**Шорсткість поверхні**

**1. Загальні причини виникнення шорсткості**

**різання вібрація деформація шорсткість**

Всі різноманітні фактори, що обумовлюють шорсткість обробленої поверхні, можна об’єднати в три основні групи:

* причини, пов’язані з геометрією процесу різання;
* причини, пов’язані з пластичною та пружною деформаціями оброблюваного матеріалу;
* причини, пов’язані з виникненням вібрацій різального інструменту.

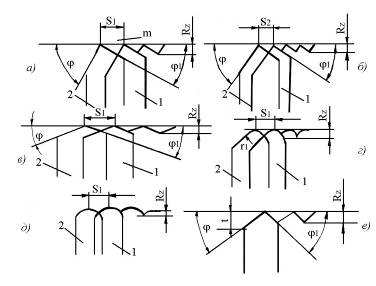
Процес виникнення нерівностей внаслідок геометричних причин прийнято трактувати як копіювання на оброблюваній поверхні траєкторії руху і форми різальних лез. З геометричної точки зору величина, форма і взаємне розташування нерівностей (напрямок слідів обробки) визначаються формою і станом різальних лез і тими елементами режиму різання, які впливають на зміну траєкторії руху різальних лез відносно оброблюваної поверхні.

В різних умовах обробки пластичні та пружні деформації оброблюваного матеріалу і вібрації спотворюють геометрично правильну форму нерівностей, порушують їх закономірний розподіл на поверхні і суттєво збільшують їх висоту. В ряді випадків пластичні деформації та вібрації викликають появу поздовжньої шорсткості, яка досягає значних розмірів, і збільшення поперечної шорсткості.

Переважно на формування шорсткості поверхні впливає (як правило) одна з трьох згаданих груп причин, яка і визначає характер і величину шорсткості. Проте, в окремих випадках шорсткість виникає в результаті одночасної і майже рівнозначної дії всіх згаданих причин і внаслідок цього немає чітко виражених закономірностей.

**2. Геометричні причини створення шорсткості при точінні**

За один оберт заготовки різець переміщується на величину подачі S1 (мм/об) і переходить з положення 2 в положення 1 (рис. 1, *а*). При цьому на обробленій поверхні залишається деяка частина металу, не знята різцем, і вона створює залишковий гребінець m. Цілком очевидно, що величина і форма нерівностей поверхні, що складається із залишкових гребінців, визначається подачею S1 і формою різального інструменту. Наприклад, при зменшенні подачі до значення S2 висота нерівностей Rz знижується до (рис. 1, *б*). Зміна кутів φ і φ1 в плані впливає не тільки на висоту, але й на форму нерівностей поверхні (рис. 1, *в*). При використанні різців із заокругленою вершиною достатньо великого радіуса r1 форма нерівностей стає відповідно також заокругленою (рис. 1, *г*). При цьому збільшення радіуса заокруглення вершини різця до r2 призводить до зменшення висоти Rz шорсткості (рис. 1, *д*).



*Рис. 1. Геометричні причини утворення шорсткості під час точіння*

Виходячи з наведених міркувань геометричного характеру, проф. Чебишев В.Л. запропонував визначати висоту Rz нерівностей при обробці різцем в залежності від подачі S і радіуса r заокруглення вершини різця за формулою:

. (1)

В процесі створення нерівностей при точінні різцями з невеликими радіусами заокруглення і з великими подачами беруть участь не тільки криволінійна частина різальної кромки різця, створена радіусом r заокруглення, але й прямолінійна ділянка різального леза (рис. 1, *е*) [2]. В цьому випадку у формулу Чебишева В.Л. включають значення головних кутів φ і φ1 в плані:

.

Якщо шорсткість формується повністю заокругленою частиною різальної кромки, то висота мікронерівностей може бути визначена за формулою:

.

Якщо при виготовленні різця або в процесі його експлуатації на його лезах утворюються вищерблення, то вони прямо впливають на підвищення шорсткості поверхні.

За практичними даними при затупленні різального інструмента і появі на ньому вищерблень шорсткість обробленої поверхні при точінні зростає на 50–60 %, при фрезеруванні циліндричними фрезами – на 100–115 %, при фрезеруванні торцевими фрезами – на 35–40 %, при свердлінні – на 30–40 % і при розвертанні – на 20–30 %.

Вказане збільшення шорсткості оброблюваної поверхні при затупленні різального інструмента пов’язане не тільки з геометричним впливом вищерблень, що виникають на різальному лезі, але й зі збільшенням радіуса заокруглення леза. Збільшення радіуса заокруглення леза збільшує ступінь пластичної деформації металу поверхневого шару, що призводить до зростання шорсткості поверхні.

