

УТВОРЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ЇХ ЗАЛЕЖНІСТЬ ВІД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

© Шахбазов Я. О., Широков В. В., Грінер І. М., Сторощук В. А., 2017

Розглянуто технологічні можливості управління залишковими напруженням під час механічного оброблення за рахунок виправлення спотвореної структури обробленої поверхні деталей машин зміною вектора швидкості різання на чорнових і чистових операціях обробки.

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

FORMATION RESIDUAL STRESSES AND THEIR DEPENDENCE ON TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PROCESS OF MACHINING PARTS

There are considered the technological ability to manage residual stress during machining by correcting the distorted structure of the treated surface det-lei new vector machines cutting speed for roughing and finishing operations processing.

Key words: Residual stresses, plastic deformation, stress, Bauschinger effect, the direction of the velocity vector cutting.

Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні до якості механічної обробки деталей машин ставлять високі вимоги, що зумовлено необхідністю підвищення їх зносостійкості, втомної міцності, надійності та довговічності у процесі експлуатації машин і механізмів. У зв'язку з цим необхідно удосконалити технологію механічної обробки деталей машин, особливо деталей відповідальних вузлів і механізмів. Особливу увагу потрібно приділяти, поряд з точністю розмірів і шорсткістю обробленої поверхні, наданню шару робочої поверхні деталей необхідних фізико-механічних властивостей. За дослідженнями [1], тонкий робочий шар деталей визначає зносостійкість та втомну міцність деталей машин. Залишкові напруження стиску, які утворюються у поверхневому шарі, сприяють підвищенню експлуатаційних характеристик деталей та надійності їх з'єднання з натягом, а залишкові напруження розтягу знижують. Тому необхідно знати закони утворення залишкових напружень та їх залежність від технологічних параметрів з метою управління їх величиною.

Аналіз останніх досліджень. Механізм утворення залишкових напружень наведено в [1]. Внаслідок силової дії поверхневий шар металу отримує пластичну деформацію, яка розповсюджується на деяку глибину та викликає збільшення його питомого об'єму. Недеформований метал, який знаходиться нижче від деформованого, перешкоджає розширенню верхнього шару, внаслідок чого в останньому утворюються залишкові напруження стиску, а у шарі під ним – напруження розтягу.

У разі, коли у зоні різання виникають високі температури, відбувається миттєве нагрівання тонкого зовнішнього шару, що призводить до зниження модуля його пружності. Швидке охолодження цього шару супроводжується його стиском, чому перешкоджає холодний шар, який

розташований нижче. У цьому випадку, у зовнішньому шарі утворюються напруження розтягу, а у шарі, який знаходиться нижче, – напруження стиску.

За дослідженнями [1], за значних температур відбувається також термопластична деформація, яка є основною причиною утворення напружень розтягу. Температура початку термопластичних деформацій визначається за виразом

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

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

У разі, коли температура у зоні різання перевищує температуру початку термопластичних деформацій можливі фазові перетворення у структурі матеріалу та утворюються залишкові напруження розтягу. Наприклад, величина температур початку термопластичних деформацій для конструкційних сталей становить, за даними [2], близько 100–200 $^{\circ}\text{C}$.

Тому для практики важливим є встановлення закономірностей виникнення залишкових напружень та їх залежність від технологічних параметрів процесу обробки для того, щоб під час проведення процесу механічної обробки уникнути небажаних залишкових напружень, або зменшити їх з метою підвищення якості робочих поверхонь деталей.

За дослідженнями [2], напруження розтягу виникають тоді, коли внутрішні напруження під час нагрівання перевищуватимуть границю текучості оброблюваного матеріалу:

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

де Θ_1 – температура оточуючого середовища, $^{\circ}\text{C}$; Θ_2 – температура нагрівання, $^{\circ}\text{C}$.

Термопластична деформація відбудеться у тому випадку, коли внутрішні напруження під час нагрівання будуть більшими за величину границі текучості матеріалу і виконуватиметься така умова:

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

Якщо прийняти значення температур $\Theta_1 = 22$ $^{\circ}\text{C}$, а температуру нагрівання заготовки для важких умов обробки сталі 45, наприклад [2], $\Theta_2 = 272$ $^{\circ}\text{C}$, чому відповідають значення $\alpha = 1,34 \times 10^{-5}$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ і $E = 1,75 \times 10^5$ МПа, розрахунки за нерівністю (3) показують, що значення лівої частини нерівності становить приблизно 295 МПа, а значення $\sigma_{0,2} = 350$ МПа.

