

УДК 621.91

ОЦІНЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ПІД ЧАС МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Я. О. ШАХБАЗОВ¹, В. В. ШИРОКОВ¹, О. Ю. ЧЕТЕРБУХ¹,
І. М. ГРІНЕР¹, Х. Б. ВАСИЛІВ², О. В. МЕЛЬНИКОВ³

¹ Українська академія друкарства, Львів;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ ІТ СТЕП Університет, Львів

Розглянуто технологічні можливості управління залишковими напруженнями під час механічного оброблення деталей машин виправленням спотвореної структури обробленої поверхні через зміну напрямку вектора швидкості різання на чорнових і чистових операціях. Показано можливість використання ефекту Баушингера під час оброблення металів різанням для впливу на значення і знак залишкових напружень першого роду. На прикладі сталі 45 встановлено, що механічна обробка деталей за запропонованою гіпотезою не лише поліпшує якість поверхневого шару металу, а й збільшує ресурс роботи пар тертя на 25...50%.

Ключові слова: залишкові напруження, пластична деформація, напруження, ефект Баушингера, напрям вектора швидкості різання.

The technological possibilities of residual stresses control during mechanical treatment by correcting the distorted structure of the machined surface of machine parts by changing the direction of the cutting speed vector under rough and finish operations are considered. The possibility of using the Bauschinger effect in the process of cutting metals in order to influence the magnitude and sign of the residual stresses of the first kind by checking the technological conditions of processing is shown. Using the example of steel 45, it is established that mechanical processing of parts according to the proposed hypothesis allows us not only to improve the quality of the metal surface layer, but also to increase the service life of friction pairs by 25...50%.

Keywords: residual stresses, plastic deformation, stress, Bauschinger effect, the direction of the vector cutting velocity.

Вступ. У сучасному машинобудуванні ставлять високі вимоги до якості механічної обробки деталей машин. Це необхідно для підвищення їх зносотривкості, втомної міцності, надійності та довговічності під час експлуатації. У зв'язку з цим потрібно удосконалити технології механічної обробки деталей машин, особливо типових для відповідальних вузлів і механізмів контактних пар типу вал-втулка, кулачок-ролик тощо. Тому, поряд з точністю розмірів і шорсткістю обробленої поверхні, особливу увагу слід звертати на забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей робочої поверхні деталей. Згідно з дослідженнями [1–4], зносостійкість та втомну міцність деталей машин визначає тонкий поверхневий “робочий” шар. Залишкові напруження стиску, які утворюються в поверхневому шарі, сприяють підвищенню експлуатаційних характеристик деталей та надійності їх з'єднання з натягом, а залишкові напруження розтягу знижують їх.

Аналіз останніх досліджень. Механізм утворення залишкових напружень під час оброблення деталей машин зі сталей наведено в праці [1]. Внаслідок силової дії поверхневий шар металу пластично деформується, деформація розповсю-

Контактна особа: Х. Б. ВАСИЛІВ, e-mail: chrystyna.vasyliv@gmail.com

джується на деяку глибину та збільшує його питомий об'єм. Недеформований метал під деформованим перешкоджає розширенню верхнього шару, внаслідок чого в останньому утворюються залишкові напруження стиску, а в шарі під ним – напруження розтягу.

Коли ж у зоні різання виникають високі температури, тонкий зовнішній шар миттєво нагрівається, що призводить до зниження його модуля пружності. Швидке охолодження цього шару супроводжується його стиском, йому перешкоджає холодний шар, розташований нижче. Тоді в зовнішньому шарі утворюються напруження розтягу, а в нижньому – напруження стиску.

Згідно з дослідженнями [1], за значних температур відбувається також термопластична деформація, яка є основною причиною утворення напружень розтягу. Температуру початку термопластичних деформацій визначають за виразом

$$\Theta = \frac{\sigma_{0,2}}{\alpha E}, \quad (1)$$

де $\sigma_{0,2}$ – умовна границя плинності оброблюваного матеріалу в зоні різання, МПа; α – коефіцієнт лінійного розширення, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; E – модуль пружності оброблюваного матеріалу, МПа.

Коли температура в зоні різання перевищує температуру початку термопластичних деформацій, то можливі фазові перетворення в структурі матеріалу та утворення залишкових напружень розтягу. Наприклад, температура початку термопластичних деформацій для конструкційних сталей становить за результатами праці [4] $\sim 100\text{...}200^{\circ}\text{C}$.