Для усунення впливу вищерблень і притуплення різального леза рекомендується ретельне (бажано алмазне) доведення інструментів і своєчасне їх переточування.

Наведені вище відомості про геометричні причини виникнення нерівностей при точінні дають можливість зробити наступні висновки.

1. Збільшення подачі, головного φ і допоміжного φ1 кутів різця у плані призводить до зростання висоти нерівностей. При чистовій обточці доцільно користуватись прохідними різцями з малим значенням кутів φ і φ1. Не слід без особливої необхідності застосувати підрізні різці.

2. Зростання радіуса заокруглення вершини різця знижує висоту шорсткості поверхні.

3. Зниження шорсткості різальних поверхонь інструмента за допомогою ретельного (бажано алмазного) доведення усуває вплив нерівностей різального леза на оброблювану поверхню. Разом зі зменшенням шорсткості оброблюваної поверхні, доведення помітно підвищує стійкість різального інструмента, а отже, і економічність його використання.

**3. Пластичні та пружні деформації металу поверхневого шару**

При обробці різанням пластичних матеріалів метал поверхневого шару зазнає пластичної деформації, в результаті якої суттєво змінюються розміри і форма нерівностей обробленої поверхні (звичайно шорсткість при цьому збільшується).

При обробці крихких металів спостерігається виривання окремих частинок металу, що також веде до збільшення висоти і зміни форми нерівностей.

**Швидкість різання** є одним із найбільш суттєвих факторів, які впливають на розвиток пластичних деформацій при точінні. Малі швидкості різання вуглецевих конструкційних сталей (сталі 30, 40, 50) порядку V = 1 м/хв призводять до порівняно невеликого підвищення температури і сприяють утворенню елементної стружки. При цьому відокремлення стружки відбувається легко і без помітних деформацій верхнього шару обробленої поверхні. Нерівності на обробленій поверхні незначні.

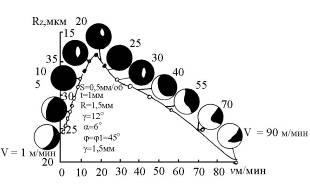
Зі збільшенням швидкості різання до 40 м/хв в процесі утворення стружки виділяється велика кількість теплоти, яка сприяє пластичній течії відокремлюваного металу вздовж передньої та задньої поверхонь різця. В деякий момент під дією зусиль, які притискають шари металу до передньої поверхні різця, і високої температури шари металу приварюються до передньої (і частково задньої) поверхні, створюючи наріст. При швидкості різання 20–40 м/хв наріст найбільший і стійкий.

При подальшому підвищенні швидкості різання кількість теплоти, що виділяється у процесі стружкоутворення, збільшується. При цьому наріст нагрівається швидше за інші частини зони деформації, частково роззміцнюється і сили зчеплення окремих частинок наросту вже не можуть чинити достатній опір силам тертя спливаючої стружки. Тому частинки металу застійної зони виносяться разом зі стружкою. Внаслідок цього наріст зменшується і в інтервалі швидкостей 60–70 м/хв повністю зникає. При наступному підвищенні швидкості різання нарости на різці більше не створюються.

Шорсткість оброблюваної поверхні тісно пов’язана з процесами утворення стружки і в першу чергу з явищем наросту. В зоні малих швидкостей (V = 2–5 м/хв), при яких наріст не утворюється, розміри нерівностей обробленої поверхні незначні. Зі збільшенням швидкості розміри нерівностей поверхні зростають, досягаючи при 20–40 м/хв свого найбільшого значення, що багатократно перевищує розрахункову величину.

Подальше підвищення швидкості різання зменшує наріст і знижує висоту шорсткості обробленої поверхні.

В зоні швидкостей (V > 70 м/хв.), при яких наріст не утворюється, шорсткість поверхні виявляється мінімальною. В цьому випадку подальше збільшення швидкості різання лише несуттєво знижує висоту шорсткості поверхні. Зв’язок процесів утворення шорсткості обробленої поверхні та наросту на різці зі швидкістю різання показаний на рис. 2.



*Рис. 2. Вплив швидкості різання на утворення наросту та шорсткість обробленої поверхні при точінні сталі 45*

При великій швидкості різання глибина пластично деформованого поверхневого шару незначна, і розміри шорсткості наближаються до розрахункових.

