

АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ НА ФІНІШНИХ ОПЕРАЦІЯХ

В статті проведено дослідження механізму формування напруженого стану поверхневого шару металу при обробці поверхнево-пластичного деформування, зокрема алмазним вигладжуванням. Встановлено, що під час проектування технологічних процесів необхідно призначати режими поверхнево-пластичного деформування, які дозволяють отримати сприятливий розподіл залишкових напружень по перерізу деталі. Використання методу ліній ковзання дозволив не лише розрахувати зусилля деформації, але і повністю визначити поля напружень та швидкості в перерізах деформованого металу. За допомогою даного методу дослідження проаналізовано локальні явища, які зазвичай є основними при вирішенні технологічних задач. Встановлено, що для визначення сил вигладжування розрахункова схема може базуватись на гіпотезі ідеально пластичного тіла та ліній ковзання.

Ключові слова: напружений стан, поверхневий шар, поверхнево-пластична деформація, вигладжування, поле напруження

Залишкові стискуючі напруження, що утворюються в поверхневому шарі деталей при фінішному обробленні, мають визначальний вплив на їх несучу здатність. Тому при проектуванні технологічних процесів необхідно призначати режими зміцненого вигладжування, які дозволяють отримати сприятливий розподіл залишкових напружень по перерізу деталі. Проте до теперішнього часу механізм формування залишкових напружень ще недостатньо вивчений. Це пояснюється різноманіттям факторів, що впливають на їх формування: режимів вигладжування, геометрії зразків і деталей, вихідного напруженого стану поверхневого шару, структури матеріалу та ін. Процес взаємодії зазначених чинників є досить складним і часто експериментальні дані є важкоспівставні, враховуючи певну похибку механічних методів вимірювання залишкових напружень.

Під час зміцнювального вигладжування виникнення залишкових напружень відбувається внаслідок нерівномірності пластичної деформації поверхневих шарів і наявності теплового впливу. Деформація супроводжується взаємопов'язаними процесами зсуву, переорієнтації, дробленням складових структури, що призводить до зменшення щільності пластично деформованого шару.

Збільшення питомого об'єму при пластичному деформуванні досягає 0,3-0,8%. Прагнення пластично деформованого шару збільшити свій об'єм при вигладжуванні перешкоджають нижче розташовані пружнодеформовані шари металу. Таким чином, вигладжування створює в поверхневому шарі стискаючі залишкові напруги, а в глибині - врівноважуючі їх розтягуючі залишкові напруження.

В процесі вигладжування з середніми швидкостями відбувається незначний нагрів поверхневого шару, що практично не робить впливу на формування залишкових напружень. Однак збільшення швидкості вигладжування призводить до значного нагріву поверхневого шару [1, 2, 4, 5], що може змінити характер епюри залишкових напружень на поверхні. Нагрівання викликає розширення поверхневого шару, а подальше охолодження призводить до зменшення його довжини, хоча цьому перешкоджають розташовані нижче холодні шари. Така взаємодія шарів металу має супроводжуватися зменшенням рівня стискаючих залишкових напружень біля поверхні, які виникають за рахунок дії деформаційного фактора. У лабораторіях промислових підприємств основними методами визначення залишкових напружень є механічні, які застосовуються для кінцевого і операційного контролю деталей.

Як наголошувалося вище, при зміцненні в поверхневому шарі створюються стискуючі напруження, а в розташованому нижче — розтягуючі. Проте внаслідок малої товщини зовнішнього стислого шару і взаємної врівноваженості внутрішніх сил стискуючі напруження значно більші за абсолютною величиною і перебивають шкідливий вплив розтягуючого напруження.

Встановлено, що між глибиною залягання залишкового стискуючого напруження і його величиною існує певна залежність. Чим більше абсолютне значення напруження, тим менша глибина його залягання, тобто, тим більший градієнт напруження.

