

К. С. Барандич, С. П. Вислоух, В. С. Антонюк*

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”,

м. Київ, Україна

**vp@kpi.ua*

Забезпечення циклічної довговічності деталей при фінішному токарному обробленні інструментом із кубічного нітриду бору

Представлено дослідження взаємозв'язку стану поверхневого шару деталі зі сталі 40Х, що сформований при фінішному токарному обробленні інструментом із цільних модифікацій нітриду бору, та його циклічної довговічності. Вперше отримано математичну модель, яка показує залежність циклічної довговічності від режимів токарного оброблення деталей інструментом із кубічного нітриду бору. Обґрунтовано можливість фінішного токарного оброблення відповідальних деталей, що працюють під впливом навантажень, змінних за величиною і напрямком.

Ключові слова: *циклічна довговічність, якість поверхневого шару, фінішне токарне оброблення, кубічний нітрид бору.*

ВСТУП

В даний час при оброблюванні металів різанням спостерігається тенденція заміни шліфування фінішною обробкою деталей точінням [1]. При цьому використовуються інструменти з різальною частиною з надтвердих матеріалів, зокрема з полікристалічного кубічного нітриду бору [2–6], які забезпечують прецизійне оброблення відповідальних деталей, до яких пред'являються високі вимоги за експлуатаційними властивостями.

До таких деталей відносяться вали, осі, шатуни, пальці, шестерні, ротори та їх кріпильні елементи, зубчаті колеса, підшипники, диски тощо, які працюють під дією навантажень змінних за величиною та напрямком. Зокрема, у валах та осях під час роботи навіть при постійних зовнішніх навантаженнях виникають знакозмінні напруження згину симетричного циклу, що можуть призвести до їхнього втомного руйнування. При цьому опір втомі деталей залежить від їхніх абсолютних розмірів (масштабного коефіцієнту), концентрації напружень, впливу зовнішнього середовища, схеми та частоти навантаження, а також від стану їхнього поверхневого шару. Однією з основних характеристик опору втомі є циклічна довговічність [7–9].

Оброблення точінням і шліфуванням супроводжується наклепом і формуванням залишкових напружень стиску або розтягу різних інтенсивності та глибини залягання. Швидкісне різання формує залишкові напруження стиску, а силове – розтягу; шліфування абразивними кругами – розтягу, а алмазними – стиску. До того ж при точінні, як і при механо-ультразвуковому, електроерозійному і лазерному оброблюванні деталей, можна отримати так звані

“білі” поверхневі шари [10], які значно підвищують корозійно-механічну міцність, зносостійкість та інші експлуатаційні характеристики виробів.

При таких видах оброблення відбувається імпульсне нагрівання при значних швидкостях відведення тепла і дифузії вуглецю, хрому, нікелю та інших елементів із внутрішніх шарів деталі до її поверхні, що призводить до зміни механічних властивостей і підвищення опору втомі її матеріалу.

Аналіз робіт з використання надтвердих матеріалів при фінішному обробленні деталей показав, що більшість досліджень пов’язана з оцінкою їхніх різальних властивостей і визначенням впливу режимів різання на шорсткість оброблюваної поверхні [11–15].

В [5, 16, 17] представлено аналіз параметрів якості поверхневих шарів (мікротвердості, поверхневого зміцнення і залишкових напружень) після оброблення інструментами з надтвердих матеріалів.

В [16] наведено результати досліджень впливу виду механічної обробки і матеріалу інструменту на структурний стан поверхневого шару деталі зі сталі ХВСГ та її опір втомі. Ці дослідження показали, що втомне руйнування зразків, шліфованих абразивними кругами 1А1 250×16×76 63С 6 СМІК, відбувається швидше, ніж зразків, що отримано точінням інструментом із гексаніту-Р, оскільки обмежена границя витривалості для шліфованих зразків була на 32 % нижча, ніж для зразків, які оброблювали точінням при швидкості різання 200 м/хв, подачі 0,07 мм/об і глибині різання 0,07 мм/об.

Таким чином, аналіз робіт показує, що токарне оброблення дозволяє отримувати деталі з високими якісними характеристиками поверхневого шару, а отже, і експлуатаційними характеристиками, в порівнянні зі шліфуванням.

Метою цієї роботи було встановлення взаємозв’язку циклічної довговічності, стану поверхневого шару деталі та режимів різання при фінішному оброблюванні інструментом із надтвердого матеріалу.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження виконували на зразках зі сталі 40Х ГОСТ 4543–71. При цьому використовували різці PVVNN 2525M-16Q з різальною пластиною з кубічного нітриду бору VBGW 160404T00815SE фірми “Kyocera” (Японія).