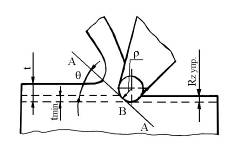
У випадку обробки крихких матеріалів (наприклад, чавуну) разом із зрізанням окремих частинок металу відбувається їх зсув і безладне крихке відколювання від основної маси металу, що збільшує шорсткість поверхні. Підвищення швидкості різання зменшує відколювання частинок, і оброблювана поверхня стає більш гладкою.

При чистовій обробці металів, коли стан і точність обробленої поверхні мають вирішальне значення, цілком природне намагання вести обробку в зоні швидкостей, при яких наросту на інструменті не утворюється, а шорсткість поверхні виходить найменшою. Такою зоною для конструкційних сталей (як це відмічалось раніше) є 5 м/хв ≥ V ≥ 70 м/хв.

**Подача** – другий елемент режиму різання, що суттєво впливає на шорсткість.

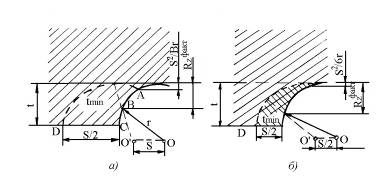
Це пов’язано не тільки із згаданими раніше геометричними причинами, але і суттєво обумовлено пластичними і пружними деформаціями у поверхневому шарі.

Різання металів здійснюється інструментом, лезо якого завжди має радіус заокруглення ρ. При вдавлюванні різця в оброблюваний матеріал відбувається відокремлення стружки по площині сколювання А–А (рис. 3). При цьому частина металу, що лежить нижче точки В, не зрізується, а підминається заокругленою частиною різця, піддаючись пружній та пластичній деформаціями.



*Рис. 3. Схема відокремлення стружки різцем з радіусом заокруглення леза*

Після проходження різця незрізаний шар металу частково пружно відновлюється, викликаючи тертя по задній поверхні різця. Різниця ступеня пружного відновлення металу виступів і западин нерівностей звичайно збільшують висоту шорсткості.



*Рис. 4. Утворення шорсткості під час точіння з малими подачами (а) і збільшення шорсткості зі зменшенням товщини стружки (б)*

Найменша товщина tmin шару, яка може бути зрізаною, залежить від радіуса заокруглення різальної кромки, властивостей оброблюваного матеріалу і швидкості різання (при зменшенні радіуса заокруглення ρ і збільшенні швидкості різання tmin зменшується).

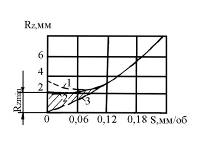
При тонкому точінні різцем, що має радіус при вершині r, теоретично утворюється стружка змінної товщини з дуже тонкою вершиною (рис. 4). Частина цієї вершини АВ з товщиною, меншою tmin, практично не може бути зрізаною і підминається заокругленою вершиною леза. Фактичне зрізування металу відбувається тільки на ділянці ВС, на якій товщина стружки перевищує tmin.

Після проходу різця деформована ділянка металу (на рис. 4, *а* показана подвійною штриховою лінією) частково пружно відновлюється, збільшуючи висоту нерівностей Rz = S2/(8r) , що визначається геометричними причинами, до .

Очевидно, що фактична висота нерівностей  дорівнює розрахунковій S2/(8r) тільки при відносно великій подачі, при якій Rz = S2/(8r) більше чи дорівнює tmin.

При роботі з невеликими подачами (S < 0,05÷0,06) мм/об при r = 0,8÷1,0 мм) зменшення подачі не тільки не знижує висоту шорсткості, але й за певних умов може навіть викликати її збільшення у зв’язку зі зменшенням товщини стружки і збільшенням товщини ділянки, що пружно деформується (рис. 4, *б*) [2].

В цьому випадку при зниженні подачі в декілька разів збільшується питома сила різання, а також підвищується ступінь пластичної деформації металу оброблюваної поверхні і стружки, усадка стружки, наріст на різці і, в кінцевому результаті, висота шорсткості. Точіння з подачею менше 0,12 мм/об не призводить до зниження висоти шорсткості за законом параболи (рис. 5, крива 3), як цього слід було очікувати згідно з теоретичною формулою (1), а викликає лише незначне зменшення шорсткості (крива 2) чи навіть її збільшення (крива 1). У заштрихованій частині відбувається збільшення шорсткості у зв’язку з пружними і пластичними деформаціями металу.



*Рис. 5. Залежність шорсткості від подачі*

Таким чином, навіть при мінімальній подачі неможна повністю усунути шорсткість обробленої поверхні, яка в цьому випадку суттєво визначається найменшою товщиною шару, що зрізується, і пластичними деформаціями оброблюваного матеріалу.