Основний вплив на опір втомі деталей здійснюють залишкові напруження в тонкому поверхневому шарі. Залишкові стискуючі напруження підвищують опір втомі, розтягуючі –

різко знижують. При цьому велику роль відіграє величина напруження, глибина їх залягання та характер розподілу по глибині шару. Під час вигладжуванні в поверхневому шарі створюються стискуючі залишкові напруження величиною до 1,2ГПа. та глибина їх залягання 0,15-0,4 мм (рис. 1).

При вирішенні практичних задач пластичного деформування виникають труднощі, пов'язані з необхідністю врахування об'ємів напруженого та деформованого станів, нелінійності основних рівнянь стану, складності геометрії осередку деформації, окремі межі якого можуть бути невідомі тощо. Тому вирішити таку практичну задачу з врахуванням всіх факторів досить складно. Навіть якщо це вдається, то розв'язок стає настільки громіздким, що втрачає свою інженерну цінність.

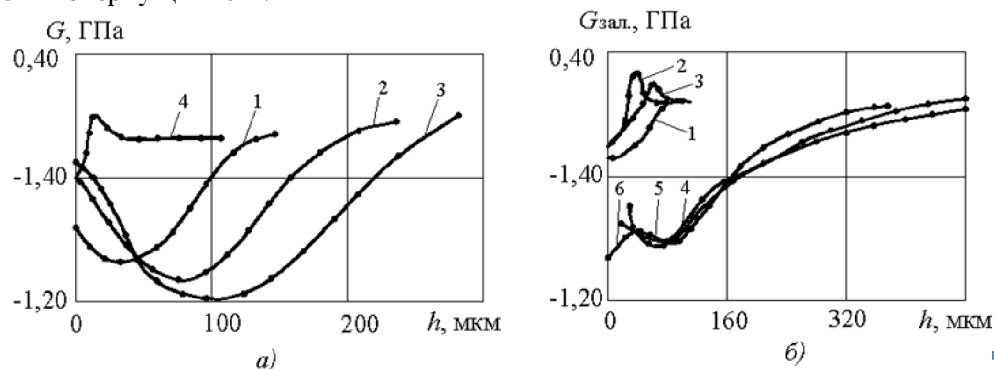


Рис. 1. Приклади залишкових напружень в поверхневому шарі різних матеріалів: а) – загартована сталь 45: 1 – після вигладжування Р=70; 2 – після вигладжування Р=150; 3 – після вигладжування Р=230; 4 – після шліфування. б) – сталь ШХ15: 1- чистове точіння; 2 – шліфування; 3 – полірування; 4 – вигладжування після чистового точіння; 5,6 – вигладжування після шліфування за один і за два робочих хода

Розповсюдженими є припущення про те, що напружений стан – об'ємний, але деформація плоска (плоско деформований стан) або ж припущення про відсутність пружної деформації (модель жорсткопластичного тіла), відсутність зміцнення металу (модель ідеального пластичного тіла).

Велике значення для успішного вирішення задачі має вибір розрахункової моделі та методів її дослідження.

В теорії ППД використовуються різноманітні методи дослідження напруженого стану, зокрема, широко застосовуються метод ліній ковзання та метод кінцевих елементів.

Для дослідження використаний метод ліній ковзання. Він дозволяє не лише розрахувати зусилля деформації, але і повністю визначити поля напружень та швидкості в перерізах деформованого металу, також за допомогою цього методу можна аналізувати локальні явища, які зазвичай є основними при вирішенні технологічних задач [3].

Отримане аналітичне рівняння за допомогою методу ліній ковзання є складною математичною задачею, тому в теорії оброблення металу тиском використовуються головним чином графічні та чисельні методи побудови ліній ковзання [3]. При цьому в якості граничних умов для напружень використовуються умови, якими володіє передня безконтактна границя осередку деформації, тобто профіль, який не був адекватним реальному профілю хвилі. Реальний профіль осередку деформації при ППД вигладжуванням або обкатуванням виникає під впливом двох технологічних рухів: обертання деталі та подачі. Оскільки розглянутий метод дозволяє вирішувати задачі в плоско-деформованій постановці, то важливим фактором є вибір головної площини, тобто площини перпендикулярно до якої відсутні деформації.