Дослідження впливу режимів токарного оброблення деталі та матеріалу інструменту на циклічну довговічність виконували на гладких зразках круглого перерізу типу І згідно ГОСТ 25.502–79 (рис. 1) при кімнатній температурі. Формування робочої частини зразків здійснювали в декілька етапів. Спочатку виконували токарне оброблювання зразка з припуском на заключний чистовий токарний перехід. На наступному етапі з метою видалення рисок на поверхні зразків від попереднього токарного оброблення та округлення гострих крайок здійснювали їх шліфування і механічне полірування. Після цього для зняття наклепу зразки піддавали термічному обробленню. Термічне оброблення виконували в середовищі захисного газу для недопущення окиснення поверхонь за такого режиму: нагрів – до температури 450 °С, витримка – 2 год, охолодження – в печі. Чистове оброблення зразків виконували на токарному оброблюваному центрі HAAS ST20 без охолодження в діапазоні швидкостей різання v від 80 до 180 м/хв і подач S від 0,08 до 0,12 мм/об при глибині різання $t = 0,3$ мм.

Для проведення експериментальних досліджень на втому відповідно ГОСТ 25.502–79 обрано схему навантаження: чистий згин при обертанні зра-

зка. Випробування виконували на базі $N = 2 \cdot 10^7$ циклів при температурі 20°C за частоти обертання зразка 2000 об/хв на випробувальній машині МУИ-6000. Напруження циклу σ варіювали від 225 до 670 МПа . При цьому кількість циклів до руйнування представлено у вигляді математичного очікування в результаті випробування п'яти зразків, виготовлених за відповідними режимами різання при вказаному напруженні, за дисперсії, що не перевищувала 7% .



Рис. 1. Загальний вигляд зразка для випробувань на втому.

З метою визначення впливу режимів токарного оброблення на стан поверхневого шару зразків виконували дослідження параметрів, що мають найбільший вплив на характеристики опору втомі. Такими параметрами, відповідно до [18–20], є найбільша висота профілю R_{max} , середній крок нерівностей профілю S_m і деформаційне зміцнення поверхневого шару u_H . Воодночас збільшення R_{max} зменшує циклічну довговічність деталей, а зростання S_m і u_H підвищує її значення. Вплив залишкових напружень можна не враховувати, оскільки, відповідно дослідженням А. М. Сулими [8], відносна значимість кожного з параметрів якості поверхневого шару в зниженні опору втомі зразків після оброблення складає: шорсткість поверхні – до 50% ; зміцнення поверхневого шару – $40\text{--}45\%$; технологічні залишкові напруження – до $5\text{--}10\%$.

Визначення параметрів шорсткості R_{max} , S_m , а також R_a і R_z зразків, що виготовлено за різними режимами токарного оброблення, виконували з використанням приладу MarSurf PS1 (Німеччина).

Для оцінки мікротвердості, глибини і ступеня зміцнення зовнішньої циліндричної поверхні використовували метод вимірювання мікротвердості на косих шліфах під кутом $4^\circ\text{--}6^\circ$ до поверхні. Для недопущення завалу краю зразків виконували їх запресовування на пресі для гарячого запресування фірми “Buehler” (Німеччина) з використанням бакеліту при температурі 150°C і тиску 150 Бар . Шліфування виконували на шліфувально-полірувальному верстаті фірми “Buehler” папером для шліфування P350, P600, P800, P1200, P2500 при швидкості обертання 300 об/хв і тиску 25 Н . Полірування виконували з використанням фетру і суспензії Al_2O_3 при швидкості обертання 10 об/хв і тиску 20 Н .

Мікротвердість поверхневих шарів оброблених зразків вимірювали у відповідності до ДСТУ ISO 6507-1:2007 за Віккерсом на мікротвердомірі ПМТ-3. При цих дослідженнях навантаження на інденатор складало $0,1 \text{ Н}$ за тривалості прикладання зусилля 10 с . Вимірювання виконували в напрямку від місця виходу мікрошліфа на поверхню до основного матеріалу.

Вивчення структури втомних зламів виконували на зразках після проведення досліджень на втому з використанням скануючого електронного мікроскопу РЕМ 106И.

Обробку результатів експериментальних досліджень з метою отримання адекватних математичних моделей здійснювали за методикою багатовимірного регресійного аналізу даних [21].

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Втомний злом зразка, який випробовували за напруження циклу $\sigma = 300$ МПа, представлено на рис. 2, де можна виділити чотири зони, що є характерними для втомного руйнування: зона осередку зародження втомного пошкодження, зона поступового просування тріщин, зона прискороного розвитку тріщин, зона долому. Місце зародження втомної тріщини в досліджуваному зразку показано на рис. 3.

