

УДК 621.87

М.І. Пилипець, д.т.н.,

М.І. Левкович

*Тернопільський державний технічний університет ім. І.Пулюя*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗМІЦНЕННЯ (НАГАРТУВАННЯ) І ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПРИПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ ОБРОБЛЮВАНИХ ОТВОРІВ

*Наведено методика зміцнення поверхонь отворів кульковими розкатниками і виведені аналітичні залежності для визначення зусилля обкатування. Встановлено вплив режимів обкатування на твердість оброблюваної поверхні для різних матеріалів.*

У процесі розточування отворів зовнішні поверхні є розрихлені, з мікро- і макротріщинами, що не забезпечує їх якісного виготовлення, надійності й довговічності в роботі. Тому для забезпечення якісної поверхні доцільно зовнішні розрихлені шари металу механічно обробляти розкочуванням на глибину до 1...1,5 мм.

У процесі розкочування відбувається пластичне деформування поверхневих шарів металу. Деформування поширюється на деяку порівняно невелику глибину, внаслідок чого утворюється нагартування. Глибина нагартованого шару залежить від якості оброблюваних матеріалів і умов механічного оброблення. Суттєво впливають на глибину нагартування і залишкові напруження, а також місцеве (локалізоване) нагрівання поверхневих шарів металу.

Для визначення глибини нагартованого шару і залишкових напружень, які виникають одночасно з нагартуванням користуються різноманітними методами. Найбільше застосування отримав метод електротравлення нагартованих зразків. Суть даного методу полягає в тому, що при знятті нагартованого шару металу відбувається деформація зразків, яка реєструється оптимірами або електричними датчиками.

Знаючи початкову форму зразків і відповідні деформації при електротравленні в будь-якому стравленому шарі визначають глибину нагартування і кінцеве напруження.

На рис. 1 показано вплив подачі  $S$  і радіуса кульок  $r$  на нагартування поверхні  $H_d$  у процесі розточування. Збільшення нагартування пов'язано зі збільшенням ступеня пластичного деформування в зв'язку із зростанням зусилля різання. Зі збільшенням сили різання зменшується тривалість дії деформівних сил на поверхневий шар, що призводить до зменшення нагартування. Одночасно з цим зі збільшенням

швидкості збільшується тертя і виділення тепла в зоні різання, яке прискорює протікання “відпочинку” металу.

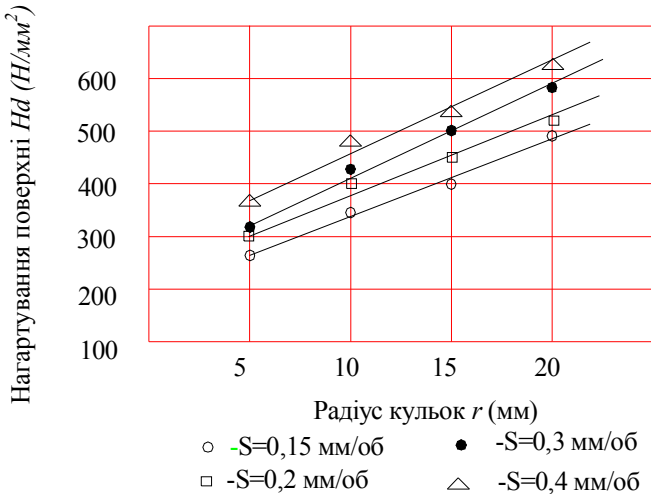


Рис. 1. Вплив величини подачі  $S$  і радіуса кульки на нагартування

Тому для металів, які не зазнають у процесі обкатування структурних змін, зі збільшенням швидкості знімається нагартування [1].

Одночасно з нагартуванням поверхневого шару обробленого металу в ньому виникають залишкові напруження, їх величина і характер розподілу залежить від багатьох причин, основними з яких є умови обробки (режими різання і якість різального інструмента).

Для підвищення твердості поверхневого шару й забезпечення товщини нагартування проводили розкочування за допомогою формувального ролика.

На рис. 2 показано вплив швидкості різання при розточуванні заготовок із сталі 30ХГС на кінцеві напруження. Як видно з графіка, із збільшенням швидкості різання в обробленому шарі спочатку створюються напруження розтягу, які зі збільшенням швидкості нівелюють, а починаючи зі швидкості 200 м/хв. і більше, вони переходять у напруження. Це пояснюється термічними явищами, тобто інтенсивністю виділення тепла зі збільшенням швидкості різання і повнішим прогартуванням сталі 30ХГС.

