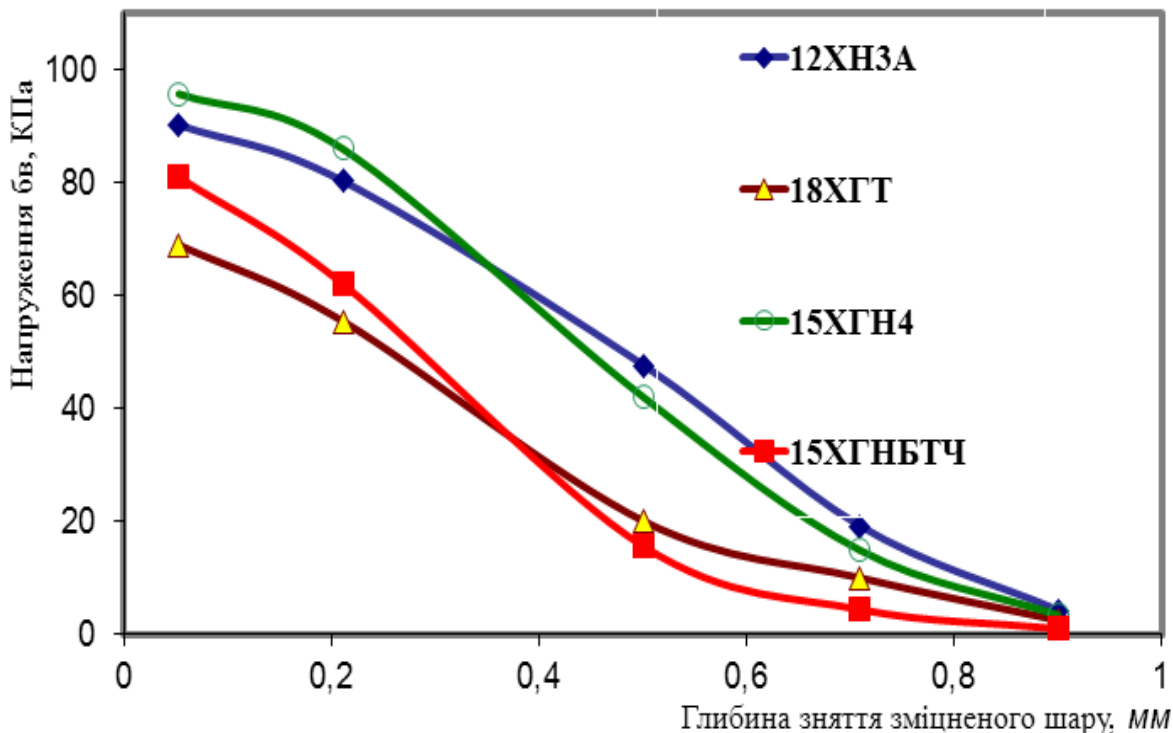


Рис. 2. Розподіл залишкових стискаючих напружень у зміцненому шарі.

Характер отриманих кривих дозволяє говорити про те, що комплексно-легована сталь 15ХГНБТЧ має більш різке зниження рівня напружень, по мірі віддалення від поверхні, у порівнянні з рештою досліджених нами композицій цементувальних сталей.

Комп'ютерна обробка сумарної величини напружень усього зміцненого шару показала, що цей показник у сталі 12ХНЗА значно вищий, ніж у сталі легової меншою кількістю нікелю, але з додатковим введенням таких легуючих елементів, як титан і ніобій, які утворюють карбідну фазу, стійку до високих температур.

Проведені нами мікроструктурні дослідження (201), показали значно більшу дисперсність структурних складових сталі 15ХГНБТЧ, що має найбільш високий рівень контактної втомної міцності в порівнянні з рештою досліджених нами композицій цементувальних сталей. Аналіз отриманих кривих, які описують зміну залишкових внутрішніх напружень вказує на те, що сталь яка має більш рівномірний характер зниження напруженого стану від поверхні до серцевини (тобто крива має більш пологий характер, наближаючись до прямої) має і найвищий рівень експлуатаційних властивостей.