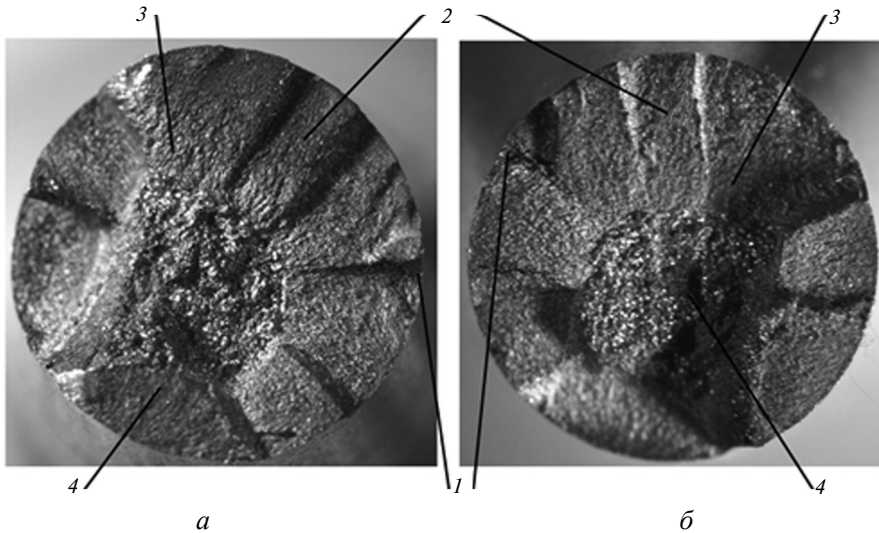


Рис. 2. Загальний вигляд втомного злому зразка з лівої (а) і правої (б) сторони: 1 – зона осередку зародження втомного пошкодження; 2 – зона поступового просування тріщин; 3 – зона прискороного розвитку тріщин; 4 – зона долому.

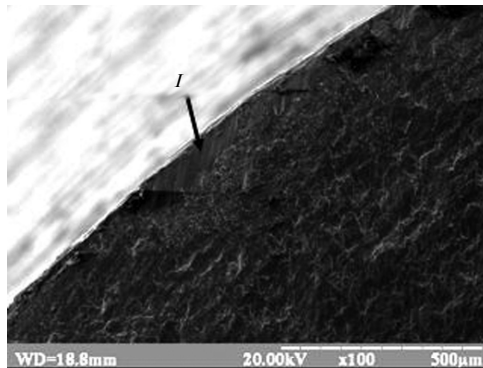


Рис. 3. Фрактографія втомного злому зразка зі сталі 40Х при напруженні циклу 300 МПа; 1 – місце зародження втомної тріщини.

На рис. 4 представлено криві втоми для зразків зі сталі 40 Х, що отримано за різними режимами токарного оброблення. Їх аналіз дозволяє зробити висновок про вплив режимів оброблення на довговічність зразків. Так, найменшу довговічність мають зразки, що оброблено за режиму $v = 80$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм, а найбільшу – за режиму $v = 120$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм.

При цьому розбіжність між отриманими експериментальними значеннями кількості циклів до руйнування збільшується при зменшенні напруження циклу.

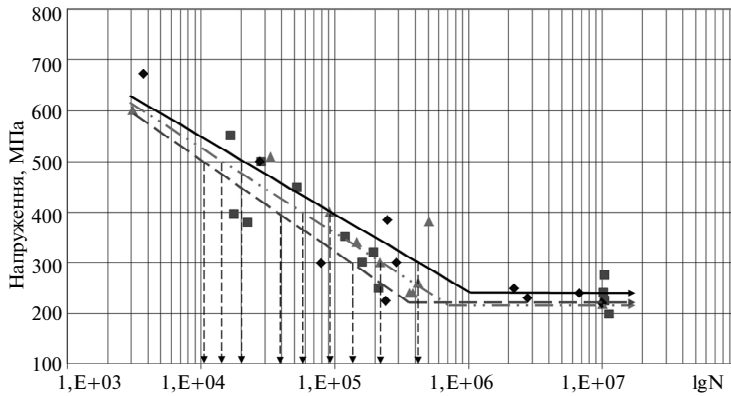


Рис. 4. Результати випробувань на втому зразків зі сталі 40X за режимами оброблення: $v = 80$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм (■), $v = 180$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм (▲), $v = 120$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм (◆).

Аналіз результатів випробувань на втому (рис. 5) показав, що за напруженням 500 МПа кількість циклів до руйнування для зразків, що оброблено за режимом $v = 80$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм складала 11300 циклів; за режиму $v = 180$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм – 15000 циклів; за режиму $v = 120$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм – 20500 циклів.