Величину залишкових напружень розтягу, викликаних 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, значення буде $\sigma_T = 348$ МПа. Тому можна стверджувати, що за звичайних режимів обробки, вплив термопластичної деформації є мінімальним.

Як показано у [3], значного удосконалення технології обробки металів різанням можна досягти, враховуючи ефект Баушингера, який передбачає зменшення опору матеріалів пластичним деформуванням протилежного знака. Цей ефект має великий вплив на якісні параметри поверхневого шару обробленої поверхні та проявляється переважно у процесі випробування на втомну міцність матеріалів, коли діють знакозмінні напруження. Розглянемо технологічні можливості використання ефекту Баушингера у процесі обробки металів різанням з метою впливу на величину і знак залишкових напружень першого роду шляхом керування технологічними умовами обробки.

Формулювання мети роботи. Мета роботи – зменшити залишкові напруження у приповерхневих шарах оброблених деталей за зміни напрямку вектора швидкості різання на чистових операціях механічної обробки.

Виклад основного матеріалу. У процесі різання дія різального інструменту на поверхні оброблюваного металу викликає пружні та пластичні деформації у напрямку вектора швидкості різання. Тертя задньої поверхні різального інструменту об оброблювану поверхню також сприяє розтягуванню кристалічних зерен металу поверхневого шару у напрямку вектора швидкості різання.

Після віддалення різального інструменту верхні шари металу набувають пластично розтягнутих орієнтованих кристалів у напрямку вектора швидкості різання, що викликає спотворення структури металу і розповсюджується на деяку глибину. Це, своєю чергою, призводить до збільшення об'єму металу, причиною чого є явища дислокацій і вакансій та утворення залишкових напружень.

Отже, можна дійти висновку, що виправлення структури поверхневого шару у процесі механічної обробки дасть змогу зменшити величину залишкових напружень. Цього можна досягти застосуванням ефекту Баушингера під час механічної обробки. Тобто на чистових операціях механічної обробки зрізання припуску на обробку необхідно виконувати з протилежним напрямком дії до вектора швидкості різання, ніж на операціях чорнової обробки. При цьому потрібно врахувати глибину розповсюдження пластичних деформацій на чистових операціях на рівні h_s .

Запропоновано метод зняття залишкових напружень зміною напрямку вектора швидкості різання на чистових операціях та методику розрахунку глибини різання t_1 на чистовій операції для виправлення шару пластичної деформації h_s після чорнової обробки (рис. 1), яка забезпечує мінімальні залишкові напруження в оброблених поверхневих шарах деталей машин.

Глибину шару розповсюдження пластичної деформації після чорнового оброблення визначаємо за залежністю

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

де σ_T – границя текучості оброблюваного матеріалу, МПа; P_y – радіальне зусилля різанню, Н.

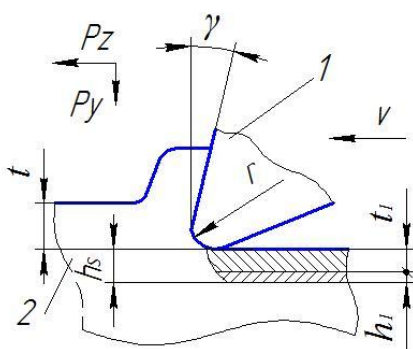


Рис. 1. Схема різання: 1 – різальне лезо; 2 – оброблювана деталь; v – швидкість різання; t – глибина різання під час чорнового оброблення; h_s – глибина пластичної деформації під час чорнового оброблення; t_1 – глибина різання під час чистового оброблення; h_1 – глибина розповсюдження пластичної деформації під час чистового оброблення

Величину сили різання під час чорнового оброблення визначаємо за залежністю

$$P_y = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^z \cdot K_p = C_1 \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^z, \quad (6)$$

де t, s, v – відповідно глибина, подача і швидкість різання; x, y, z – показники степенів; $C_1 = 10 \cdot C_p \cdot K_p$ – коефіцієнт, який враховує вплив оброблюваного матеріалу і різального інструменту.