На рис. 5 показано, що при чистовому і тонкому точінні вуглецевих сталей зміна подачі від 0,02 до 0,1 мм/об мало впливає на висоту шорсткості. Нерівності поверхні в цьому випадку створюються не стільки під впливом геометричних причин, скільки в результаті пружних і пластичних деформацій, швидкості різання та радіуса заокруглення різального леза різця. У зв’язку з цим для забезпечення найменшої шорсткості обробленої поверхні і високої продуктивності чистове точіння вуглецевих конструкційних сталей потрібно проводити при S = 0,05÷0,12 мм/об.

При точінні кольорових сплавів добре доведеними або алмазними різцями tmin зменшується. Тому для зниження висоти шорсткості може виявитись корисним зменшення подачі до 0,01 – 0,02 мм/об.

За численними дослідженнями встановлено, що при звичайному точінні вплив **глибини різання** на шорсткість мізерний і практично може не прийматись до уваги. При зменшенні глибини різання до 0,02 мм (внаслідок наявності на різальній кромці заокруглення) нормальне різання припиняється і різець, відтискаючись від заготовки, починає ковзати по оброблюваній поверхні, періодично врізаючись в неї і вириваючи окремі ділянки. Тому глибину різання при роботі звичайними різцями не потрібно брати дуже малою.

При глибинах різання менших за подачу перша геометрично впливає на висоту шорсткості. В цьому випадку зменшення глибини різання знижує висоту шорсткості.

**Оброблюваний матеріал** і його структура суттєво впливають на характер і висоту нерівностей обробленої поверхні. Більш в’язкі та пластичні матеріали (наприклад, маловуглецеві сталі) схильні до пластичних деформацій, дають при їх обробці різанням грубі та шорсткі поверхні.

Шорсткість обробленої поверхні зменшується при переході від структури феритоперлиту до трооститу і трооститомартенситу. Ферит, як складова структура сталі, є м’яким, в’язким і таким, що легко деформується, при обробці різанням він має схильність до утворення нерівностей. З точки зору отримання поверхні з мінімальною шорсткістю, виявляються надзвичайно несприятливими структури з неоднорідними зернами, а саме: структури так званого глобулярного перлиту, що складаються з круглих зерен цементиту, розсіяних по основній масі фериту.

Значно менша шорсткість утворюється при обробці сталі після нормалізації та відпущення, яка має однорідну і дрібнозернисту структуру. У зв’язку з цим для отримання при механічній обробці мінімальної шорсткості рекомендується попередня нормалізація вуглецевої сталі при 850–870 °С або (у випадку полегшити умови різання і підвищити стійкість різального інструмента) відпалювання при 900 °С протягом 5 годин.

Встановлено, що зі збільшенням твердості оброблюваного матеріалу висота шорсткості знижується. При цьому одночасно зменшується залежність висоти шорсткості від швидкості різання і при твердості 500НВ вплив швидкості майже відсутній. На основі цих досліджень рекомендується проводити попередню термообробку конструкційних сталей, що підвищує їх твердість.

Вплив швидкості різання та твердості на висоту шорсткості вуглецевих сталей помітно проявляється лише в зоні порівняно невеликих швидкостей різання. При перевищенні швидкості різання 140 м/хв залежність висоти шорсткості від твердості помітно послаблюється. Це пояснюється тим, що при швидкості різання 140 м/хв і вище температура оброблюваного матеріалу досягає 840 °С. При такій температурі механічні властивості сталей різної початкової твердості вирівнюються, в результаті чого висота шорсткості стабілізується і практично не залежить від зміни швидкості різання.

Зниження в’язкості оброблюваного матеріалу за рахунок наклепу поверхневого шару також сприяє зменшенню шорсткості обробленої поверхні. На практиці це явище спостерігається при розвертанні отворів після зенкування, що утворює помітний наклеп обробленої поверхні. Якщо припуск, залишений на розвертання, менший глибини наклепаного зенкуванням більш крихкого поверхневого шару, то в результаті розвертання отримується поверхня з мінімальними нерівностями.

Зміна хімічного складу оброблюваного матеріалу, що відбивається на його в’язкості, в свою чергу впливає на розміри шорсткості обробленої поверхні заготовок як з кольорових сплавів, так і зі сталей.

**Застосування МОР**, що запобігає схоплюванню, зменшує тертя та полегшує процес стружкоутворення, сприяє зниженню висоти нерівностей поверхні.