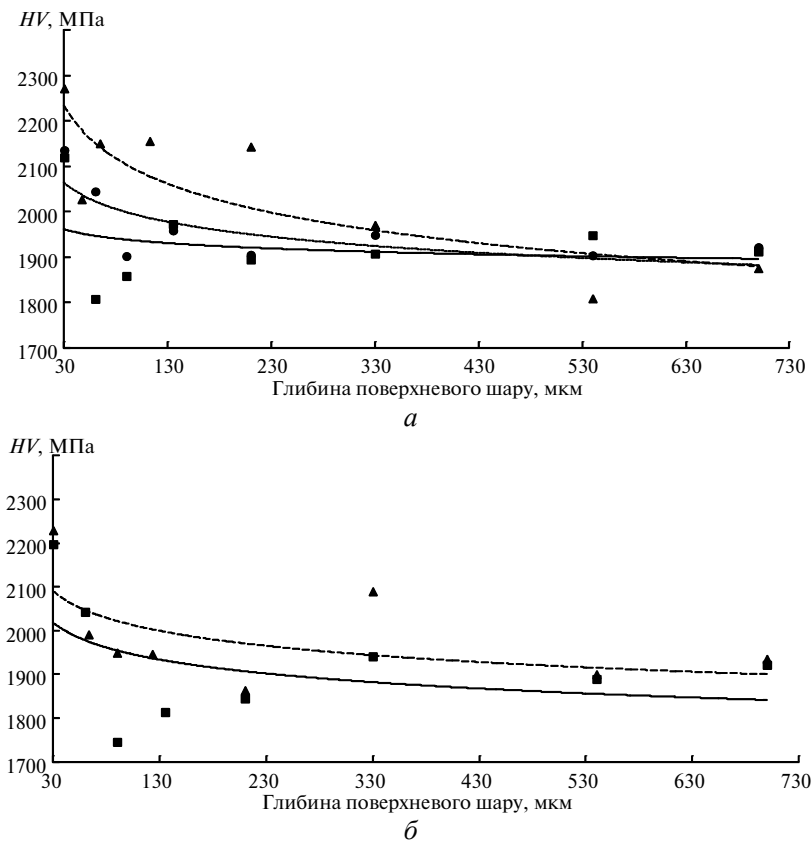


Рис. 5. Результати визначення мікротвердості поверхнього шару зразків за Віккерсом за режимами оброблення: а – $v = 80$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об (●), $v = 120$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об (▲), $v = 180$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об (■); б – $v = 120$ м/хв, $S = 0,1$ мм/об (▲), $v = 180$ м/хв, $S = 0,1$ мм/об (■); в – $v = 80$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об (●), $v = 120$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об (▲), $v = 180$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об (■).

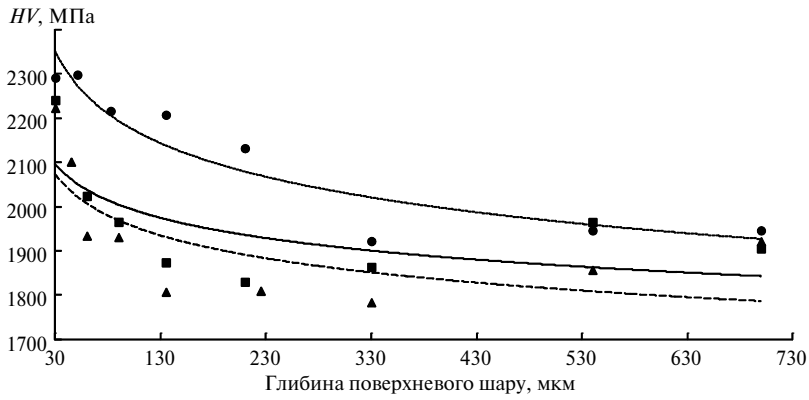


Рис. 5. (Продовження).

За напруженням 400 МПа кількість циклів до руйнування для зразків, що оброблено за режиму $v = 80$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм склала 40600 циклів; за режиму $v = 180$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм – 59700 циклів; за режиму $v = 120$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм – 95000 циклів.

За напруженням 300 МПа кількість циклів до руйнування для зразків, що оброблено за режиму $v = 80$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм склала 150000 циклів; за режиму $v = 180$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм – 290000 циклів; за режиму $v = 120$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм – 430000 циклів.

Таким чином, максимальна розбіжність кількості циклів до руйнування за напруженням 300 МПа для зразків, що оброблено за режиму $v = 80$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм і за режиму $v = 120$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм становила 2,9 рази. Отже, можна зробити висновок про суттєвий вплив режимів токарного оброблення на довговічність зразків.

Результати досліджень параметрів мікрогеометрії зразків за різними режимами різання, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Значення параметрів шорсткості оброблених зразків

| v , м/хв | S , мм/об | Ra , мкм | Rz , мкм | $Rmax$, мкм | Sm , мкм |
|------------|-------------|------------|------------|--------------|------------|
| 80 | 0,12 | 2,68 | 12,727 | 15,630 | 112,960 |
| 120 | 0,08 | 1,45 | 7,15 | 10,989 | 84,24 |
| 120 | 0,12 | 1,68 | 7,47 | 11,259 | 110,15 |
| 120 | 0,10 | 1,57 | 7,14 | 9,467 | 98,46 |
| 80 | 0,08 | 2,66 | 13,11 | 15,546 | 103,06 |
| 180 | 0,08 | 1,13 | 5,76 | 12,972 | 80,23 |
| 180 | 0,10 | 1,52 | 6,21 | 10,116 | 110,28 |
| 180 | 0,12 | 1,35 | 6,01 | 9,630 | 93,80 |
| 180 | 0,16 | 1,94 | 8,58 | 11,307 | 145,632 |

Аналіз отриманих результатів показав, що найменші значення параметрів Ra , Rz і Sm відповідають режиму оброблення $v = 180$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм, а найменші значення $Rmax$ – режиму оброблення $v = 120$ м/хв, $S = 0,1$ мм/об, $t = 0,3$ мм.