Назвемо осьовий переріз вала – площиною подач, а тангенційний переріз, перпендикулярний його осі – площиною швидкостей оброблення.

Співвідношення компонент тензора швидкості деформації по вказаних площинах в теорії ППД практично не досліджено. В цьому напрямку потрібно проводити великий об'єм наукових робіт, проте існує ряд непрямих факторів, які дозволяють вибирати теоретично головну площину на валу під час змінного оброблення алмазним вигладжуванням.

До цих факторів відносяться:

- 1) залишкові осьові напруження в 1,5-2 рази більші, ніж тангенційні;
- 2) пластична хвиля, що виникає перед інструментом має кільцеву форму, та переміщується в напрямку подачі;
- 3) висота хвилі в напрямку швидкості значно менша, ніж в напрямку подачі.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Таким чином, можна прийняти, що поле напруження в рамках плоско деформованого стану потрібно будувати в площині подачі. Розглянемо приклад такого рівняння.

Поле напруження утворюється двома ортогональними сукупностями ліній ковзання (рис. 2), які в кожній точці своєї дотичної площадки мають максимальне дотичне напруження [3].

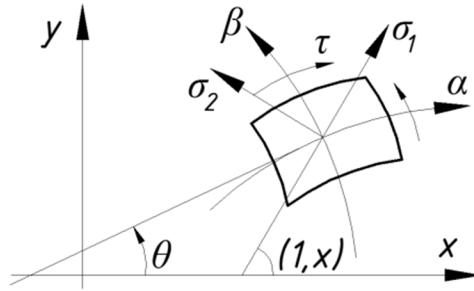


Рис. 2. Ортогональні сукупності ліній ковзання

Лінія першої сукупності (α -лінія) відхиляється вправо на кут $\pi/4$ від напрямку першого напруження σ_1 , а β -лінія відхиляється вліво на такий же самий кут. Кут нахилу дотичної до α -лінії, який відраховується в додатному напрямку від осі абсцис, позначимо θ . При розгляді плоского пластичного потоку, в якому деформація в напрямку осі z рівна нулю, напруження σ_z , є одним із головних напружень, тобто: $\sigma_z - \sigma = 0$, де: $\sigma = 0,5(\sigma_z + \sigma_z)$

Плоска пластична текучість описується:

а) умовами рівноваги

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

б) умовою пластичності

$$(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2 \quad (2)$$

в) умовою співвісності напружень та швидкостей деформації

$$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} = \frac{\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y}}{\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}};$$

г) умовою не стискання

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0;$$

де: σ_x та σ_y – нормальні компоненти напруження; τ_{xy} – дотичні компоненти напруження; k – пластична постійна; v_x, v_y – компоненти швидкостей деформації; x, y – координати точок.

Рівняння (2) виконується, якщо рівняння для компонент напружень мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} \sigma_y = \sigma + k \cdot \sin 2\theta; \\ \sigma_x = \sigma - k \cdot \sin 2\theta; \\ \tau_{xy} = k \cdot \cos 2\theta; \end{cases} \quad (3)$$

Рівняння (1) та (3) зводяться до системи двох нелінійних диференціальних рівнянь, які визначають обидві сукупності ліній ковзання:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial x} - 2k \left(\cos 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + \sin 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) &= 0; \\ \frac{\partial \sigma}{\partial y} - 2k \left(\sin 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + \cos 2\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) &= 0; \end{aligned}$$

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Ці рівняння можна звести до співвідношень Генкі:

$$\alpha - \text{лінія} \begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x} = \operatorname{tg} \theta, \\ \frac{\sigma}{2k} - \theta = \operatorname{const} = \xi \end{cases} \quad \beta - \text{лінія} \begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x} = -\operatorname{ctg} \theta, \\ \frac{\sigma}{2k} + \theta = \operatorname{const} = \eta \end{cases} \quad (4)$$

Рівняння (4) вказують на те, що в будь-якій точці поля напружень відомими є параметри ξ і η , а у загальному полі можна визначити значення σ . Таким чином, рівняння зводиться до ряду простих задач, які задовольняються тими чи іншими граничними умовами [3].

