

УДК 621.83.059.13

Заблоцький В.Ю. к.т.н., доц., Прозоровський С.В., Селепина Й.Р. к.т.н.

Луцький національний технічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

В статті проведено розрахунок показників напружено-деформованого стану поверхневого шару функціональної поверхні в ході токарного оброблення. Визначено складові залишкових напружень, межа текучості матеріалу. В процесі оброблення результатів побудовано схему трансформації показників напружено-деформованого стану, встановлено, що вони залежать від глибини різання під час лезового оброблення і впливають на формування величини зміцнення поверхневого шару.

Ключові слова: лезове оброблення, зміцнювальна поверхня, токарне оброблення, довговічність, тертя, напруження.

Дія силових факторів в ході оброблення заготовок викликає формування напружено-деформованого стану поверхневого шару, що характеризується розподілом залишкових напружень, а також ступенем і глибиною зміцнення. Існують різні дослідження, присвячені механізмам формування показників напружено-деформованого стану поверхневого шару заготовок [4]. Таким чином, дослідження характеристик функціональних поверхонь є актуальною науково-практичною задачею.

Дослідження [1, 3] підтверджують подібність програм навантаження під час оброблення різанням і поверхневим-пластичним деформуванням. За даними досліджень характер залежностей глибини h_n і ступеня N зміцнення від температури, закони розподілу тангенціальних залишкових напружень по глибині поверхневого шару в ході токарного оброблення і вигладжування підігрітим до температур різання індентором збігаються, що є свідченням ідентичності процесів формування обробленого поверхневого шару в цих випадках. Це дозволяє використовувати єдиний підхід під час дослідження формування показників напружено-деформованого стану для різних видів механічного оброблення й аналізу процесу технологічної спадковості під час перебігу процесу формування показників напружено-деформованого стану для різних видів механічного оброблення і аналізу процесу технологічної спадковості в процесі оброблення.

Аналіз методик визначення стану поверхневого шару деталі після оброблення різанням і управління показниками поверхневого шару показав, що доцільно використовувати методику визначення показників зміцнення і залишкових напружень за результатами досліджень адгезійної взаємодії [2, 4]. При розрахунках враховуються релаксаційні зниження залишкових напружень, запізнювання пластичної деформації в глибині поверхневого шару, швидкісний фактор.

Контакт інструменту і заготовки представляється в формі круга навантаженого рівномірно розподіленими нормальними p_r і дотичними τ_n контактними напруженнями.

Вирішення завдання про розподіл напружень в оброблюваному поверхневому шарі заготовки під дією нормальних p_r і дотичних τ_n навантажень, що діють на інструмент, ґрунтується на наступних припущеннях:

- 1) матеріал деталі є ідеально пружним півпростором, а інструмент – абсолютно жорстким;
- 2) пластична деформація – не робить істотного впливу на розподіл напружень в пружній області;
- 3) дія температури проявляється в зміні фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу і фрикційних характеристик контакту;
- 4) напруження від стружкоутворення (перед інструментом) не чинять істотного впливу на напруженість під задньою поверхнею інструменту.

Вихідними даними для розрахунку є значення нормальних p_r і дотичних τ_n напружень (МПа), отриманих за результатами фрикційних досліджень [5], діаметр площі контакту інструменту та заготовки a (мм), коефіцієнта тертя f межі текучості оброблюваного матеріалу σ_T (МПа), коефіцієнта n , що враховує схильність оброблюваного матеріалу до зміцнення, і коефіцієнта Пуассона μ .

На вході досліджуваної зони в область контакту з інструментом, тобто в області найбільших напружень в поверхневому шарі заготовки, напруження визначаються за такими формулами:

– нормальні:

$$\sigma_z^e = p \left\{ \left(1 - \frac{f}{1+2\mu} \right) \left[\frac{z^3}{(a^2+z^2)^{3/2}} - 1 \right] - \frac{f(1-2\mu)}{1+2\mu} \left[\frac{z}{(a^2+z^2)^{1/2}} - 1 \right] \right\}; \quad (1)$$

– радіальні:

$$\sigma_r^e = p \left\{ 0,5 \left[-(1+2\mu) + \frac{2z(1+\mu)}{(a^2+z^2)^{1/2}} - \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{3/2}} \right] - \frac{f}{1+2\mu} \left[2(1+\mu) \left(\frac{z}{(a^2+z^2)^{1/2}} - 1 \right) - \left(\frac{z^3}{(a^2+z^2)^{3/2}} - 1 \right) \right] \right\}; \quad (2)$$

– тангенціальні:

$$\sigma_\theta^e = p \left\{ 0,5 \left[-(1+2\mu) + \frac{2z(1+\mu)}{(a^2+z^2)^{1/2}} - \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{3/2}} \right] + \frac{f(1-2\mu)}{1+2\mu} \left[\frac{z}{(a^2+z^2)^{1/2}} - 1 \right] \right\}, \quad (3)$$

де z – координата глибини поверхневого шару, мм.