Найбільші значення параметрів Ra , $Rmax$ отримано за режиму оброблення $v = 80$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм, найбільші значення Rz – за режиму

оброблення $v = 80$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм і найбільші значення Sm – за режиму оброблення $v = 180$ м/хв, $S = 0,16$ мм/об, $t = 0,3$ мм.

Результати вимірювання мікротвердості поверхневого шару зразків, що отримано при їх токарному обробленні за різними режимами, наведено на рис. 5. При цьому значення мікротвердості поверхневого шару зразків надані як їхні математичні очікування з дисперсією відхилень, що не перевищувала 10 %.

Найбільші значення мікротвердості на наведених рисунках спостерігаються на глибині 30–130 мкм. Надалі поступово з глибини від 400 до 700 мкм значення мікротвердості для всіх зразків вирівнюються, що відповідає мікротвердості основного матеріалу і становить 1900 МПа. Результати розрахованих значень ступеня зміцнення пластично деформованого поверхневого шару u_H після токарного оброблення за різними режимами різання представлено в табл. 2.

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільші значення ступеня зміцнення пластично деформованих поверхневих шарів відповідають режимам оброблення $v = 80$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм і $v = 120$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм, а найменші значення – режимам $v = 80$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм і $v = 180$ м/хв, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,3$ мм.

Таблиця 2. Значення ступеня зміцнення пластично деформованого шару зразків, що оброблено за різними режимами різання

| v , м/хв | S , мм/об | $H_{пов}$, МПа | $H_{осн}$, МПа | u_H , % |
|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 80 | 0,12 | 2291,70 | 1946,32 | 17,75 |
| 120 | 0,08 | 2271,61 | 1875,00 | 21,15 |
| 120 | 0,12 | 2223,08 | 1921,58 | 15,69 |
| 120 | 0,1 | 2229,26 | 1935,06 | 15,20 |
| 80 | 0,08 | 2135,49 | 1921,58 | 11,13 |
| 180 | 0,08 | 2119,49 | 1912,00 | 10,85 |
| 180 | 0,1 | 2197,42 | 1921,58 | 14,35 |
| 180 | 0,12 | 2240,91 | 1905,49 | 17,60 |

Визначення комплексного впливу параметрів стану поверхневого шару зразків на їх втомну міцність виконували шляхом оброблення експериментальних результатів досліджень з використанням багатofакторного регресійного аналізу даних [21].

Це дозволило отримати математичні залежності параметрів поверхневого шару від режимів процесу токарного оброблення:

$$R \max(S, v) = 15,1 - 0,114v + 189,3S - 1,605vS - 5,769vS^2 + 0,011v^2S; \quad (1)$$

$$Sm(S, v) = 94,834 - 0,111v + 472,878S - 6,907vS + 21,887vS^2 + 0,018v^2S; \quad (2)$$

$$u_H(S, v) = 14,942 + 0,119v - 1,268S - 0,683vS + 17,204vS^2 - 0,09v^2S. \quad (3)$$

На рис. 6–8 наведено графічні залежності отриманих математичних моделей (1–3), що є дійсними в діапазоні швидкостей різання від 80 до 180 м/хв і подач від 0,08 до 0,12 мм/об. Ці моделі є адекватними за F-критерієм Фішера при довірчій ймовірності 0,95.

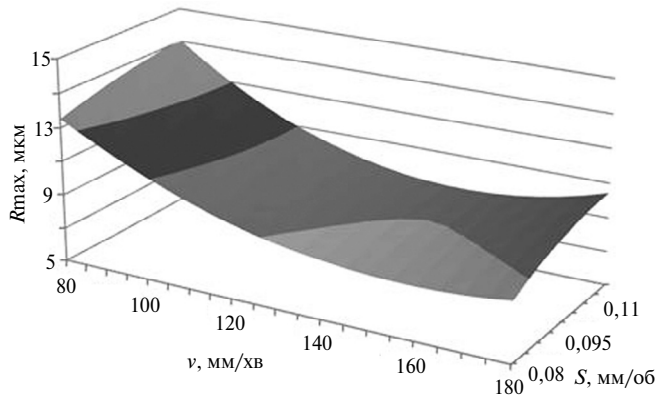


Рис. 6. Залежність найбільшої висоти профілю від подачі та швидкості різання.