Тому для практики важливо встановити закономірності виникнення залишкових напружень та їх залежність від технологічних параметрів. Це дасть можливість уникнути небажаних залишкових напружень або зменшити їх для підвищення якості робочих поверхонь деталей.

За результатами досліджень [4] напруження розтягу (σ_T) утворюються від температури тоді, коли внутрішні напруження, які виникають за нагрівання, перевищують границю плинності оброблюваного матеріалу, що можна визначити з виразу

$$\sigma_T = 0,5(\Theta_2 - \Theta_1)\alpha E, \quad (2)$$

де Θ_1 і Θ_2 – температури навколишнього середовища та нагрівання ($^{\circ}\text{C}$), відповідно.

Тому термопластична деформація відбуватиметься тоді, коли внутрішні напруження за нагрівання перевищать границю плинності матеріалу і виконуватиметься така умова:

$$0,5(\Theta_2 - \Theta_1)\alpha E > \sigma_{0,2}. \quad (3)$$

Якщо температура середовища $\Theta_1 = 22^{\circ}\text{C}$, температура нагрівання заготовки $\Theta_2 = 272^{\circ}\text{C}$ (для важких умов оброблення сталі 45 [4]), $\alpha = 1,34 \cdot 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$ і $E = 1,75 \cdot 10^5$ МПа, то розрахунки за нерівністю (3) показують, що значення її лівої частини становить ~ 293 МПа, а $\sigma_{0,2} = 500$ МПа.

Залишкові напруження розтягу, викликані термопластичними деформаціями, залежно від температури нагрівання поверхневого шару, визначаємо за рівнянням

$$\sigma_T = E \left(\alpha \Theta_2 - \frac{\sigma_{0,2}}{E_n} \right), \quad (4)$$

де E_n – модуль пружності оброблюваного матеріалу за температури Θ_2 .

Розрахунки за рівнянням (4) показують, що для вищенаведених умов $\sigma_T = 348$ МПа. Тому можна стверджувати, що за звичайних режимів обробки вплив термопластичної деформації мінімальний.

Як показано раніше [5], щоб удосконалити технологію обробки металів різанням, необхідно врахувати ефект Баушингера. Він полягає у зменшенні опору кристалічного матеріалу пластичному деформуванню після попередньої малої пластичної деформації протилежного знаку і має суттєвий вплив на якісні параметри поверхневого шару обробленої поверхні та проявляється, здебільшого, під час випроб на втомну міцність матеріалів та за тертя [2, 3], коли діють знакозмінні напруження. Розглянемо технологічні можливості використання ефекту Баушингера під час оброблення металів різанням для впливу на значення і знак залишкових напружень першого роду, керуючи технологічними умовами обробки.

Мета роботи – теоретична та експериментальна оцінка технологічних можливостей зменшення залишкових напружень у поверхневих шарах оброблених деталей шляхом зміни напрямку вектора швидкості різання на чистових операціях механічної обробки.

Результати та їх обговорення. Дія різального інструмента на оброблюваний метал викликає пружні та пластичні деформації в напрямку вектора швидкості різання. Тертя задньої поверхні різального інструмента з оброблюваною поверхнею також сприяє розтягуванню кристалічних зерен металу поверхневого шару в цьому напрямку. Після припинення різання у верхніх шарах металу спостерігаємо спотворення структури, зокрема, пластично розтягнуті кристали, орієнтовані вздовж вектора швидкості різання. Це призводить до збільшення об'єму металу, спричиненого дислокаціями і вакансіями, та утворення залишкових напружень. виправлення структури поверхневого шару під час механічного оброблення дасть можливість зменшити залишкові напруження. Це можна досягти, застосувавши ефект Баушингера. Тобто на чистових операціях механічної обробки, зрізання припуску на обробку слід виконувати з протилежним напрямком дії вектора швидкості різання, ніж на операціях чорнової обробки. При цьому слід врахувати глибину розповсюдження пластичних деформацій на чистових операціях на рівні h_s (рис. 1).