Максимальні дотичні напруження на виході досліджуваної точки із зони контакту заготовки та інструменту з урахуванням швидкісного фактора:

$$\tau_{\max}^e = 0,41 \sqrt{[(\sigma_r^e - \sigma_z^e)^2 + (\sigma_r^e - \sigma_\theta^e)^2 + (\sigma_\theta^e - \sigma_z^e)^2]} - \frac{pz}{\sqrt{(Ш^2 + z^2)}},$$

де коефіцієнт $Ш$ враховує швидкісний фактор.

Зміцнення матеріалу в ході пластичного деформування починається, коли максимальні дотичні напруження τ_{\max}^e перевищують значення $0,5\sigma_T$ (де σ_T – межа текучості матеріалу заготовки) [3]. Таким чином, глибина h_n пластично деформованого поверхневого шару відповідає координаті z , в якій виконується умова рівності максимальних дотичних напружень пластичної постійної вихідного матеріалу:

$$h_n = z_{(2\tau_{\max}^e - \sigma_T)}. \quad (4)$$

Межа текучості зміцненого матеріалу дорівнює:

$$\sigma_{T1} = (2\tau_{\max}^e - \sigma_T)h + \sigma_T,$$

де σ_T – межа текучості оброблюваного матеріалу в початковому стані, МПа.

Знаючи межі текучості до і після оброблення, можна обчислити ступінь зміцнення поверхневого шару:

$$N = \frac{\sigma_{T1} - \sigma_T}{\sigma_T} 100\%. \quad (5)$$

У поверхневому шарі, що зазначає пластичного деформування, формуються напруження, σ_z^p , σ_r^p , σ_θ^p що відрізняються від пружних. Вони максимальні в найбільш навантаженій області поверхневого шару – в площині дії зовнішніх навантажень, що збігається з напрямком руху вершини інструменту. В межах зони контакту інструменту і заготовки напруження пластичного деформування дорівнюють:

– нормальні

$$\sigma_z^p = -p_r + \frac{2p_r f_m z^3}{\sqrt{(a^2+z^2)^3}}; \quad (6)$$

– радіальні

$$\sigma_r^p = \sigma_z^p - \sqrt{\sigma_T^2 - 4\tau_{rz}^p}; \quad (7)$$

– тангенціальні

$$\sigma_\theta^p = \sigma_z^p + \sqrt{\sigma_T^2 - 4\tau_{rz}^p}, \quad (8)$$

при цьому дотичні напруження складають:

$$\tau_{rz}^p = pf \left[1 - \frac{z}{h_n} \right] \frac{1-2\mu}{1+2\mu}.$$

В результаті пластичної деформації знімається частина пружних напружень. Частина, що залишилася фіксується в деформованому і зміцненому обробленому шарі й зберігається в ньому як залишкові напруження. Величина залишкових напружень зумовлена різницею напружень σ^p в пластично-деформованому поверхневому шарі та напружень σ^e в ідеально пружному матеріалі: $\sigma_{zali} = \sigma^p - \sigma^e$.

Таким чином, в пластично деформованій зоні $z = 0..h_n$ після механічного оброблення залишкові напруження складають:

– тангенціальні (дотичні до циліндричної поверхні заготовки та перпендикулярні до твірної):

$$\sigma_\tau = \phi \left[\sigma_r^p - \sigma_r^e + 2fp \left(1 - \frac{z^3}{\sqrt{(m^2 + z^2)^3}} \right) \right], \quad (9)$$

де ϕ – поправочний коефіцієнт; m – додатковий член, що враховує зняття напружень біля поверхні;

– осьові (паралельні до твірної циліндричної поверхні заготовки);

$$\sigma_o = \phi \left[\sigma_\theta^p - \sigma_o^e + fp \left(1 - \frac{z^3}{\sqrt{(m^2 + z^2)^3}} \right) \right], \quad (10)$$