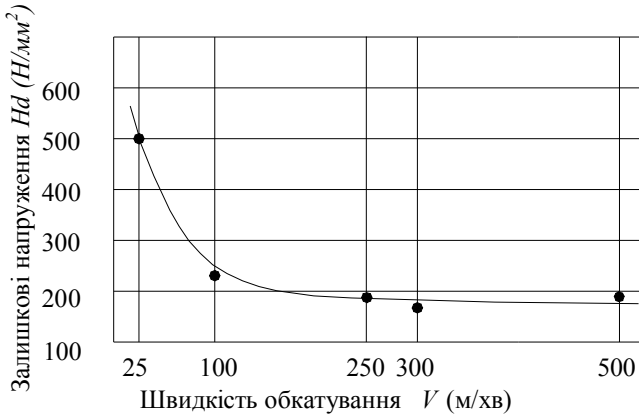


Рис. 2. Вплив швидкості  $V$  на залишкові напруження

Зі збільшенням подачі збільшується величина й глибина поширення залишкових напружень. Наприклад при розкатуванні отворів в деталях, виготовлених з маловуглецевої сталі з подачею  $S = 0,2 \dots 0,4$  мм/об. найбільше напружене розтягування складає  $+1,52 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>, нагартування 90 мкм; при  $S = 0,48$  мм/об. напруження  $+1,44 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>, нагартування 140 мкм; при  $S = 1,2$  мм/об. напруження  $+1,92 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup> і нагартування 180 мкм.

Перехід від напружень розтягу до стиску пояснюється, як і в умовах зміни швидкості обкатування, термічними явищами.

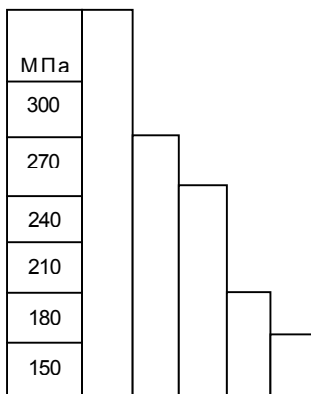
Збільшення ступеня пластичного деформування металу в зоні оброблення призводить до зниження розтягувальних і виникнення залишкових напружень.

Процес обкатування супроводиться пластичною деформацією у поверхневому шарі металу, створюючи певну шорсткість, нагартування і залишкові напруження. Ці фактори суттєво впливають на міцність, зносостійкість і довговічність деталей.

Утомна міцність розкатаних отворів залежить від шорсткості їх поверхні. Наявність на поверхні, яка працює в умовах циклічних і знакозмінних навантажень, окремих дефектів і нерівностей, сприяє концентрації напружень, які можуть перевищити границю міцності металу. У цьому випадку поверхневі дефекти і ризики, які залишаються після попередньої обробки, відіграють роль осередку виникнення субмікроскопічних порушень щільності металу поверхневого шару і його розривлення, що є першопричиною утворення утомних тріщин.

Експериментами встановлено, що після розкочування отворів, штампованих із відпаленої сталі 45, до шорсткості  $R_z = 6,3$  (до розко-

чування  $Rz = 160$ ) границя її витривалості збільшилася з 160 МПа до 265 МПа, тобто близько 33 %.



*Рис. 3. Діаграма залежності межі витривалості від методу виготовлення вихідної заготовки*

клад металорізальні верстати на тертя витрачають 25 % затраченої енергії. Крім цього, чим якісніша поверхня, тим стійкіша деталь до корозії й руйнування в умовах знакозмінних і циклічних навантажень.

Численні досліді українських і зарубіжних учених показали, що зменшення міцності деталей різної шорсткості, в порівняно з полірованими, в умовах закономірного навантаження досягає для сталевих деталей у середньому 40–50 % (досліді М.Л. Кукляка показали, що міцність деталі в умовах знакозмінного навантаження зростає зі зменшенням параметрів шорсткостей поверхонь).

Особливо сильно впливає на збільшення границі витривалості підвищення якості поверхні в місцях концентрації напружень. Поверхневі риси, отримані в результаті оброблення, відіграють роль епіцентру виникнення тріщин втоми і руйнування деталей машин.