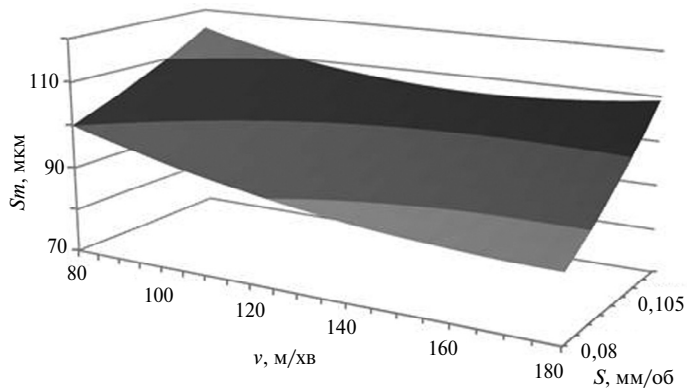


Рис. 7. Залежність середнього кроку нерівності профілю від подачі та швидкості різання.

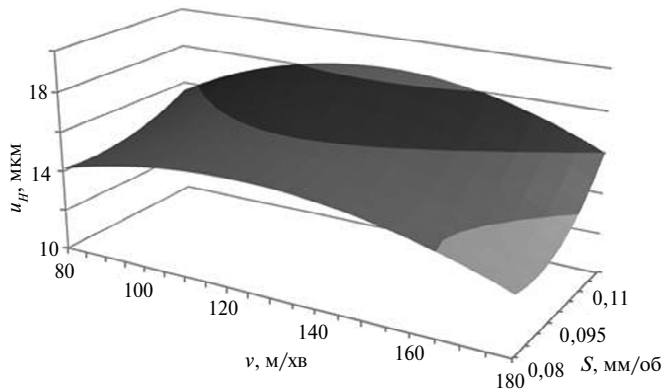


Рис. 8. Залежність ступеня зміцнення пластично деформованого поверхнього шару від подачі та швидкості різання.

Таким чином, згідно з методикою використання кількох часткових критеріїв вихідного показника математичної моделі, що надано в [21], комплексний показник стану поверхнього шару деталі від режимів різання у вказаному раніше діапазоні швидкостей і подач для трьох його часткових складових з урахуванням наведених вагових коефіцієнтів можна представити у вигляді наступної математичної моделі:

$$\begin{aligned}
P(S, v) = & -\alpha_1 \left(\frac{(15,1 - 0,114v + 189,3S - 1,605vS - 5,769vS^2 + 0,011v^2S) - R \max(S, v)_{\min}}{R \max(S, v)_{\max} - R \max(S, v)_{\min}} \right) + \\
& + \alpha_2 \left(\frac{(94,834 - 0,111v + 472,878S - 6,907vS + 21,887vS^2 + 0,018v^2S) - Sm(S, v)_{\min}}{Sm(S, v)_{\max} - Sm(S, v)_{\min}} \right) + \\
& + \alpha_3 \left(\frac{(14,942 + 0,119v - 1,268S - 0,683vS + 17,204vS^2 - 0,09v^2S) - u_H(S, v)_{\min}}{u_H(S, v)_{\max} - u_H(S, v)_{\min}} \right). \quad (4)
\end{aligned}$$

В моделі (4), відповідно до [18–20], складову $R \max(S, v)$ враховано зі знаком “мінус”, оскільки збільшення $R \max$ знижує опір втомі, а складові моделі $Sm(S, v)$ і $u_H(S, v)$ – зі знаком “плюс”, тому що їх зростання підвищує опір втомі.

В результаті аналізу літературних даних [22] і за результатами експериментальних досліджень встановлено, що вагові коефіцієнти – складові комплексного показника стану поверхневого шару деталі, можуть приймати наступні значення: $\alpha_1 = 1,6$, $\alpha_2 = 1,4$, $\alpha_3 = 1,1$.

Залежність комплексного показника стану поверхневого шару деталі від режимів різання представлено на рис. 9, де видно, що в інтервалах швидкостей і подач, що досліджували, при збільшенні подачі і швидкості різання комплексний показник стану поверхневого шару $P(S, v)$ зростає. Це дозволяє зробити припущення про відповідне зростання циклічної довговічності.

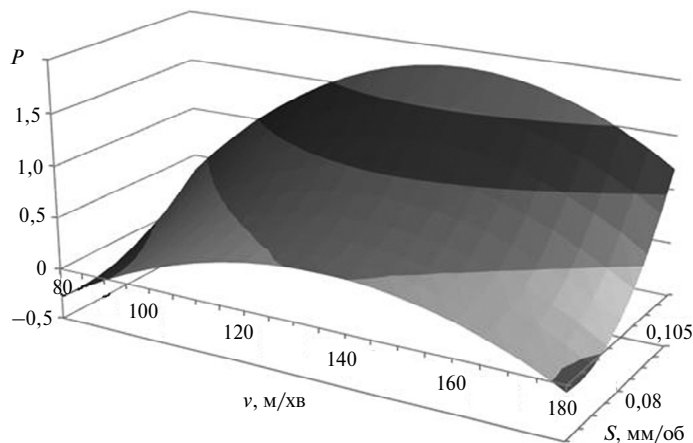


Рис. 9. Залежність комплексного показника стану поверхневого шару деталі від подачі та швидкості різання.