– нормальні (по нормалі до циліндричної поверхні заготовки і перпендикулярні до твірної):

$$\sigma_n = \phi [\sigma_z^p - \sigma_z^e]. \quad (11)$$

У пружній області ($z > h_n$) тангенціальні залишкові напруження будуть рівні:

$$\begin{aligned} \sigma_\tau = & \sigma_{r(z=h_n)}^p (-0,5)(1+2\mu) + f + \\ & \left(1 + \mu + \frac{2f(1+\mu)}{(1+\mu)} \frac{s}{\sqrt{(a^2+s^2)}} - \left(0,5 - \frac{f}{1+2\mu} \right) \frac{s^3}{\sqrt{(a^2+s^2)^3}} \right) \\ + & \frac{[-0,5(1+2\mu) + f] - p_r \left[-0,5[1+\mu] + f + \left(1 + \mu + \frac{2f(1+\mu)}{(1+2\mu)} \frac{z}{\sqrt{(a^2+s^2)}} - \left(0,5 - \frac{f}{1+2\mu} \right) \frac{z^3}{\sqrt{(a^2+s^2)^3}} \right) \right]} \end{aligned} \quad (12)$$

осьові:

$$\begin{aligned} \sigma_o = & \sigma_{\theta(z=h_n)}^p \frac{-0,5(1+2\mu) + \frac{f(1-2\mu)}{(1+2\mu)} + \left(1 + \mu + \frac{f(1-2\mu)}{(1+2\mu)} \frac{s}{(a^2+s^2)} - \frac{0,5s^3}{\sqrt{(a^2+s^2)^3}} \right)}{0,5(1+2\mu) - \frac{f(1-2\mu)}{(1+2\mu)} + \left(1 + \mu + \frac{f(1-2\mu)}{(1+2\mu)} \frac{s}{(a^2+s^2)} + \frac{0,5s^3}{\sqrt{(a^2+s^2)^3}} \right)} \end{aligned} \quad (13)$$

нормальні:

$$\begin{aligned} \sigma_n = & \sigma_{z(z=h_n)}^p \left[\left(1 - \frac{f}{(1+2\mu)} \right) \cdot \left(\frac{s^3}{\sqrt{(a^2+s^2)^3}} - 1 \right) - \frac{f(1-2\mu)}{(1+2\mu)} \left(\frac{s}{\sqrt{(a^2+s^2)}} - 1 \right) \right] - \\ & - p_r \left(1 - \frac{f}{(1+2\mu)} \right) \cdot \left(\frac{z^3}{\sqrt{(a^2+s^2)^3}} - 1 \right) - \frac{f(1-2\mu)}{(1+2\mu)} \left(\frac{z}{\sqrt{(a^2+s^2)}} - 1 \right), \end{aligned} \quad (14)$$

де $s = z - h_n$, мм.

Під час поверхневого пластичного деформування інструмент вступає в контакт з уже сформованою на операції чистового точіння поверхнею. В цьому випадку в зоні контакту інструмента і заготовки формуються нормальні p_{r2} і дотичні τ_{n2} напруження (рис. 1).

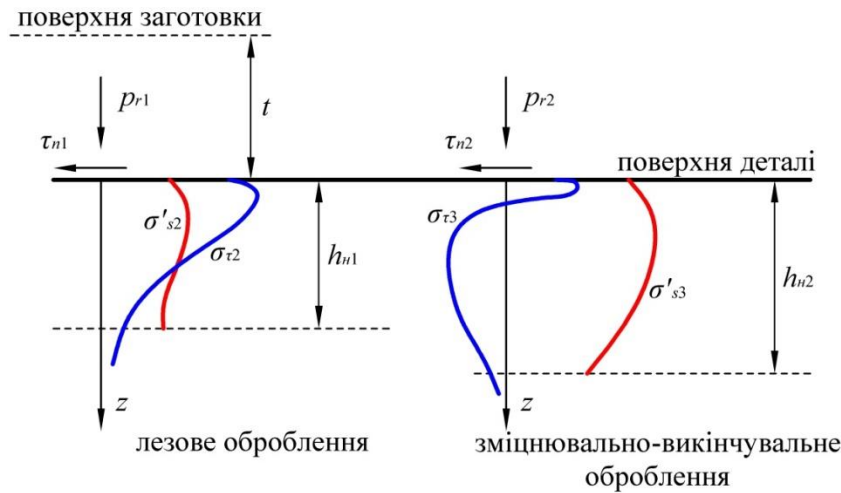


Рис. 1. Схема трансформації показників напружено-деформованого стану:
 t – глибина різання під час лезового оброблення; h_{n1} , h_{n2} – глибина зміцненого шару після токарного та зміцнювального оброблення відповідно

Під дією контактних навантажень p_{r2} і τ_{n2} в поверхневому шарі під інструментом формується поле пружних напружень σ_{z2}^e , σ_{r2}^e , $\sigma_{\theta2}^e$, величина яких розраховується аналогічно до формул (1) – (3).