Це пояснюється тим що, якщо зміна напружень має поступовий характер, без різких змін, що характеризується графічно відсутністю перепадів, екстремумів на кривих, то вірогідність виникнення концентраторів напружень в поверхневому зміцненому прошарку значно нижча. А саме наявність концентраторів напружень призводить до зародження і розповсюдження тріщин, які є причиною контактної втоми матеріалу поверхні деталі – пітингу.

Однак рекомендувати цю характеристику для визначення експлуатаційних характеристик сталі недоцільно з двох причин. По-перше, величина залишкових внутрішніх напружень лише побічно пов'язана з характеристиками структурних складових, які отримуємо в процесі термічної обробки, і є некерованим параметром стану поверхні. По-друге, її визначення пов'язане зі значними технічними складнощами. У той же час, як якісна характеристика, вона підтверджує отримані нами результати при дослідженні експлуатаційних властивостей сталей з різними композиціями легуючих елементів. Хоча з точки зору об'ємних характеристик матеріалу цей параметр має визначальне значення, особливо з точки зору тісного зв'язку цієї величини з твердістю поверхневих зміцнених шарів та зі зносостійкістю матеріалів.

Висновок. В роботі встановлена залежність стійкості сталі проти утворення пітингу від характеру зміни внутрішніх напружень, отриманих в процесі хіміко-термічної обробки. Отримані результати свідчать, що якщо рівень напруженості в цементованому прошарку знижується поступово, що характеризується графічно відсутністю

екстремумів на кривих, то вірогідність виникнення концентраторів напружень в поверхневому зміцненому прошарку значно нижча.

Список літератури

1. Кузьмин Г.К. Формирование остаточных напряжений при мартенситном превращении стали / Г.К. Кузьмин // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1986. – № 2. – С. 7–11.
2. Абрамов В.В. Влияние разупрочнения стали в начальный период мартенситного превращения на образование остаточных закалочных напряжений / В.В. Абрамов, А.П. Романиченко, О.Г. Зорькин, К.А. Коваленко, А.Л. Шишканова // *Запорожский машиностроительный институт.* – 1998. – II с. – Библиогр. – Деп. в ГНТБ Украины 13.07.96. – № 1474 – Ук 93.
3. Башнин Ю.А. Технология термической обработки / Ю.А. Башнин. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 3–99.
4. Pan H.H., Weng G.J. Thermal stress and volume change during a cooling process involving phase transformation // *I. Therm.Stresses.* – 1992. – 15, № 1. – С. 1–23.
5. Семеновський О.Є. Підвищення механічних характеристик низько вуглецевої сталі шляхом подрібнення зернової структури / О.Є. Семеновський // *Металознавство та обробка металів.* – 2013. – №1. – С. 120–123.
6. Семеновський О.Є. Утворення та ріст тріщин під час контактної втоми сталей / О.Є. Семеновський // *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* – 2000. – №4. – С. 120–121.

Выявлены закономерности влияния распределения внутренних напряжений в поверхностной упрочненной прослойке деталей после цементации и закалки, на уровень контактной прочности стали. Установлено, что экстремальный характер изменения сжимающих внутренних напряжений провоцирует возникновение концентраторов напряжений, которые провоцируют зарождение микротрещин, которые снижает эксплуатационные свойства стали.

Цементация, закалка, сжимающие напряжения, эксплуатационные свойства, пitting.

The regularities of influence of distribution of internal pressures in surface hardened layer of parts after carburizing and hardening are derived. The level of steel contact fatigue hardness is kept during experiments. It was found that extreme changes of compressive internal pressures provokes the pressures concentrators which cause forming of microcracks and that reduces the operational performance of steel.

Carburizing, hardening, compressive stress, operational performance, pitting.