Розглянемо розв'язок такої задачі стосовно до процесів ППД.

Для полегшення розуміння на даному етапі обмежимося побудовою статично можливого поля напружень, яке виникає в площині подачі інструменту під час вигладжування циліндричного валу вигладжувачем, який має профільний радіус R_{np} (рис. 3). Статичним називають поле напружень, яке можливо побудувати незалежно від поля швидкостей зміщення.

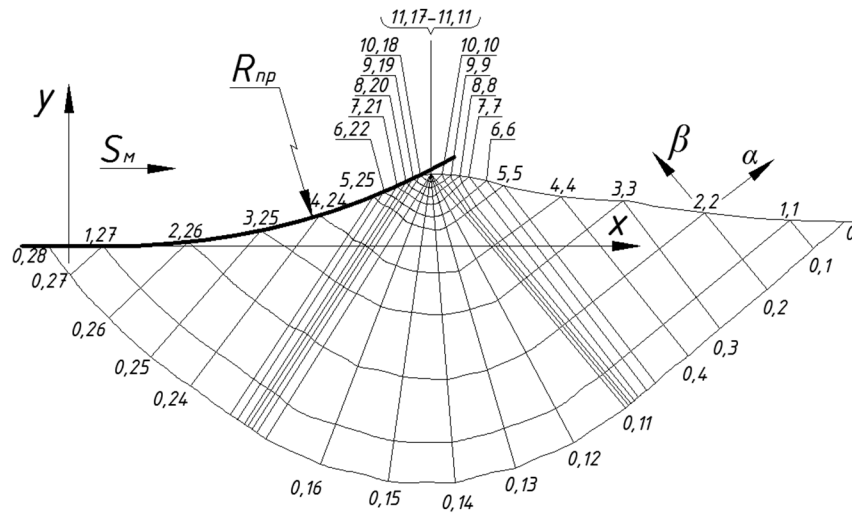


Рис. 3. Статистично можливе поле напруження при ППД вигладжуванням

Під час оброблення попереду інструменту, який має в площині подачі профільний радіус R_{np} виникає хвиля, безконтактний профіль якої наведено лінією 0,0-11,11. Точка 0,0 визначає межу осередку деформації металу попереду інструменту. Точки 11,11 (та співпадаюча з нею точка 11,17) і 0,28 – крайні точки дуги контакту.

Граничні умови для напружень в будь-якому контурі визначаються за наступними співвідношеннями [3]:

$$\begin{aligned} \theta &= \psi \pm 0,5 \cdot \arccos \frac{\tau_n}{k} + m\pi; \\ \sigma &= \sigma_n + k \cdot \sin 2(\theta - \psi), \end{aligned} \quad (5)$$

де ψ – кут між нормаллю до контуру і віссю x ; σ_n , τ_n – нормальна та дотична складові напружень; m – довільне ціле число.

Наявність двох розв'язків для σ і θ , що задовольняють умову текучості, пояснюється квадратичним характером останнього.

Для вибору знаку необхідно додаткові відомості, які потрібно запозичувати з механічної постановки задачі.

З рівняння (5) випливає, що поле напружень біля межі осередку деформації, вільної від дії сили, визначається лише формою цієї межі.

Оскільки на відрізку 0,0-11,11 напруження $\sigma_n = \tau_n = 0$, то на ньому

$\sigma = -k$, $\theta = \psi \pm \frac{\pi}{4}$. Знак «-» перед k взято з механічних міркувань, бо вздовж лінії 0,0-11,11

відбувається стискання. Дана умова є першою граничною умовою для напружень. Отже, $\alpha - \beta$ -лінії підходять до вільної межі 0,0-11,11 під кутом $\pi/4$.

Використовуючи цю граничну умову, в області 0,0 – 11,7 – 0,11 розв'язком задачі Коші, можна визначити значення x, y, σ, θ у вузлах сітки ліній ковзання.