Отримані результати експериментальних досліджень на втому дозволили сформулювати математичну модель, що є залежністю циклічної довговічності від режимів токарного оброблення сталі 40Х інструментом із кубічного нітриду бору:

$$N(S, v, \sigma) = e^k, \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned}
k = & 14,437 + 0,0048v + 13,006S - 13,19\sigma + 0,002vS - 0,002v\sigma - 5,941S\sigma + \\
& + 0,0000004v^2 + 2,929S^2 + 3,013\sigma^2.
\end{aligned}$$

Залежність (5), відповідно до виконаних експериментальних досліджень, дійсна в межах зміни параметрів: $v = 80\text{--}180$ м/хв, $S = 0,08\text{--}0,12$ мм/об, $\sigma = 225\text{--}670$ МПа. Наведена модель є адекватною за F-критерієм Фішера при довірчій ймовірності 0,95.

Характер комплексного впливу режимів токарного оброблення і напруження циклу на циклічну довговічність зразків представлено на рис. 10.

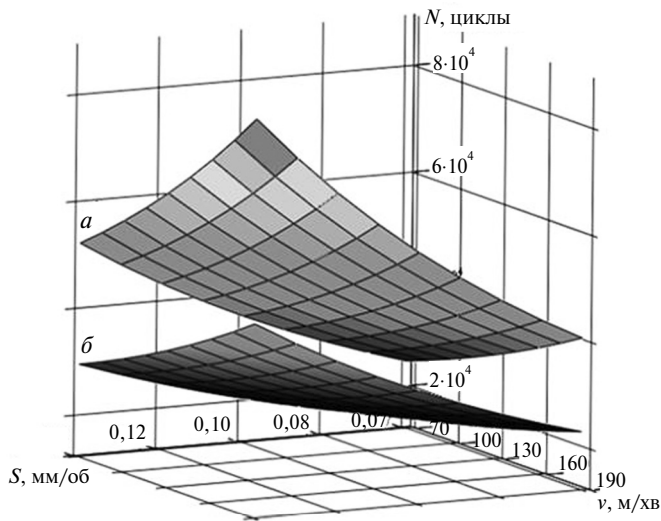


Рис. 10. Залежності циклічної довговічності від режимів оброблення і напруження циклу при $\sigma = 450$ (а) і 500 (б) МПа.

Аналіз результатів досліджень зразків на втому показав, що циклічна довговічність при фінішному токарному обробленні зразків зі сталі 40Х інструментом на основі кубічного нітриду бору для подач від 0,08 до 0,12 мм/об, швидкостей різання від 80 до 180 м/хв і глибини різання 0,3 мм збільшується при збільшенні як подачі, так і швидкості різання.

При цьому вплив подачі має більш вагоме значення. Це відповідає отриманій математичній моделі комплексного показника стану поверхневого шару деталі (4), дослідженням А. М. Суліми, А. Г. Сулова та інших вчених і дозволяє підтвердити достовірність математичної моделі циклічної довговічності (5) для сталі 40Х.

ВИСНОВКИ

Результати наведених експериментальних досліджень параметрів якості поверхневого шару зразків зі сталі 40Х показали доцільність виконання фінішного токарного оброблення поверхонь деталей, які працюють в умовах циклічного навантаження, інструментом із щільних модифікацій нітриду бору.

Так, дослідження параметрів шорсткості показали можливість формування мікрогеометрії профілю зразків зі значеннями $Ra = 1,13\text{--}2,68$ мкм, $Rz = 5,76\text{--}12,73$ мкм, $Rmax = 9,47\text{--}16,27$ мкм і $Sm = 80,23\text{--}112,96$ мкм, а дослідження мікротвердості пластично деформованого поверхневого шару матеріалу зразків – можливість отримати значення ступеня зміцнення в діапазоні 10,85–21,15 %.

Отримана математична модель комплексного показника стану поверхневого шару деталі дає можливість встановити характер впливу режимів оброблення на циклічну довговічність деталей.

Експериментальні дослідження на втому показали вплив режимів різання на циклічну довговічність матеріалу зразків за різних напружень циклу і дозволили представити його у вигляді математичної моделі.

Отримана математична модель відповідає комплексному показнику стану поверхневого шару деталі, що підтверджує її достовірність і дає можливість в подальшому розв'язати задачу оптимізації режимів оброблення деталей, що працюють в умовах змінних навантажень.

Представлено исследование взаимосвязи состояния поверхностного слоя детали из стали 40X, который сформирован при финишной токарной обработке инструментом из плотных модификаций нитрида бора, и его циклической долговечности. Впервые получена математическая модель, показывающая зависимость циклической долговечности от режимов токарной обработки деталей инструментом из кубического нитрида бора. Обоснована возможность финишного токарной обработки ответственных деталей, работающих под воздействием нагрузок, переменных по величине и направлению.

