

УДК 539.388.2

О. Г. Попович, канд. техн. наук В. Г. Шевченко

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО СПІВВІДНОШЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОПЕРЕДНЬОГО ТА ОСТАТОЧНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

З застосуванням аналізу розмірностей до процесу поверхневого пластичного деформування отримано раціональне співвідношення сил деформування і співвідношення подач при попередньому та остаточному зміцненні деталі робочими тілами різних розмірів. Втомні випробування вигладжених зразків показали ефективність запропонованого способу зміцнення деталей.

Ключові слова: поверхнєве пластичне деформування, сила деформування, подача, радіус кривизни, втомні випробування.

Вступ

Завдання підвищення надійності та довговічності деталей набуває все більшого значення у зв'язку зі зростанням напруженості у конструкціях сучасних машин. Ефективним методом підвищення опору деталі втомі є зміцнення поверхневим пластичним деформуванням, при якому в поверхневому шарі деталі виникають сприятливі залишкові напруження стиску [1].

Для підвищення зміцнювального ефекту від поверхневого пластичного деформування збільшують у допустимих межах силу деформування, а також застосовують два (іноді – три) робочі ходи. При цьому, сила деформування не повинна перевищувати критичного значення, за якого відбувається перенаклепування поверхні деталі.

Раніше ми обґрунтували, що, використовуючи для поверхневого пластичного деформування робочі тіла з більшими або з меншими радіусами кривизни робочих поверхонь, можна наводити в поверхневому шарі деталі залишкові напруження стиску з екстремумом на більшій або на меншій глибині. Застосувавши скінченноелементне моделювання, ми дослідили характер розподілу залишкових напружень по глибині у поверхневому шарі деталі з пружно-пластичного матеріалу після обкочування поверхні деталі лише одним та послідовно двома циліндричними роликками з різними радіусами.

Результати зазначеної роботи показали можливість вдосконалення розподілу залишкових напружень у поверхневому шарі деталі шляхом проведення попереднього та остаточного зміцнення більшим і меншим робочими тілами, до яких прикладали відповідно більше й менше зусилля деформування. Крім того, встановлено раціональну послідовність зміцнення.

Оскільки залишкові напруження стиску в поверхневому шарі сповільнюють зародження та розвиток втомних тріщин, то проведення попереднього та остаточного зміцнення у запропонований нами спосіб сприятиме додатковому підвищенню втомної довговічності деталі у порівнянні з однократним зміцненням.

Постановка завдання

З науково-технічної літератури відомі конструкції інструментів, які дозволяють проводити попереднє та остаточне зміцнення деталі робочими тілами з різними радіусами кривизни робочих поверхонь. Але в цих інструментах більші та менші робочі тіла притискаються до деталі з однаковими силами і рухаються з однаковими подачами. Наприклад, у двохрядному кульовому розкатнику з підпружиненими опорними конусами [1], які мають однакові кути між твірною конуса та його віссю, сила притискання від пружини однаково передається на кулі першого та другого рядів. В інструменті для вигладжування, що являє собою підпружинену вилку, яка несе алмази з різними радіусами [1], внаслідок рівності плеч вилки, сили притискання алмазів до поверхні деталі будуть однаковими.

Недоліком способів зміцнення такими інструментами є те, що більші робочі тіла створюють на площадці контакту невеликий тиск, а тому наводять у деталі недостатньо високі залишкові напруження стиску. Крім того, в багатьох випадках доцільно для робочих тіл з більшими радіусами кривизни призначити більшу подачу.

Мета цієї роботи – визначити раціональне співвідношення сил деформування і співвідношення подач при попередньому та остаточному зміцненні деталі робочими тілами з різними радіусами, а також експериментально перевірити отримані результати.

Зміст і результати дослідження

В роботі [2] застосовано теорію подібності й аналіз розмірностей до визначення коефіцієнта зміцнення при поверхневому пластичному деформуванні деталі одним робочим тілом (кристалом алмазу).

У нашій роботі застосуємо аналіз розмірностей для співставлення залежностей залишкових напружень від глибини h , яка відраховується від поверхні деталі, після зміцнення її більшим та меншим робочими тілами. При цьому до системи факторів, які визначають фізичну сутність процесу зміцнення, включимо величини, якими характеризуються пружно-пластичні властивості матеріалу деталі та пружні властивості матеріалу робочого тіла. Будемо вважати, що пружньо-пластичні властивості матеріалу деталі описуються діаграмою деформування з лінійним зміцненням [3].

Розглянемо випадок, коли головні радіуси кривизни робочої поверхні зміцнювальних тіл малі у порівнянні з головними радіусами кривизни оброблюваної поверхні деталі (наприклад, алмазне вигладжування вала). Крім того, будемо вважати, що для попереднього та для остаточного зміцнення використовуються геометрично подібні робочі тіла. Тоді геометричним параметром, який суттєво впливає на процес зміцнення, є один з головних радіусів кривизни R робочого тіла. Другий головний радіус кривизни пропорційний до першого, зокрема дорівнює першому, якщо робоча поверхня зміцнювального тіла є сферичною.