В області 0,11 – 11,11 – 11,17 – 0,17 лінії ковзання утворюють «відцентрове віяло»,

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

всередині якого значення x, y, σ, θ у вузлах сітки визначаються розв'язками окремого випадку початкової характеристики задачі. Кут φ при вершині «віяла» залежить від кута γ між β -лінією 11,17 – 0,17 та контуром інструменту:

$$\gamma = 0,5 \arccos 2\mu, \quad (6)$$

де μ – коефіцієнт тертя між інструментом та металом що деформується.

Відповідно, $\varphi = \frac{3}{4}\pi - \gamma - \lambda$, (λ – кут між відрізком 0,0 – 11,11 та контуром інструменту в точці 1,11).

Рівняння (6) є другою граничною умовою.

Область 0,17 – 11,17 – 0,28 є областю змішаних граничних умов. З однієї сторони, її визначають умови на відрізку 11,17 – 0,17, а з іншої – умови на контурі інструменту, які задаються рівнянням (6). Значення x, y, σ, θ у вузлах сітки області 0,17 – 11,17 – 0,28 визначаються розв'язком змішаної задачі.

Напруження в будь-якій точці поля відповідно до (6) визначаються кутом повороту α -лінії при русі від вільної межі до інструменту (наприклад, від точки 2,2 до точки 2,26).

Характер розподілу головних напружень та епіюра контактних напружень показано на рис. 4.

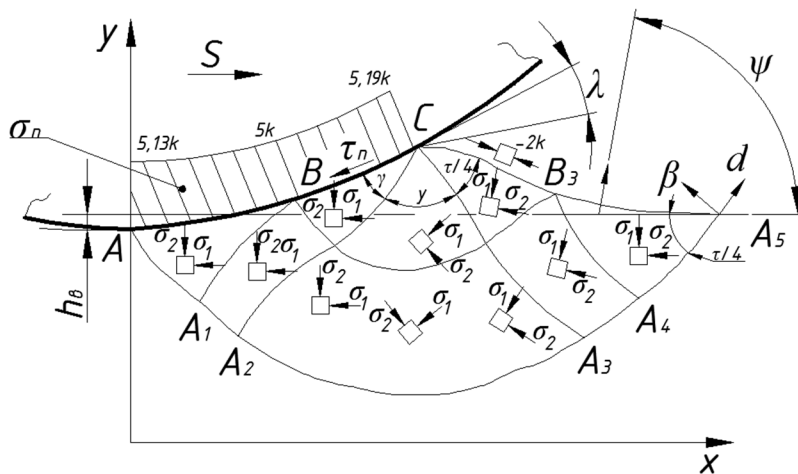


Рис. 4. Розподіл головних напружень та епіюра контактних напружень

Повернімося до аналізу результатів розрахунку нормальних напружень σ_n на відрізку, де контактують інструмент з деталлю. Для зручності аналізу виразимо них як межу текучості матеріалу при зуві k . Як бачимо з рисунка, контактні напруження для вирішення задачі пластичності змінюються в межах від 4,99 до 5,19 k . Проте, контактні напруження у вирішенні пружної задачі розділяються за еліптичним законом, тобто мають принципово інший характер.

Виникає питання, як кількісно визначити величину k , зважаючи на те що, при ППД відбувається зміцнення металу.

Припустимо що, $k = \frac{HB}{5,22}$.

Отже, в першій тотожності можна вважати, що середнє напруження на дузі контакту інструменту і деталі при ППД буде рівним твердості HB .

Ці значення для вигладжування сталених циліндричних поверхонь (сталь ШХ – 15) вигладжувачем діаметром 1,5 мм наведено в табл. 1.

З таблиці видно, що значення $\sigma_{n\text{сер}}$ мало залежать від силового режиму вигладжування і співпадають з величиною HB для досліджуваного металу.