Особливо важливе значення в машинобудуванні мають показники, які належать до межі витривалості й зносостійкості деталей машин. Як правило зразки з наклепом мають дані показники набагато вищі, ніж ненаклепані. Так, наприклад, межа втомленості в наклепаних зразків підвищується на 30–80 %, а зносостійкість металу – в два-три рази. Важливо мати на увазі, що ці механічні показники залежать від характеру наклепу, чистоти поверхні. При надмірному наклепі, коли повер-

На рис. 3 показано, як впливає стан вихідної заготовки на межу витривалості при розкатуванні. На діаграмі під номером 1 – розгорнутий отвір після свердління та зенкування ( $Rz = 6,3$ ); 2 – зенкований отвір після розточування; ( $Rz = 10$ ) 3 – після свердління отвір зенкований ( $Rz = 10$ ); 4 – просвердлений або розточений отвір ( $Rz = 20$ ); 5 – відлитий отвір ( $Rz = 160$ ).

Шорсткість поверхні отвора передусім створює перешкоди взаємному переміщенню деталей і є однією з основних причин виникнення сил тертя. На подолання сил тертя машини витрачають значну кількість енергії. Напри-

хневий шар металу подрібнений або надірваний і має глибокі оброблені риси, межа втоми різко зменшується в порівнянні з наклепаними зразками без руйнування поверхневого шару металу. При наявності в поверхневому шарі найбільших напружень стиску межа стійкості деталі збільшується, а при наявності залишкових напружень розтягу – знижується. Для сталей підвищеної твердості межа втоми збільшується завдяки дії стискаючих напружень і досягає до 50 %, а зменшення його під дією розтягуючих напружень – до 30 %.

Особливо суттєвий вплив на надійність і довговічність деталей машин мають викінчувальні й зміцнювальні операції, наприклад обробка роликками, термічна й хіміко-термічна обробка поверхневого шару металу.

Зміна методів і режимів механічної обробки викликає відповідні зміни окремих характеристик якості поверхні, що, у свою чергу, змінює експлуатаційні характеристики деталей.

Тому при виготовленні особливо важливих деталей машин і при їх встановленні необхідно враховувати якість поверхневого шару металу і його вплив в даних умовах роботи на працездатність деталі й машини загалом.

Актуальність проблеми підвищення експлуатаційних властивостей, зокрема забезпечення точності, міцності, оптимальності геометрії профілю та ін, не викликає заперечень. Відомо, що її можна вирішувати як за рахунок застосування високоміцних матеріалів, підвищенням вимог до спорядження, так і технологічними засобами, які розглянемо далі.

Одним із таких технологічних засобів є розкатування попередньо оброблених отворів. Шорсткість поверхні, ступінь зміцнення, твердість поверхні та продуктивність обробки залежить від режимів оброблення: зусилля і швидкості обкатування, поздовжньої подачі, припуску і т. ін.

Розкатник зображено на рис. 4, розріз по А–А розкатник з оброблюваною деталлю.

Розкатник [3] виконано у вигляді хвостовика 1, нижній торець 2 якого взаємодіє з верхнім торцем упорного підшипника 3, а верхній торець – з торцем циліндричного сепаратора 4, в радіальних отворах якого встановлено деформувальні елементи, наприклад кульки 5, причому зовнішній діаметр, який утворюють кульки, в розкатнику є більшим зовнішнього діаметра сепаратора 4.

В нижній частині хвостовика 1 виконана оправка 6, на зовнішній поверхні якої рівномірно по колу на всій її довжині виконані в площині, перпендикулярній до осі, логарифмічні виїмки 7 S-подібної форми.

Внутрішніми діаметрами щодо осьової лінії оправки 6 деформуючі кульки 5 є у взаємодії з логарифмічними виїмками 7 S-подібної форми оправки 6.

Причому зовнішні діаметри кульок 5 більші висоти 8 підйому логарифмічних спіралей, а внутрішній діаметр циліндричного сепаратора більше максимального діаметра криволінійних виїмок з можливістю кругового повертання рівному центральному куту  $\alpha$  кругової логарифмічної виїмки 7.

Причому зовнішній діаметр кульок 5 є більшим висоти підйому логарифмічної виїмки 7 з можливістю кругового повороту рівному центральному куту логарифмічної спіралі  $\alpha$ .

Механізм кріплення сепаратора здійснюється наступним чином.

