**Динаміка та дослідження машин**

**Практична робота №1**

**Визначення жорсткості верстата при різанні**

**Загальні відомості**

Точність верстата характеризує його здатність забезпечити вимоги креслення деталі, що оброблюється, за формою, розмірами, взаємному розташуванню окремих поверхонь і шорсткості оброблених поверхонь. Точність верстата характеризують його геометричні, кінематичні і динамічні похибки.

**Геометричні похибки** верстата відбивають правильність форми і взаємного розташування частин верстата, що несуть інструмент і деталь, а також траєкторії їхнього взаємного переміщення. До геометричних похибок відносяться: прямолінійність поздовжнього переміщення рухомого вузла по напрямним; радіальне, осьове і торцеве биття центруючої й опорної поверхонь шпинделя; сталість положення ділильних пристроїв і поздовжньо рухомих вузлів і т.д.

**Кінематичні похибки** верстата показують непогодженість переміщення вузлів верстата під час роботи або невідповідність величини дійсного переміщення заданій величині. Кінематичні похибки найбільше виявляються в довгих ланцюгах зубчастих передач.

**Динамічні похибки** верстата виникають при переміщенні вузлів верстата під навантаженням і виявляється в нерівномірності переміщення робочих органів, у виникненні вібрацій, у підвищеному рівні шуму.

Одним з факторів, що найбільш вагомо впливає на точність верстата є його жорсткість.

Жорсткість верстата – це здатність конструкції верстата протидіяти пружній деформації під впливом робочих навантажень. Жорсткість верстата складається з двох складових – жорсткості окремих деталей і жорсткості стиків між деталями. Жорсткість позначається літерою *с* або *j* і вимірюється в *Н/мкм* (або в *Н/мм*)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

де *Q* – сила, яка прикладається до верстата, що досліджується, *Н*;

*δ* ‒ пружна деформація (переміщення) досліджуваного вузла верстата під впливом сили *Q*, *мкм*.

Величина, що зворотна до жорсткості називається податливістю, позначається літерою *е* і вимірюється в *мкм/Н* (*мм/Н*)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

При послідовному з’єднанні елементів системи їхні податливості підсумовуються. Тобто, якщо пружна система ВПІД складається із таких складових елементів як верстат, пристосування для закріплення деталі, різального інструмента і деталі, що обробляється, то загальна податливість системи буде становити:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

де *е*в – податливість всього верстата, *мкм*/*Н*;

*е*п – податливість пристосування, *мкм*/*Н*;

*еі* – податливість ріжучого інструмента, *мкм*/*Н*;

*е*д – податливість деталі, що обробляється, *мкм*/*Н*;

*δ*Σ – загальна деформація (переміщення), *мкм*;

*Q*Σ – сила, що призвела до деформації, *Н*.

Якщо вважати, що пристосування разом з ріжучим інструментом входять до складу верстата, то рівняння (3) можна записати в вигляді:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

Таким чином, якщо знати загальну податливість (жорсткість) технологічної обробної системи (ВПІД) і податливість (жорсткість) деталі, що обробляється, то можна розрахувати податливість (жорсткість) верстата.

На величину деформації деталі впливає тільки жорсткість самої деталі й схема її базування (деталь закріплена консольно в патроні; або закріплена в патроні й підтискається центром; або закріплена в центрах…). Жорсткість деталі нескладної форми при статично визначеній схемі закріплення можна досить просто розрахувати аналітичним методом.

Сумарні переміщення елементів верстата залежать від жорсткості окремих його вузлів і деталей, від величини натягу у рухомих і нерухомих стиках між деталями верстата, від стану підшипників, кількості змащення в рухомих з'єднаннях і інших факторах. Урахувати всі фактори, що впливають на жорсткість верстата в розрахунках практично неможливо. Кілька верстатів однієї моделі можуть мати дещо різну жорсткість. Тому єдиним точним методом визначення жорсткості конкретного верстата є експеримент.

Жорсткість (податливість) верстата аналітичним методом точно розрахувати неможливо, тому що верстат сам є дуже складною системою і складається з багатьох підсистем. Тому її разом з пристосуванням і різальним інструментом найчастіше визначають експериментально безпосереднім виміром деформацій при навантаженні вузлів верстата визначеними навантаженнями в визначених напрямках. Розрахована таким чином жорсткість буде статичною жорсткістю, якщо вимірювання проводились на непрацюючому верстаті і динамічною жорсткістю, якщо вимірювання проводяться на працюючому.