Тому, виходячи з результатів, ППД здійснювалась в діапазоні сил, які відповідають інтенсивності деформації. Отже, в першому припущенні для визначення сил вигладжування розрахункова схема може базуватись на гіпотезі ідеально пластичного тіла та ліній ковзання. Прагнення отримати більш точне значення $\sigma_{n\text{сер}}$ з метою точнішого розрахунку сили вигладжування з практичної точки зору є недоцільним, тому що спостерігається поява значних похибок при визначенні площі контакту. Важливішим науковим та практичним завданням теорії ППД є прогнозування експлуатаційних властивостей поверхневого шару. Ці властивості залежать від накопичення деформацій, залишкових напружень, закінчення ресурсу пластичності металу. Розрахунок цих параметрів стану поверхневого шару потребує більш

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

точного визначення напруженого стану осередку деформації на основі використання моделі зміцнення тіла та врахування історії навантаження.

Таблиця 1

Значення середнього напруження $\sigma_{n\text{ сеп}}$ на площі контакту інструменту та деталі

P_y , кН	0,5	0,8	1	1,5	2	2,5	3,0	3,5	4
Площа контакту F , мм ²	0,35	0,44	0,55	0,85	1,1	1,47	1,58	1,86	2,32
$\sigma_{n\text{ сеп}}$, кН/мм ²	1,74	1,81	1,81	1,76	1,81	1,70	1,80	1,72	1,72

Отже, одним з основних параметрів процесу вигладжування, який впливає на напружений стан поверхневого шару, є сила вигладжування. Із збільшенням сили всі характеристики напруженого стану зростають. В вихідній шліфованій або обточеній перед вигладжуванням поверхні залишкові напруження як правило, зазвичай – розтягуючі, величиною до 0,5 ГПа. Наявність напружень стискування в поверхневому шарі та округла форма мікрогеометрії поверхні без глибоких впадин між мікронерівностями є основними передумовами для різкого підвищення опору втомі вигладжених деталей.

Інформаційні джерела

1. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин / Балтер М.А. - М.: Машиностроение, 1978.–184с.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения / Биргер И.А. – М.:Машгиз, 1963.–233с.
3. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов / Томленов А.Д. – М.: Металлургия, 1972. 408 с.
4. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием / Яценко В.К., Зайцев Г.З, Притченко В.Ф., Ивченко Л.И.. - М.: Машиностроение, 1985.-232с.
5. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Хворостухин Л.А., Шишкин С.В., Ковалев А.П., Ишмаков Р.А. – М.: Машиностроение, 1988. – 144с.

Мороз С.А., к.т.н., Приступа С.А., к.т.н., Дужич Б.С.

Луцкий национальный технический университет

АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ НА ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

В статье проведено исследование механизма формирования напряженного состояния поверхностного слоя металла при обработке поверхностно-пластического деформирования, в частности алмазным выглаживанием. Установлено, что при проектировании технологических процессов необходимо назначать режимы поверхностно-пластического деформирования, которые позволяют получить благоприятное распределение остаточных напряжений по сечению детали. Использование метода линий скольжения позволило не только рассчитать усилие деформации, но и полностью определить поля напряжений и скорости в сечениях деформированного металла. С помощью данного метода исследования проанализированы локальные явления, которые обычно являются основными при решении технологических задач. Установлено, что для определения сил выглаживания расчетная схема может базироваться на гипотезе идеально пластического тела и линий скольжения.

Ключевые слова: *напряженное состояние, поверхностный слой, поверхностно-пластическая деформация, алмазное выглаживания, поле напряжения*

S. Moroz, S. Prystupa, B. Duzhich

Lutsk National Technical University

ANALYSIS OF FORMATION STRESS STATE SURFACES FOR FINISHING

The paper studied the mechanism formation the state stress of the surface layer the metal in the processing of surface-plastic deformation, in particular diamond smoothing. It was found that the design processes should be prescribed modes of surface plastic deformation, which allows to obtain a favorable distribution of the residual stresses over the section details. The use slip lines has allowed not only to calculate the deformation of the force, but also to fully determine the stress field and speed on sections of deformed metal. With this method, the study analyzed the local phenomena, which are usually major in solving technological problems. It is established that to determine the strength smoothing calculation scheme may be based on the hypothesis of a perfectly plastic body and slip lines.

Keywords: *stress state, the surface layer, the surface-plastic deformation, diamond smoothing, stress field.*