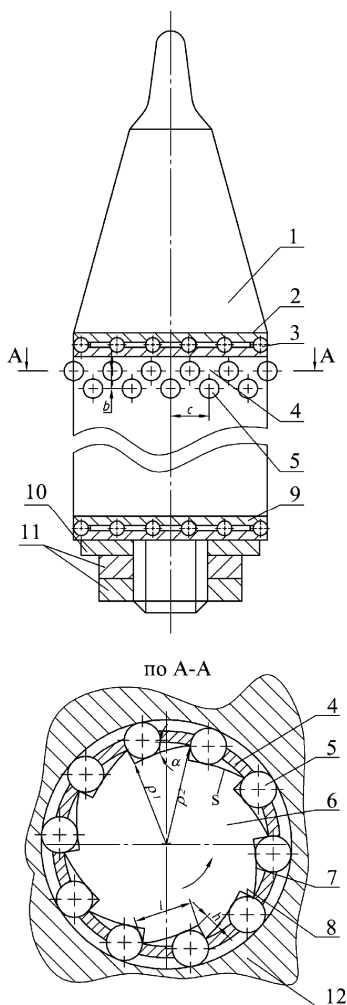


Рис. 4. Розкатник

де  $l$  – довжина логарифмічної виїмки,  $h = \rho_2 - \rho_1$  – висота підйому логарифмічної виїмки;

Місце розміщення сусідніх кульок з міжосьовими відстанями в горизонтальному ряду складає величину  $b$ , а по вертикальних рядах –  $c$ , причому  $b \approx c$ .

Циліндричний сепаратор 4 з двох торців є у взаємодії з упорними підшипниками відповідно верхнім 3 і нижнім 9. При цьому внутрішній діаметр циліндричного сепаратора 4 є більшим максимального діаметра логарифмічних виїмок 6, а зовнішні діаметри упорних підшипників, відповідно верхнього 3 і нижнього 9, дорівнюють зовнішньому діаметру циліндричного сепаратора 4.

Крім цього, верхній упорний підшипник 3 верхнім торцем взаємодіє з торцем хвостовика 2, а нижній торець – з циліндричним сепаратором 4. Нижнім торцем сепаратор 4 є у взаємодії з упорною шайбою 10, яка жорстко закріплена до нижнього кінця оправки за допомогою гайки 11, напрямок різі якої є протилежним до напрямку обертання хвостовика.

Рівняння логарифмічної виїмки має вигляд:

$$S = (\rho_2 - \rho_1) \cdot \sqrt{1 + k^2} / R,$$

де  $\rho_1$  і  $\rho_2$  – відповідно мінімальний і максимальний радіуси логарифмічної виїмки;

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{h},$$

Робота розкатника здійснюється наступним чином.

Розкатник вміщується в оброблюваний отвір деталі 12, за умови, що деформувальні кульки 5 зміщені в ліве крайнє положення і є в контакті з виступом 8, при цьому умовний зовнішній діаметр деформувальних кульок 5 є мінімальним. Причому при встановленні розкатника його вісь і вісь отвору повинні співпадати.

Після відносного правильного встановлення розкатника в оброблюваному отворі деталі 12 включають верстат у напрямку виходу кульок 5 по логарифмічних виїмках 7 згідно із стрілкою. При цьому умовний зовнішній діаметр деформувальних кульок збільшується і вони входять в контакт з оброблюваною поверхнею деталі 12 і здійснюють процес пластичного деформування, при якому збільшується діаметр отвору і твердість поверхневого шару.

З метою підвищення продуктивності праці та якості процесу деформування можна використовувати циліндричні ролики.

До переваг розкатника належить розширення технологічних можливостей при обробці отворів різних діаметрів і підвищення продуктивності праці.

Поверхнєве пластичне деформування зазначеним вище способом підвищує твердість поверхневого шару та створює сприятливі напруження стиску. Втомлювана міцність деталей зростає на 30...70 %, а зносостійкість – у 1,5...2 рази, а також можливе отримання поверхні з низькою шорсткістю ( $R_a = 0,16$  мкм).

Зусилля обкатування залежить від твердості, пластичності й структури металу, шорсткості поверхні, конструктивних особливостей спіралі.

Вибираючи зусилля зміцнення, слід враховувати, що малий тиск не забезпечує повного зминання виступів мікронерівностей поверхні, а досить великий – призводить до перенапруження і руйнування поверхні, гофроутворень на спіралі та зниження строку служби роликів.