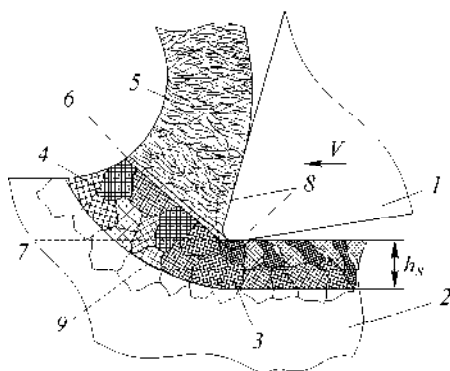


Рис. 1. Схема утворення деформацій під час різання металу на токарному верстаті: 1 – різальний клин різця; 2 – оброблювана заготовка; 3 – зона деформацій; 4 – зона випереджуючих деформацій; 5 – деформація стружки; 6 – площина зсуву деформованого матеріалу; 7 – зона різання; 8 – зони вторинної деформації; 9 – зовнішня межа деформації; V – швидкість різання; h_s – глибина розповсюдження пластичної деформації.

Fig. 1. Scheme of deformations formation during metal cutting on a lathe: 1 – cutting wedge of the cutter; 2 – processed workpiece; 3 – zone of deformations; 4 – zone of advanced deformations; 5 – deformation chip; 6 – shear plane of the deformed material; 7 – cutting zone; 8 – zones of secondary deformation; 9 – outer limit of deformation; V – cutting speed; h_s – depth of plastic deformation propagation.

Глибину шару розповсюдження пластичної деформації після чорнового оброблення визначаємо за залежністю

$$h_s = \sqrt{\frac{P_y}{2\sigma_{0,2}}}, \quad (5)$$

де P_y – радіальна складова зусилля різання N .

Радіальну складову сили різання під час точіння визначаємо за залежністю

$$P_y = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^n \cdot K_p, \quad (6)$$

де C_p та K_p – коефіцієнти, які враховують умови обробки, за точіння конструкційної сталі різцями з твердого сплаву ($C_p = 300$, $K_p = 1$ [6]); t , s , v – глибина, подача і швидкість різання, відповідно; x , y , n – показники степенів (для точіння конструкційної сталі $x = 1,0$; $y = 0,75$; $n = -0,15$ [6]).

Глибина h_s характеризує товщину спотворення обробленої поверхні внаслідок пластичного деформування і викривлення кристалічних ґраток металу. Для виправлення спотвореної поверхні необхідно, щоб товщина шару, на яку розповсюджується пластична деформація, була на рівні h_s за зміни напрямку дії вектора швидкості різання на чистових операціях оброблення.

Для отримання мінімальних залишкових напружень необхідно, щоб виконувалась така умова (рис. 1):

$$\frac{h_s}{t_1 + h_1} = 1, \quad (7)$$

де t_1 і h_1 – глибини різання та розповсюдження пластичної деформації за чистового оброблення (mm), відповідно.

Глибину різання визначаємо за умови мінімальної пластичної деформації поверхні обробленої деталі

$$h_s - t_1 = \sqrt{\frac{C_1 \cdot t_1^x \cdot s_1^y \cdot v_1^n}{2\sigma_{0,2}}}, \quad (8)$$

де $C_1 = 10 \cdot C_p \cdot K_p$.

Наведена теоретична гіпотеза потребує експериментального підтвердження. Зручний і простий спосіб визначення залишкових напружень – метод Андерсена–Фальмана [7]. Згідно з ним, змінюючи діаметр обробленої деталі типу кільця під час механічної обробки, можна розрахувати тангенціальні напруження за рівнянням

$$\sigma_t = \frac{E \cdot s_k \cdot \Delta D}{(1 - \mu^2) \cdot D_s^2}, \quad (9)$$

де s_k – товщина стінки оброблюваного кільця, mm; ΔD – зміна зовнішнього діаметра кільця після механічної обробки і розрізання, mm; D_s – внутрішній діаметр кільця, mm; μ – коефіцієнт Пуассона.