**4. Вібрації різального інструмента, верстата і заготовки**

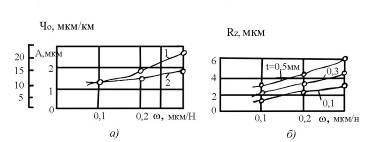
В процесі різання виникають вимушені коливання технологічної системи, які викликаються дією зовнішніх сил, і автоколивань системи, поява яких пов’язана з періодичним зміцненням (наклепом) шару металу, що зрізується, і зміною умов тертя чи різання. Вимушені коливання системи обумовлюються дефектами окремих механізмів верстата (неточність зубчастих передач, погане балансування частин що, обертаються, надзвичайні зазори у підшипниках тощо), які є причиною нерівномірності його руху.

Вібрація леза різального інструмента відносно оброблюваної поверхні є додатковим джерелом збільшення шорсткості обробленої поверхні. Очевидно, що висота шорсткості поверхні буде тим значніша, чим більша подвоєна амплітуда коливань леза інструмента відносно оброблюваної поверхні.

Суттєво впливає на шорсткість оброблюваної поверхні стан верстата. Нові і добре відрегульовані верстати, встановлені на масивних фундаментах чи на віброопорах, добре ізольовані від вібрацій іншого обладнання, забезпечують мінімальну шорсткість.

Дуже важливим є створення достатньо високої жорсткості пристроїв для закріплення заготовок і допоміжних інструментів для встановлення різального інструмента. Наприклад, у випадку обробки заготовок на револьверному верстаті з прутка із закріпленням останнього в трикулачковому самоцентруючому патроні висота шорсткості обробленої поверхні на 30–40 % вища, ніж при затисканні прутка в нормальному цанговому патроні, який має більшу поверхню зіткнення із заготовкою і тому створює більшу її стійкість. Щоб запобігти появі вібрації вільного кінця прутка (який має звичайно діаметр на 3–4 мм менший отвору шпинделя), застосовують спеціальне центруюче кільце, яке закріплюється на лівому кінці шпинделя. Такі вібрації легко передаються на оброблювану поверхню і викликають збільшення шорсткості на 70–120 %.

Особливо відбивається вібрація технологічної системи на шорсткості обробленої поверхні при тонкому розточуванні на алмазно-розточувальних верстатах. При цьому зі зменшенням жорсткості та збільшенням піддатливості її технологічної системи амплітуда коливань вершини різця зростає, викликаючи відповідне підвищення зношування різця (рис. 6, *а*). Збільшення амплітуд коливань із зростанням піддатливості технологічної системи і збільшення глибини різання, а отже, і збільшення ширини леза супроводжується зростанням шорсткості обробленої поверхні (рис. 6, *б*).



*Рис. 6. Вплив податливості технологічної системи алмазно-розточувального верстата: а – на амплітуду коливань (1) і зношування інструменту (2); б – на шорсткість поверхні заготовки зі сталі 20Х, обробленої при V = 100м/хв; S = 0,14мм/об*

При роботі на алмазно-розточувальних верстатах жорсткість технологічної системи зменшується зі збільшенням відношення довжини L розточувальної борштанги до її діаметра D. При зниженні жорсткості борштанги і збільшенні L/D шорсткість обробленої поверхні зростає. Наприклад, при розточуванні отворів ∅30 мм в деталях зі сталі 20Х на алмазно-розточувальному верстаті 2706 при V = 250 м/хв, S = 0,02 мм/об, t = 0,1 мм і L/D = 2 шорсткість поверхні Ra = 0,8 мкм, при L/D = 4 значення Ra = 1,35 мкм і при L/D = 5 значення Ra = 1,6 мкм.

Нерівномірність припуску, що знімається при тонкому розточуванні і обумовлює коливання сил різання, також може стати причиною вібрації технологічної системи, що збільшує шорсткість обробленої поверхні.

Формування шорсткості поверхні при різних видах механічної обробки (фрезеруванні, свердлінні, шліфуванні, викінчуванні тощо) підкоряється взагалі тим же закономірностям, що і при точінні. Характер цих закономірностей видозмінюється в залежності від зміни співвідношення впливу геометричних причин, пластичних деформацій та вібрацій, пов’язаних з особливостями окремих видів механічної обробки.

**Використана література**

1. Бондаренко С.Г. Розмірні розрахунки механоскладального виробництва. – К. 1993. – 544 с.

2. Маталин А.А. Технология машиностроения. – Л. – М., 1985. – 496 с.

3 Основы технологии машиностроения / Под ред. В.С. Корсакова – М., 1977. – 416 с.

4. Справочник технолога-машиностроителя / Под. ред. А.Г. Косиловой, О.К Мищерякова. Т. 1. – М.. 1985. – 655 с.

5. Руденко П.А., Шуба В.А и др. Отделочные операции в машиностроении. – К.: Техника, 1990. – 150 с.