Ключевые слова: циклическая долговечность, качество поверхностного слоя, финишная токарная обработка, кубический нитрид бора.

The study of the relationship between the state of the surface layer of a 40X steel component, which is formed at the finishing turning by a tool from dense modifications of boron nitride, and its fatigue life is presented. For the first time, a mathematical model that presents the dependence of fatigue life on cutting conditions of components with cBN tool was got. This study shows that finish turning of critical components which work under variable on value and direction loads is applicable.

Keywords: fatigue life, surface quality, finish turning, cBN.

1. M'Saoubi R., Outeiro J. C., Chandrasekaran H., Dillon Jr. O. W., Jawahir I. S. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products // Int. J. Sust. Manufact. – 2008. – 1. – P. 203–236.
2. Боровский Г. В., Пини Е., Хачикян Е. А. Высокопроизводительная прецизионная обработка закаленных сталей малоразмерным инструментом из кубического нитрида бора (КНБ) // Известия МГТУ “МАМИ”. – 2012. – № 2(14), т. 2. – С. 30–38.
3. Volkogon V. M., Antonyuk V. S. The effect of grafite-like boron nitride to the formation of residual stresses, strength, and performance of materials based on wurtzitic boron bitride // J. Superhard Mater. – 2001. – 23, N 5. – P. 50–53.
4. Chou Y. K., Evans C. J., Barash M. M. Experimental investigation on cubic boron nitride turning of hardened AISI 52100 steel // J. Mater. Technol. – 2003. – 134, N 1. – P. 1–9.
5. Antonyuk V. S. Formation of wear-resistant antifriction composite coatings reinforced with ultradispersed diamond // J. Superhard Mater. – 1998. – 20, N 4. – P. 66–69.
6. Balan C.-I. Factors influencing surface integrity in hard machining of steels. A review // Int. J. Sci. Eng. Res. – 2015. – 6, N 5. – P. 38–43.
7. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
8. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
9. Писаренко Г. С., Квитка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів: Підручник / За ред. Г. С. Писаренка. – К.: Вища шк., 2004. – 655 с.
10. Карпенко Г. В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов. – К.: Наук. думка, 1976. – 127 с.
11. Das S. R., Dhupal D., Kumar A. Experimental investigation on cutting force and surface roughness in machining of hardened AISI 52100 steel using CBN tool // 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014), ИТ Guwahati, Assam, India, 12–14 Decem., 2014.
12. Zawada-Tomkiewicz A. Analysis of surface roughness parameters achieved by hard turning with the use of PCBN tools / Estonian J. Eng. – 2011. – 17, N 1. – P. 88–99.
13. Kaçal A., Yıldırım F. High speed hard turning of AISI S1 (60WCrV8) cold work tool steel // Acta Polytechnica Hungarica. – 2013. – 10, N 8. – P. 169–186.
14. Мановицкий А. С. Взаимосвязь шероховатости обработанной поверхности, радиальной составляющей силы резания и производительности при точении резами из киборита закаленной стали ШХ15 // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инстру-

- мент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2009. – Вип. 12 – С. 451–455.
15. *Yaltese M. A., Chaoui K., Zeghibb N., Boulanouar L., Rigal J.-F.* Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool // *J. Mater. Proc. Technol.* – 2009. – **209**, N 2. – P. 1092–1104.
 16. *Барандич Е. С., Федоран Ю. А., Волкогон В. М., Антонюк В. С., Выслоух С. П., Котляр Д. А., Кравчук А. В.* Влияние технологических параметров механической обработки на структурное состояние поверхностных слоев и сопротивление усталости стали ХВСГ // *Резание и инструмент в технологических системах.* – 2015. – № 85. – С. 8–16.
 17. *Zhou J., Bushlya V., Peng R. L., Chen Zh., Johansson S., Eric Ja.* Stahl analysis of subsurface microstructure and residual stresses in machined Inconel 718 with PCBN and Al_2O_3 – SiC_w tools // *2nd CIRP Conf. on Surface Integrity (CSI), Procedia CIRP 13*, 2014. – P. 150–155.
 18. *Инженерия поверхности деталей* / Колл. авт.; под ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.
 19. Сулов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
 20. *Мазур Н. П., Внуков Ю. Н., Грабченко А. И., Доброскок В. Л., Залого В. А., Новоселов Ю. К., Якубов Ф. Я.* Основы теории резания материалов: Учеб. / Под общ. ред. Н. П. Мазура, А. И. Грабченко. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2013. – 534 с.
 21. *Выслоух С. П.* Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: Моногр. – К.: НТУУ “КПІ”, 2011. – 488 с.
 22. *Маталин А. А.* Технология машиностроения: Учеб. – СПб.: Лань, 2008. – 512 с.

Надійшла 20.04.17