Експериментальні дослідження реалізації ефекту Баушинґера для управління залишковими напруженнями під час механічної обробки кілець зі зовнішнім $\varnothing 50$ mm та внутрішнім $\varnothing 38,5$ mm з відпаленої сталі 45 виконували на токарному верстаті (рис. 2). За чорнового оброблення прийнято такі параметри: $t = 1,0$ mm; $s = 0,26$ mm/turn; $v = 87,92$ m/min (що відповідає частоті обертання заготовки 560 min^{-1}). Тут радіальна складова сили різання за виразом (6), яка спрямована перпендикулярно до обробленої поверхні, становить $P_y = 558$ N. Якщо умовно прийняти границю плинності оброблюваного матеріалу $\sigma_{0,2} = 500$ МПа, то за виразом (5) глибина розповсюдження пластичної деформації $h_s = 0,747$ mm, що викликає спотворення структури поверхневого шару кільця і відповідно утворення залишкових напружень. Очевидно, що для виправлення цієї структури необхідно прикладати силу P_y у протилежному до деформації напрямку, яка забезпечуватиме її на рівні чорнового оброблення. Для умовно чистової обробки вибрали такі умови: $s = 0,08$ mm/turn; $v = 175,8$ m/min (що відповідає частоті обертання заготовки 1120 min^{-1}). Передбачали, що розповсюдження деформації контролюватимемо глибиною різання. Для цього, використовуючи вираз (8), отримали рівняння

$$0,456t_1^{1/2} + t_1 = h_s. \quad (10)$$

Застосовуючи метод випадкових чисел та систему Excel, показали, що для прийнятих умов чистової обробки таку рівність забезпечують за глибини різання $t_1 = 0,45$ mm. Тут радіальна складова сили різання $P_y = 207,9$ N, а для конкретного значення t_1 глибина розповсюдження пластичної деформації $h_{s1} = 0,297$ mm, тобто виконується рівність $t_1 + h_{s1} = h_s$.

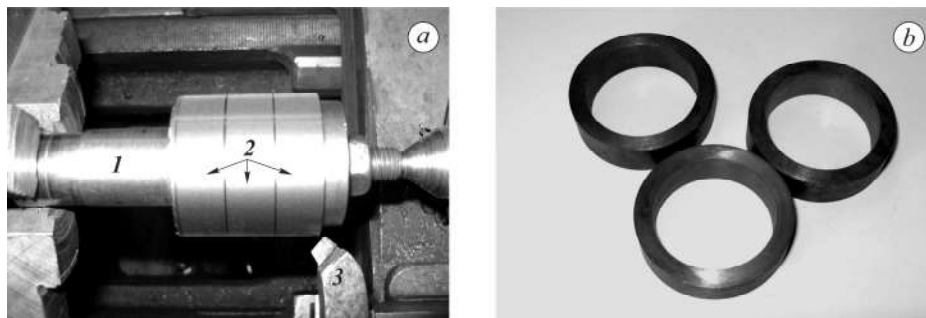


Рис. 2. Зображення обробки (а) пакетного набору кілець (b) (1 – оправка; 2 – заготовки кілець для зразків; 3 – різець).

Fig. 2. A view of processing (a) a package set of rings (b) (1 – mandrel; 2 – sample ring blanks; 3 – cutter).

Для експериментального визначення залишкових деформацій після обробки та запобігання температурного впливу розрізали кільця вручну та вимірювали зміну їх зовнішнього діаметра. Результати досліджень наведені в таблиці.

Залишкові деформації після обробки зразків

№ зразка	Товщина стінки s_k , mm	Зміна зовнішнього діаметра ΔD , mm	Залишкові тангенціальні напруження σ_t , МПа	Примітка
1	5,75	0,086	50,1	Обробка в одному напрямку
2		0,042	26,4	
3		0,055	33,4	
4		0,008	5,1	Чистова обробка у протилежному напрямку
5		0,006	3,5	
6		0,004	2,4	

Металографічні дослідження виконували на перпендикулярних до поверхні зразків (поперечних) шліфах за стандартними методиками (рис. 3). Аналіз мікрошліфів (рис. 3а, b) свідчить про пластичну деформацію зерен оброблюваного матеріалу в напрямку вектора швидкості різання за однакових напрямків чорнової і чистової обробок та спотворення структури поверхневого шару кілець. Зміна напрямку швидкості різання за чистової обробки на протилежний відносно чорнової дозволяє практично виправити пластичну деформацію на обробленій поверхні та структуру поверхневого шару кілець (рис. 3с, d).

Щоб встановити вплив такої обробки на ресурс роботи пар тертя, виконали експерименти в режимі реверсу на багатопозиційному стенді ИС-11 контактної пари “вал–втулка”. Режим роботи: питомий тиск $p = 5$ МПа, кут реверсу $\gamma = 65^\circ$. Діаметр зразків типу “вал–втулка” 20 mm, діаметральний зазор – в межах 0,05... 0,07 mm, база випробувань – 10^6 cycles. Встановили, що механічна обробка деталей за запропонованою гіпотезою дає можливість не лише поліпшити якість поверхневого шару металу, а й збільшити ресурс роботи пар тертя на 40...50%, що корелює з відомими результатами [8].