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 – глибина різання під час чистового оброблення, мм; h_1 – глибина розповсюдження пластичної деформації під час чистового оброблення, мм.

Глибину різання під час чистового оброблення визначають за умови мінімальної величини пластичної деформації поверхні обробленої деталі:

$$h_s - t_1 = \sqrt{\frac{C_1 \cdot t_1^x \cdot s_1^y \cdot v_1^z}{2\sigma_T}}. \quad (8)$$

Наведена теоретична гіпотеза потребує експериментального підтвердження. Зручним і простим методом для визначення залишкових напружень обрано метод Андерсена-Фальмана. За цим методом зміною діаметра обробленої деталі типу кільця у процесі механічної обробки за рівнянням (9) можна розрахувати тангенціальні напруження:

$$\sigma_t = \frac{E \cdot s \cdot \Delta D}{(1-\mu^2) D_0^2} \quad (9)$$

де s – товщина стінки оброблюваного кільця, мм; ΔD – величина зміни зовнішнього діаметра кільця після механічної обробки і його розрізання, мм; D_0 – діаметр середнього кола кільця, мм; E – модуль Юнга, МПа; μ – коефіцієнт Пуассона.

Експериментальні дослідження реалізації ефекту Баушингера для управління залишковими напруженнями під час механічної обробки виконувались на операції розточування отворів кілець зі сталі 45. При цьому напрям вектора швидкості різання на операції чистового розточування в одних експериментах збігалось із напрямом різання на операції чорнового розточування, а в інших експериментах цей напрям був протилежним. Основним завданням досліджень є встановлення можливості впливу ступеня виправлення пластично деформованих зерен під час чорнового розточування на глибині h_s , після чистового розточування на величину залишкових напружень.

Експерименти проводились на кільцях з відпаленої сталі 45 ГОСТ 1050-88. Обробка виконувалась на токарно-гвинторізному верстаті моделі 1А616 за таких режимів різання: чорнове точіння – $t = 1$ мм, $s = 0,26$ мм/об, $n = 560$ хв⁻¹; чистове точіння – $t_f = 0,35$ мм, $s_f = 0,08$ мм/об, $n_f = 1120$ хв⁻¹.

Після обробки на торцях кілець наносились перпендикулярно до твірної дві риски на відстані 4 мм і розрізались кільця по твірній між рисками. На інструментальному мікроскопі вимірювалась відстань між рисками для визначення деформації кільця.

Результати досліджень наведені у таблиці.

Результати експериментальних досліджень

№ зразка	Діаметр D , мм	Внутрішній діаметр, d , мм	Товщина стінки, s , мм	Зміна зовнішнього діаметра, ΔD , мм	Залишкові тангенціальні напруження σ_t , МПа	Примітка
1	50	38,5	4,4	0,086	41	обробка в одному напрямку
2	50	38,5	4,4	0,042	20	
3	50	38,5	4,4	0,055	27	
4	50	38,5	4,4	0,008	4	чистова обробка в протилежному напрямку
5	50	38,5	4,4	0,006	3	
6	50	38,5	4,4	0,004	2	

Висновки. Доведено вплив напрямку вектора швидкості різання під час чорнових і чистових операцій на спотворення та виправлення структури поверхневого шару обробленої деталі під час механічного оброблення. Встановлено, що під час чорнового і чистового оброблення в одному напрямку вектора швидкості різання, залишкові напруження першого роду становлять 20...41 МПа, а за чистової обробки у протилежному напрямку вектора швидкості різання напруження мають мінімальні значення – (2...4 МПа).

Проведені дослідження підтверджують перспективність використання цього методу під час виконання технологічних задач, пов'язаних із підвищенням якості і зменшенням залишкових напружень у поверхневих шарах оброблених деталей.

1. Ящерицын П. И., Еременко М. Л., Фельдштейн Е. Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы у технологических системах. – Минск: Высшая школа, 1990. – 512 с.
2. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
3. Линчевский П. А., Новожилов С. В., Кудряков М. Б. Совершенствование технологии обработки металлов резанием и пластическим деформированием с учетом использования эффекта Баушингера / Труды Одесского политехнического университета. – 2008. – Вып. 2(30). – С.74–76.
4. Соколов И. А., Уральский И. М. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981. – 96 с.