Пластична деформація поверхневого шару в ході ППД відбудеться за умови, коли:

$$\tau_{\max 2}^e \geq 0,5\sigma_{T1},$$

де σ_{T1} – межа текучості зміцненого після точіння матеріалу, МПа.

Величина максимальних дотичних напружень $\tau_{\max 2}^e$ з урахуванням залишкових напружень від чистового точіння визначається як:

$$\tau_{\max 2}^e = 0,41\sqrt{\left(\left(\sigma_{z2}^e + \sigma_{n1}\right) - \left(\sigma_{r2}^e + \sigma_{\tau1}\right)\right)^2 + \left(\left(\sigma_{r2}^e + \sigma_{\tau1}\right) - \left(\sigma_{\theta2}^e + \sigma_{\sigma1}\right)\right)^2 + \left(\left(\sigma_{\theta2}^e + \sigma_{\sigma1}\right) - \left(\sigma_{z2}^e + \sigma_{n1}\right)\right)^2}.$$

Межа текучості зміцненого матеріалу σ_{T2} , МПа:

$$\sigma_{T2} = (2\tau_{\max 2}^e - \sigma_{T1})n + \sigma_{T1}.$$

Ступінь зміцнення N_2 , %, визначається за формулою:

$$N_2 = \frac{\sigma_{T2} - \sigma_{T1}}{\sigma_{T1}} \cdot 100. \quad (15)$$

Залишкові напруження складають:

– тангенціальні: $\sigma_{\tau2} = \sigma_{r2}^p - (\sigma_{r2}^e + \sigma_{\tau1}); \quad (16)$

– осьові: $\sigma_{\sigma2} = \sigma_{\theta2}^p - (\sigma_{\theta2}^e + \sigma_{\sigma1}); \quad (17)$

– нормальні: $\sigma_{n2} = \sigma_{z2}^p - (\sigma_{z2}^e + \sigma_{n1}); \quad (18)$

де σ_{r2}^p , $\sigma_{\theta2}^p$, σ_{z2}^p – радіальні, тангенціальні і нормальні напруження пластичного деформування, розраховані за формулами (6) - (8).

Отже, за результатами розрахунків визначено показники напружено-деформованого стану у вигляді залишкових напружень, які складаються з тангенціальної, радіальної та нормальної складових. Встановлено залежності ступеню зміцнення оброблюваного матеріалу від виду операції механічного оброблення.

Інформаційні джерела

1. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Дахнюк О.П., Заблоцкий В.Ю., Приступа С.О. Оцінка ефективності операцій механічного оброблення // Технологічні комплекси: науковий журнал №1(9). – Луцьк: Вид-во Луцького НТУ, 2014. – С. 127–131.
3. Заблоцкий В.Ю., Дахнюк О.П., Марчук В.І. Забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин на операціях механічного оброблення. Монографія. – Луцьк: Видавництво: «Вежа Друк», 2017. – 120с.
4. Дахнюк О.П., Заблоцкий В.Ю. Кінематичний синтез формоутворюючих рухів ріжучого інструменту в робочому просторі багатошпиндельного токарного автомата // "Перспективні технології та прилади". Збірник статей. Випуск 7. м. Луцьк, грудень 2015 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2015. – С. 42–48.
5. Дахнюк О.П., Ткачук А.А. Комбіноване зміцнювальне-викінчувальне оброблення, як засіб підвищення зносостійності спряжених поверхонь маложорстких деталей // Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей IV Міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 25-26 листопада 2015р.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – С. 240–241.

Заблоцкий В.Ю. к.т.н., доц., Прозоровский С.В., Селепина Й.Р. к.т.н.
Луцкий национальный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

В статье проведен расчет показателей напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя функциональной поверхности в ходе токарной обработки. Определены составляющие остаточных напряжений, предел текучести материала. В процессе обработки результатов построена схема трансформации показателей напряженно-деформированного состояния, установлено, что они зависят от глубины резания при лезвийной обработке и влияют на формирование величины упрочнения поверхностного слоя.

Ключевые слова: лезвийная обработка, упрочненная поверхность, токарная обработка, долговечность, трение, напряжение.

V. Zablotsky S. Prozorovsky, J. Selepyna
Lutsk National Technical University

DEFINITION OF INDICATORS STRESS-STRAIN STATE SURFACE LAYER

The article deals with the calculation of the stress-strain state of the surface layer a functional surface during the turning process. Determined components of residual stresses, the yield strength of the material. In the process of processing the results a scheme of transformation of indicators of a stress-strain state is constructed, it is established that they depend on the depth of cutting during blade processing and affect the formation of the value of the strengthening of the surface layer.

Key words: blade processing, reinforcing surface, turning processing, durability, friction, stress.

Стаття надійшла до редакції 14.11.2018