Для визначення податливості (жорсткості) верстата в загальному випадку потрібні точні вимірювальні прилади для реєстрації дуже малих деформацій вузлів верстата під впливом навантажень; точні навантажувальні прилади для здійснення цих навантажень; пристосування для здійснення просторової орієнтації навантажень.

Під час процесу різання верстат зазнає впливу сил різання і деформується під впливом цих сил. Це дає підставу визначати жорсткість верстата за допомогою навантаження не зовнішніми силами, а силами різання.

Жорсткість при різанні на токарному верстаті можна визначати й без спеціальної апаратури, так званими виробничими методами.

Для визначення жорсткості верстата виробничим методом необхідно обробити із однаковою силою різання дві деталі з різною жорсткістю. Взаємні переміщення інструмента й деталі, що обробляється, обумовлюють жорсткістю системи ВПІД при різанні й складаються з пружних переміщень (відтиснення) деталі й пружних переміщень елементів металорізального верстата, включаючи переміщення деталей токарного патрона, у якому закріплена деталь. Жорсткість верстата при різанні визначають зняттям з заготовки заданого нерівномірного припуску і безпосереднім виміром змінної сили різання, що виникає при цьому, а відповідні взаємні переміщення інструменту і заготовки находять безпосереднім вимірюванням або виміром відхилення розміру обробленої деталі.

Одним з виробничих методів визначення жорсткості верстата є обробка в центрах циліндричної східчастої заготовки. Заготовка закріплюється на спеціальній оправці з різною у двох взаємно перпендикулярних площинах жорсткістю.

Рис. 1.1. Схема визначення жорсткості верстата за допомогою спеціальної оправки

Заготівка *2* (рис. 1.1), закріплюється за допомогою шпонки *3* і гайки *4* на оправці *1*, яка має максимальну *c*max та мінімальну *c*min жорсткість в двох взаємно перпендикулярних напрямах, значення жорсткостей відомі. Після підведення різця *5*, до торкання базової циліндричної поверхні меншого діаметру заготовку проточують з глибиною різання *t*.

Максимальне *δ*max і мінімальне *δ*min відхилення обробленої поверхні заготовки від круглої форми вимірюють відносно базової поверхні *d*0

|  |  |
| --- | --- |
| *δ*max = 0,5(*d*max – *d*0);*δ*mіn = 0,5(*d*min – *d*0). | (5) |

Якщо позначити жорсткість верстата *cв*, і нехтуючи можливою відносно невеликою зміною сили різання, можемо записати рівняння сил різання, що відповідає двом миттєвим взаємно перпендикулярним положенням оправки.

|  |  |
| --- | --- |
| $$\frac{δ\_{max}}{\frac{1}{c\_{в}}+\frac{1}{с\_{min}}}=\frac{δ\_{min}}{\frac{1}{c\_{в}}+\frac{1}{с\_{max}}}=F=\frac{δ}{e\_{Σ}}=δc\_{Σ}$$ | (6) |

Виходячи з цього, жорсткість верстата *с*в визначиться за формулою:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

При іншому виробничому способі визначення жорсткості верстата деталь оброблюється з однаковою глибиною різання *t* і з різною довжиною *L* консольного висування з патрона.

*S*

*Lmax*

*d*0

*t*

*d*

*Lmin*

Рис. 1.2. Схема визначення жорсткості верстата за допомогою деталі різної довжини

Мінімальна *c*min і максимальна *c*max жорсткість оброблюваної деталі визначається при максимальній і мінімальній довжині, відповідно, за формулами:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

де  – момент інерції перетину деталі;

 *Е* = 2,1⋅105 *Н/мм*2 – модуль пружності сталі.

 Так як при обробці деталі різної жорсткості вигін буде різним, ми отримаємо різні значення діаметра обробленої поверхні, та різні значення максимального *δ*max і мінімального *δ*min відхилень обробленої поверхні деталі від початкового значення *d*0. Використовуючи формулу (8) можна визначити жорсткість верстата.

**Порядок виконання завдання**

* 1. Визначити наближено величини (мах. і мін.) жорсткості заготівки за формулами (8) для двох заданих варіантів її вильоту (табл. 1.2.). Момент інерції деталі визначають по необробленому діаметру прутка 42 мм.