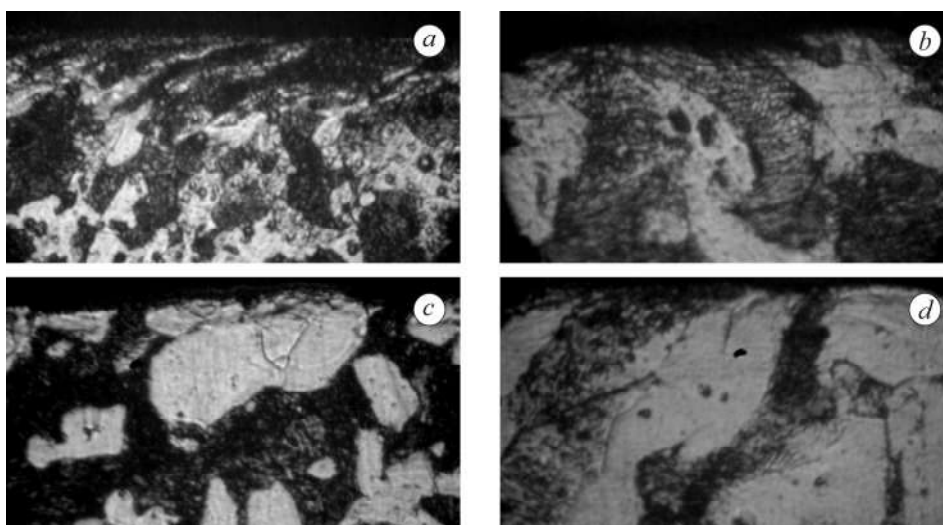


Рис. 3. Деформаційні і структурні зміни поверхневих шарів зразка після чорнової обробки ($\times 100$) (a); однонаправленої з чорною чистовою обробки ($\times 200$) (b); чистової обробки в протилежному напрямку (c – $\times 100$ та d – $\times 200$).

Fig. 3. Deformation and structural changes of the surface layers of the sample after rough processing ($\times 100$) (a); unidirectional with rough finishing ($\times 200$) (b); finishing in the opposite direction (c – $\times 100$ and d – $\times 200$).

ВИСНОВКИ

Підтверджено перспективність використання методу зняття залишкових напружень зміною напрямку вектора швидкості різання на чистових операціях, а також методики розрахунку глибини різання на чистовій операції для виправлення шару пластичної деформації після чорнової обробки, яка забезпечує мінімальні залишкові напруження у оброблених поверхневих шарах деталей машин. Застосування цього методу для підвищення якості і зменшення залишкових напружень у поверхневих шарах оброблених деталей дає змогу суттєво виправляти їх структуру, знижувати залишкові напруження першого роду в 10 разів та суттєво збільшувати ресурс роботи деяких пар тертя.

1. Яцерицын П. И., Еременко М. Л., Фельдштейн Е. Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. – Минск: Вышэйшая шк., 1990. – 512 с.
2. Shyrovov V. V. and Maksymuk O. V. Analytic methods of calculation of the contact interaction of thin-walled structural elements (Review) // Materials Science. – 2002. – **38**, № 1. – P. 62–73.
3. Изменение триболого-реологических свойств стали при повторно-циклическом трении с учетом эффекта Баушингера / В. В. Шевеля, Б. Купец, Г. С. Калда, Ю. С. Соколан // Проблемы трибологии. – 2017. – № 2. – С. 6–15.
4. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
5. Линчевский П. А., Новожилов С. В., Кудряков М. Б. Совершенствование технологии обработки металлов резанием и пластическим деформированием с учетом использования эффекта Баушингера // Тр. Одесск. политехн. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 74–76.
6. Абрамов Ф. Н., Коваленко В. В. Справочник по обработке металлов резанием. – К.: Техніка, 1983. – 239 с.
7. Соколов И. А., Уральский И. М. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981. – 96 с.
8. Патент № 78460 Україна, МПК (2013.01) B23C 3/00. №u201201208460. Спосіб механічної обробки деталей машин / Я. О. Шахбазов, І. М. Грінер, В. А. Сторошук, А. Є. Стецько, Ю. Б. Стецько. – Опубл. 25.03.2013, бюл. № 6/2013.

Одержано 01.08.2022