Тоді величину будь-якого компонента тензора залишкових напружень на глибині h від поверхні деталі можна подати у вигляді функціональної залежності:

$$\sigma_h = \phi(h, R, Q, s, E, \sigma_T, E_T, \nu, E_1, \nu_1, \mu), \quad (1)$$

де Q – сила притискання робочого тіла до деталі;

s – подача інструмента на один оберт або на подвійний хід;

E і E_T – відповідно модуль Юнга та модуль зміцнення матеріалу деталі;

σ_T – границя текучості матеріалу деталі;

ν і ν_1 – коефіцієнти Пуассона матеріалів деталі та робочого тіла відповідно;

E_1 – модуль Юнга матеріалу робочого тіла зміцнювального інструменту;

μ – коефіцієнт тертя між робочим тілом і деталлю (якщо розглядається зміцнення деталі обкочуванням, то вплив μ на залишкові напруження несуттєвий і його можна не брати до уваги).

Оскільки при зміні швидкості головного руху зміцнювальної обробки залишкові деформації та напруження змінюються несуттєво [1], то вплив цієї швидкості на залишкові напруження не будемо брати до уваги.

Серед величин, що входять у функціональну залежність (1), за величини з незалежною розмірністю виберемо R і Q . Розмірності інших величин виразимо через розмірності $[R]$ і $[Q]$:

$$[h] = [R], [s] = [R], [E] = [Q] \cdot [R]^{-2},$$

$$[\sigma_T] = [Q] \cdot [R]^{-2}, [E_T] = [Q] \cdot [R]^{-2},$$

$$[\nu] = 1, [E_1] = [Q] \cdot [R]^{-2}, [\nu_1] = 1,$$

$$[\mu] = 1.$$

Таким чином, з $n = 12$ величин, суттєвих для розгляданого процесу зміцнення відповідно до (1), дві величини ($k = 2$) мають незалежну розмірність. Тоді, згідно π -теорема [4], функціональна залежність (1) після приведення до безрозмірного вигляду буде містити $n - k = 10$ безрозмірних величин:

$$\frac{\sigma_h \cdot R^2}{Q} = \Phi_0 \left(\frac{h}{R}, \frac{s}{R}, \frac{E \cdot R^2}{Q}, \frac{\sigma_T \cdot R^2}{Q}, \frac{E_T \cdot R^2}{Q}, \nu, \frac{E_1 \cdot R^2}{Q}, \nu_1, \mu \right). \quad (2)$$

Далі, розглядаючи зміцнення однакових деталей робочими тілами з різними радіусами, але з однакового матеріалу, маємо вважати:

$$E = \text{const}, \sigma_T = \text{const}, E_T = \text{const}, \nu = \text{const},$$

$$E_1 = \text{const}, \nu_1 = \text{const}, \mu = \text{const}.$$

Тоді функціональну залежність (2) можна переписати так:

$$\sigma_h = \frac{Q}{R^2} \cdot \Phi_1 \left(\frac{h}{R}, \frac{Q}{R^2}, \frac{s}{R} \right). \quad (3)$$

З формули (3) випливає, що для того, щоб функціональні залежності залишкових напружень від глибини, віднесеної до радіуса робочого тіла

$\frac{h}{R}$, були однаковими після зміцнення деталей

більшим робочим тілом з радіусом R та меншим робочим тілом з радіусом r , необхідно задовольнити двом співвідношенням:

$$\frac{Q_r}{r^2} = \frac{Q_R}{R^2} \quad \text{і} \quad \frac{s_r}{r} = \frac{s_R}{R}.$$

Звідси знаходимо орієнтовне співвідношення

сил притискання робочих тіл до деталі Q_R і Q_r та співвідношення подач S_R і S_r відповідно при попередньому та при остаточному зміцненні:

$$\frac{Q_r}{Q_R} = \frac{r^2}{R^2} \quad \text{і} \quad \frac{S_r}{S_R} = \frac{r}{R}.$$

Ми провели експериментальне порівняння зміцнювальних ефектів від вищеописаного існуючого способу та від запропонованого нами способу зміцнення деталі поверхневим пластичним деформуванням.

Зразки для експериментів виготовили з гарячекатаного прутка зі сталі 30ХГСА. Форма зразків – 1 відповідно до ГОСТ 25.502-79. Зразки обточували, потім шліфували до необхідних розмірів. Мікроструктура матеріалу зразків на поверхні та в серцевині – сорбіт, твердість HRC20...21.

Номінальний діаметр зразків у найменшому перетині 7,5 мм; фактичні значення діаметрів зразків вимірювали на малому інструментальному мікроскопі. Перед проведенням втомних випробувань для кожного зразка за фактичним значенням його діаметра розраховували величину навантаження, яке встановлювали на машині для втомних випробувань. Завдяки цьому рівень напружень при випробуванні всіх зразків залишався постійним.