1.2. Встановити деталь у патрон з вильотом *L*min і обробити на довжину 5…10 *мм*, починаючи з торкання різцем ділянки діаметром *d*0 = 40 мм.

Мікрометром виміряти відхилення *δ*min обробленого діаметра за рахунок вигину від початкового *d*0 при меншому вильоті.

* 1. Висунути деталь з патрона на більший виліт *L*mах і обробити на довжину 5…10 *мм*, починаючі з торкання різцем ділянки діаметром *d*0 = 40 мм.

Виміряти відхилення *δ*max обробленого діаметра за рахунок вигину від початкового *d*0 при більшому вильоті.

1.4. Визначити за формулами (5) мінімальне та максимальне відхилення обробленої поверхні заготівки (викликане деформаціями системи ВПІД).

1.5. Визначити за формулою (7) жорсткість верстата.

1.6. Оцінити можливий вплив на результати проведеного розрахунку точності вимірювання деформацій мікрометром з ціною поділки *р*, мм.

При визначенні мінімального та максимального відхилення значення найбільшого і найменшого діаметрів обробленої поверхні заготівки з врахуванням похибки вимірювання використовуються формули:

*d'max = dmax ±р/2 мм; d’mіn = dmin ±р/2 мм*

Найбільше відхилення жорсткості від розрахованого значення відповідатиме одному з двох варіантів:

1. варіант: *d’max = dmax +p/2 мм; d’mіn = dmіn -p/2 мм*
2. варіант: *dmax = dmax - p/2 мм; dmіn = dmіn +p/2 мм*
	1. Заповнити таблицю результатів розрахунку (табл. 1.1.).

**Приклад виконання завдання**

* 1. Визначаємо наближено величини (мах. і мін.) жорсткості заготівки за формулами (8) для двох заданих варіантів її вильоту (табл. 1.2.). Момент інерції заготівки визначаємо по необробленому діаметру прутка 42 мм.

|  |  |
| --- | --- |
|  | *Із = π d4/64* = 3,14·424 /64 = 152667 мм4 Тоді *сз.mах = (3·2·105·* 152667*)/ 803* = 1,79·105 Н/мм *сз.min = (3·2·105·* 152667*)/ 1203* = 0,53·105 Н/мм |

1.2. Встановлюємо деталь у патрон з вильотом *L*min і обробляємо на довжину 5…10 *мм*, починаючи з торкання різцем ділянки діаметром *d*0 = 40 мм.

Мікрометром виміряємо відхилення *δ*min обробленого діаметра за рахунок вигину від початкового *d*0 при меншому вильоті.

1.3. Висуваємо деталь з патрона на більший виліт *L*mах і обробляємо на довжину 5…10 *мм*, починаючі з торкання різцем ділянки діаметром *d*0 = 40 мм.

Виміряємо відхилення *δ*max обробленого діаметра за рахунок вигину від початкового *d*0 при більшому вильоті.

1.4. Визначаємо за формулами (5) мінімальне та максимальне відхилення обробленої поверхні заготівки (викликане деформаціями системи ВПІД).

|  |  |
| --- | --- |
| *δ*max = 0,5·(*d*max – *d*0);*δ*mіn = 0,5·(*d*min – *d*0). | *δmax = 0,5·(40,17– 40) = 0,085 мм;**δmіn = 0,5·(40,11 – 40) = 0,055 мм.* |

1.5. Визначаємо за формулою (7) жорсткість верстата.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

*св = (0,085-0,055)·1,79·105·0,53·105/(0,055·1,79·105- 0,085·0,53·105) = 5,33·104 Н/мм*

1.6. Оцінюємо можливий вплив на результати проведеного розрахунку точності вимірювання деформацій мікрометром з ціною поділки 0,01 мм.