Зусилля обкатування  $P$  можна визначити дослідним шляхом або ж за допомогою формул [2]:  
при обробленні кульками:

$$P = \left( \frac{dq}{0,54E} \right)^2 q, \quad (1)$$

при деформуванні роликами:



$$P = \frac{D b q^2}{0,126 E \left( \frac{D}{d} + 1 \right)}, \quad (2)$$

де  $d$  – діаметр ролика або кульки, мм;  $q$  – найбільше значення питомого тиску, Н/мм<sup>2</sup>;  $E$  – модуль пружності оброблюваного матеріалу, Н/мм<sup>2</sup>;  $D$  – діаметр зовнішнього контура спіралі, мм;  $b$  – довжина контакту ролика зі спіраллю, мм.

Найбільше значення питомого тиску визначається за формулою [12]:

$$q = \lambda \sigma_T, \quad (3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт,  $\lambda = 1,8 \dots 2,1$ .

Поздовжня подача інструмента впливає на шорсткість поверхні, твердість і продуктивність процесу. При роботі кульками або сферичними роликами подача досягає не менше 0,1...0,3 мм/об. і роликами з циліндричними поясками – не менше 0,2...0,6 мм. Таким чином, дійсне значення подачі розкатника визначається знаходженням спільного околу перекриття даних інтервалів.

Оптимальні умови розкатування і подача дозволяють досягнути високої якості поверхні.

Швидкість розкатування не виявляє суттєвого впливу на шорсткість поверхні, але від неї залежить продуктивність процесу.

Припуск  $\delta$  на калібрувальне розкатування вибирають в залежності від шорсткості вихідної і оброблюваної поверхонь і визначається наступною залежністю [2]:

$$\delta = 1,35 (R'_z - R_z), \quad (4)$$

де  $R'_z$  і  $R_z$  – значення висот нерівностей профілю відповідно до і після розкатування, мкм.

В результаті розрахунку зусилля розкатування роликами, виконаного за допомогою пакета прикладних програм “Mathcad 6.0”, встановлено, що при  $d = 35$  мм  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа (Ст3),  $D = 60$  мм,  $b = 40$  мм,  $\sigma = 240$  МПа,  $\lambda = 1,95$ ,  $q = 468$  Н/мм<sup>2</sup>,  $P = 7,685 \cdot 10^3$  Н.

У відповідності до отриманих значень  $P$  проводять розрахунок конструктивних елементів розкатника (обойми, деформівних кульок (роликів), корпусу тощо).

Дана конструкція розкатника передбачає три варіанти її виконання залежно від виду переміщення деформівних кульок у коловому напрямку відносно заготовки, тобто коли обертання осей кульк співпадає чи

протилежне напрямку обертання заготовки, або осі кульок нерухомі. У зв'язку з цим єдиним найповнішим критерієм оцінки конструктивного виконання даного пристрою щодо аналізу інтенсивності протікання процесу деформування в коловому та осьовому напрямках є швидкісний коефіцієнт, який згідно з [4] визначається за формулою:

$$K_{\sigma} = \frac{r (R + r + h)}{(r + h) (R + r)} \left( \frac{\omega_o - \omega_k}{\omega_o} \right), \quad (5)$$

де  $\omega_o$  і  $\omega_k$  – кутові швидкості відповідно оправки та корпусу розкатника;

$h$  – лінійна висота деформації поверхні отвору;

$R$  і  $r$  – радіуси кривизни відповідно внутрішнього контуру отвору та кульки.

Використання запропонованої конструкції розкатника дозволяє отримати профіль отвору, зміцнений по зовнішньому контуру з малим радіусом кривизни та довести коефіцієнт використання матеріалу до 100 % за одночасного підвищення продуктивності праці на 40 % та довговічності виробів на 20 %.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Кукляк М.Л. Методи підвищення довговічності пружних елементів машин. Львів: Світ, 1997. – 206 с.
2. Бабусенко С.М. Степанов В.А. Современные способы ремонта машин. – М.: Колос. – 127 с.
3. Деклараційний патент України № 4731, В21Н7/00. Розкатник / А.В. Матвійчик, В.В. Губка, І.Б. Гевко, М.Г. Левкович № 2004010161; Заявл.09.01.2004; Опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2.
4. Вайнберг Д.В. Справочник по прочности, устойчивости и колебаниям пластин. – К.: Будівельник, 1973. – 488 с.

ПИЛИПЕЦЬ М.І. – доктор технічних наук Тернопільського державного технічного університету ім. Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механічна обробка в машинобудуванні.

ЛЕВКОВИЧ М.І. – співробітник Тернопільського державного технічного університету ім. Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механічна обробка в машинобудуванні.

Подано 17.03.2006