Нами проведено випробування трьох груп зразків: зразки після шліфування (не зміцнені), зразки, зміцнені алмазним вигладжуванням, відповідно існуючого способу, та відповідно запропонованого способу. Для зміцнення було використано вигладжувачі, в яких кристали алмазу мали сферичні робочі поверхні з радіусами $R_{сф} = 2,5$ мм і $r_{сф} = 1,0$ мм. Режими алмазного вигладжування наведено у таблиці 1, змащувально-охолоджуюча рідина для вигладжування – мастило індустріальне 20. При остаточному вигладжуванні силу деформування було збільшено у порівнянні зі

значенням $\left(Q_R \cdot \frac{r^2}{R^2} \right)$, оскільки матеріал зраз-

ка зміцнюється при попередньому вигладжуванні.

Відомо, що зносостійкість зразків, при зміцненні яких напрямком зсувного деформування при вигладжуванні був протилежний до напрямку деформування при різанні, виявилася суттєво вищою за зносостійкість зразків, при зміцненні яких обидва напрямки деформування збігалися [5]. Тому, в наших експериментах зміцнення було проведено таким чином, що напрямком дотичної до поверхні зразка сили, яка діяла на нього під час вигладжування, був протилежний до напрямку дотичної сили, яка діяла на зразок з боку шліфувального круга під час шліфування.

Втомні випробування проведено відповідно до ГОСТ 25.502-79 в умовах циклічного згинання зразка, який обертається, на машині МУИ-6000 (частота навантаження 100 циклів за 1 секунду). Безпосередньо перед випробуванням поверхню зразка, який встановлено на машині МУИ-6000, очищували спиртом від залишків мастила та витирали насухо. Цикл напружень у зразку при випробуванні на цій машині є симетричним. Максимальне нормальне напруження від згинання в поперечному перетині зразка, яке має місце на його поверхні, становило 495 МПа.

Статистична обробка результатів експериментів показала наступне. Середнє значення логарифма довговічності у групи зразків, зміцнених за існуючим способом $\overline{\lg N}^{3M} = 5,42$, було більше, а середньоквадратичне відхилення логарифма довговічності $S_{\lg N}^{3M} = 0,13$ було менше, ніж

відповідні значення $\overline{\lg N}^{\text{шліф}} = 4,92$ і $S_{\lg N}^{\text{шліф}} = 0,15$ у групи зразків після шліфування. Середнє значення логарифма довговічності у групи зразків, зміцнених відповідно запропонованого нами способу $\overline{\lg N}^{\text{пач}} = 5,83$, було більше, а середньоквадратичне відхилення логарифма довговічності $S_{\lg N}^{\text{пач}} = 0,10$ було менше, ніж указані значення у групи зразків, зміцнених за існуючим способом.

Таблиця 1 – Параметри і режими зміцнення вигладжуванням

Способи зміцнення	Стадії зміцнення	Радіус алмазу	Сила деформування	Подача	Частота обертів шпинделя
Існуючий спосіб	попереднє зміцнення	$R_{сф} = 2,5$ мм	50Н	$0,08 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$	$800 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$
	остаточнє зміцнення	$r_{сф} = 1,0$ мм	50Н	$0,08 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$	$800 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$
Запропонований спосіб	попереднє зміцнення	$R_{сф} = 2,5$ мм	200Н	$0,08 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$	$800 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$
	остаточнє зміцнення	$r_{сф} = 1,0$ мм	50Н	$0,04 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$	$800 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$

Висновки

Таким чином, результати проведених теоретичних досліджень узгоджуються з даними, що отримані експериментально. На прикладі втомних випробувань зразків, зміцнених алмазним вигладжуванням, показано ефективність зміцнення поверхневим пластичним деформуванням відповідно запропонованого способу.

Список літератури

1. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов. — М. : Машиностроение, 1987. — 328 с.
2. Богуслаев В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, В. Ф. Притченко ; под ред. Б. А. Грязнова. — К. : Манускрипт, 1993. — 334 с.
3. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. — М. : Машиностроение, 1975. — 400 с.
4. Гухман А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. — М. : Высшая школа, 1963. — 400 с.
5. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. — М. : Машиностроение, 1978. — 152 с.

Поступила в редакцию 24.05.2011

Попович А.Г., Шевченко В.Г. Определение рационального соотношения параметров предварительного и окончательного поверхностного пластического деформирования

С применением анализа размерностей к процессу поверхностного пластического деформирования получено рациональное соотношение сил деформирования и соотношение подач при предварительном и окончательном упрочнении детали рабочими телами разных размеров. Усталостные испытания выглаженных образцов показали эффективность предложенного нами способа упрочнения деталей.

Ключевые слова: *поверхностное пластическое деформирование, сила деформирования, подача, радиус кривизны, усталостные испытания.*

Popovich A., Shevchenko V. Definition of the useful ratio between parameters of the preliminary and final surface strain hardening

The useful ratio between deforming forces and the feed ratio at preliminary and final part strengthening by means of working elements of different size are obtained with application of dimensional theory to a surface strain hardening process. Fatigue tests of the burnished specimens proved efficiency of the method which we had proposed for part strengthening.

Key words: *surface strain hardening, deforming force, feed, curvature radius, fatigue tests.*