При визначенні мінімального та максимального відхилення значення найбільшого і найменшого діаметрів обробленої поверхні заготівки з врахуванням похибки вимірювання використовуємо формули:

*d'max = dmax ±р/2 мм; d’mіn = dmin ±р/2 мм*

*d’*max = *40,17±0,005 мм; d’*mіn = *40,1±0,005 мм*

Тоді найбільше відхилення жорсткості становитиме при:

1. варіант: *d’*max = *40,17+0,005 = 40,175 мм; d’*mіn = *40,11-0,005 = 40,105**мм*

*δmax = 0,5·(40,175– 40) = 0,0875 мм; δmіn = 0,5·(40,105 – 40) = 0,0525 мм.*

1. варіант: *d’*max = *40,17-0,005 = 40,165 мм; d’*mіn = *40,11+0,005 = 40,115**мм*

*δmax = 0,5·(40,165– 40) = 0,0825 мм; δmіn = 0,5·(40,115 – 40) = 0,0575 мм.*

Тоді жорсткість верстата (з найбільшою похибкою) становитиме:

1 варіант:

*c'в=(0,0875-0,0525)·1,79·105·0,53·105/(0,0525·1,79·105-0,0875·0,53·105)= 6,974·104 Н/мм*

2 варіант:

*c'в=(0,0825-0,0575)·1,79·105·0,53·105/(0,0575·1,79·105-0,0825·0,53·105)= 4,007·104 Н/мм*

Визначаємо найбільше (по модулю) абсолютне та відносне відхилення теоретичних розрахунків з врахуванням найбільшої похибки вимірювання за формулою:

Δ”*св = (c’в - св)100% / св*

*Δ”св* = (6,974– 5,33)100% / 5,33 = 30,8%

Отримані відхилення показують на незадовільну точність визначення деформацій системи ВПІД за допомогою мікрометра з ціною поділки 0,01 мм

(*Δ”св*= 30,8% > 5%).

Рекомендовано виконувати вимірювання інструментом з ціною поділки 0,002 або 0,001 мм.

* 1. Заповнюємо таблицю результатів розрахунку (табл. 1.1.).

Вхідні параметри: Dзагот = 42 мм, оброблений діаметр *d*0 = 40 мм.

 Табл.1.1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Дослід** | ***Lзаг , мм*** | ***d*min*****d*max**,***мм*** | ***Із , мм4*** | ***сз.mах ,******Н/мм*** | ***сз.min ,******Н/мм*** | ***δmax , мм*** | ***δmin , мм*** | ***св , Н/мм*** | ***с'в , Н/мм*** | **Δ *св ,Н/мм*** | **Δ*”св , %*** |
| 1 | 80 | 40,11 | 152667 | 1,79·105 | 0,53·105 | 0,085 | 0,055 | 5,33·104 | 6,974·104 | 1,644·104 | 30,8 |
| 2 | 120 | 40,17 |

**Умови завдання до практичного заняття №1**

Dзагот = 42 мм, d0 = 40 мм. Табл.1.2.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Варіант** | **Заготівка** | **Ціна поділки мікрометра, *р*,** **мкм** |  |
| **Оброблені діаметри** | **Довжина** |
| ***d*max, мм** | ***d*min, мм** | ***Lз*, мм** **міn/max** |
| **1** | 40,15 | 40,12 | 50/100 | 10 |  |
| **2** | 40,155 | 40,120 | 60/100 | 5 |  |
| **3** | 40,158 | 40,124 | 70/120 | 2 |  |
| **4** | 40,151 | 40,114 | 80/140 | 1 |  |
| **5** | 40,15 | 40,11 | 100/160 | 10 |  |
| **6** | 40,155 | 40,115 | 50/100 | 5 |  |
| **7** | 40,156 | 40,114 | 60/100 | 2 |  |
| **8** | 40,152 | 40,111 | 70/120 | 1 |  |
| **9** | 40,18 | 40,12 | 80/140 | 10 |  |
| **10** | 40,185 | 40,125 | 100/160 | 5 |  |
| **11** | 40,188 | 40,126 | 50/100 | 2 |  |
| **12** | 40,181 | 40,119 | 60/100 | 1 |  |
| **13** | 40,19 | 40,12 | 50/100 | 10 |  |
| **14** | 40,195 | 40,125 | 60/100 | 5 |  |
| **15** | 40,198 | 40,126 | 70/120 | 2 |  |
| **16** | 40,191 | 40,117 | 80/140 | 1 |  |
| **17** | 40,18 | 40,12 | 50/100 | 10 |  |
| **18** | 40,185 | 40,125 | 60/100 | 5 |  |
| **19** | 40,188 | 40,127 | 70/120 | 2 |  |
| **20** | 40,181 | 40,119 | 80/140 | 1 |  |