

В. І. Лавріненко (м. Київ)

Шліфувальні круги з надтвердих матеріалів у верстатній системі: обмеження за критерієм жорсткості

Наведено результати досліджень по визначенню необхідних значень показника жорсткості шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів як однієї зі складових верстатної системи в процесі обробки. Показано, що стандартні шліфувальні круги мають певний запас жорсткості і наведені критичні значення її величин.

Ключові слова: шліфувальний круг, корпус круга, жорсткість круга, надтвердий матеріал, зносостійкість круга, шорсткість.

На нинішній час склалася структура інформаційних ознак шліфувальних кругів, що містить відомості про їх геометричні параметри і основні характеристики ріжучого шару (марку, зернистість надтвердого матеріалу (НТМ), концентрацію у зв'язці, марку зв'язки, покриття). Не заперечуючи важливість і корисність такої інформації для користувача, неможливо не зазначити, що в ряді випадків, наприклад, для спеціальних конструкцій кругів, проявляється неповнота цієї традиційної інформації. Зокрема, відсутні будь-які механічні та фізичні показники інструменту як виробу в цілому, котрі дозволяли би у тій чи іншій мірі робити висновок з його потенційних експлуатаційних властивостей, вирішувати задачі рівноцінної заміни матеріалу корпусу, конструктивної зміни круга з метою мінімізації його ваги або пошуку оптимальної форми. До елементів, яких бракує в структурі інформаційних ознак шліфувальних кругів, слід віднести, нарівні з іншими, також показник жорсткості круга, який і розглядаємо більш детально у даній статті.

Перед тим, як визначитися, якою саме повинна бути жорсткість круга, треба врахувати, що шліфувальний круг знаходиться у загальній технологічній верстатній системі і, насамперед, важливо розібратися з жорсткістю саме цієї системи. Це дозволить співставити жорсткість круга із жорсткістю складових системи.

З літератури відомо [1], що жорсткість пружної системи шліфувального верстата 3Г71 при нерухомому та такому, що обертається, шпинделі відповідно дорівнює 13,15 та 10,8 МН/м. Зниження жорсткості пружної системи при шпинделі, що обертається, пояснюють зменшенням сил тертя у рухомих з'єднаннях.

Треба зазначити, що чим більшою є жорсткість, тим більш точною отримуємо оброблювану деталь. Крім того, по мірі збільшення жорсткості технологічної системи підвищуються продуктивність і точність обробки без відчутного збільшення зносу алмазів [2]. Так, як свідчать дані авторів [2], для верстатів моделей 312М, 3184, 3Е12 із підвищенням жорсткості шліфувальної бабки від 2 до 9 МН/м зростає продуктивність обробки. Подальше збільшення жорсткості не викликає зростання продуктивності шліфування. На-

приклад, при шліфуванні на верстаті 3E12 з жорсткістю шліфувальної бабки 2,7—3,2 МН/м розмірний знос круга 1A1 300×40×5×6 після зняття 1 см³ твердого сплаву складає 20—25 мкм, а з жорсткістю 8,8—9,7 МН/м за ідентичних умов — 5,7—9,8 мкм. Сумарна жорсткість пружної системи верстата за висновками [2] для обробки інструменту з твердого сплаву повинна бути не менш як 5,0—7,5 МН/м, а при обробці твердого сплаву разом зі сталлю — 9,0—10,0 МН/м.

Вплив жорсткості обладнання на показники процесу круглого шліфування викладений і в [3], де показано, що зі збільшенням жорсткості заднього центра верстата знос круга (відносні витрати алмазів) зменшується. В той же час поліпшується і чистота оброблюваної поверхні, оскільки висота хвильового формозмінення робочої поверхні круга, викликана нерівномірним її зносом вздовж напрямку обертання круга, знижується майже в шість разів (табл. 1).

Таблиця 1. Експлуатаційні характеристики алмазних кругів при різних жорсткостях заднього центра шліфувального верстата [3]

Жорсткість заднього центра, МН/м	Частота коливань, Гц	Висота хвильового формозмінення на крузі, мкм	Відносні витрати алмазів, мг/г
9,8	750	10	9,8
6,1	540	38	15,5
3,7	420	64	19,7

Аналогічно, при підвищенні жорсткості технологічної системи заточного верстата з 3,24 до 5,88 МН/м збільшується продуктивність заточування на 20 %, зменшується період врізання та виходжування при зніманні заданого припуску [4]. Зміна жорсткості технологічної системи майже не впливає на шорсткість поверхні, що піддається обробці. Зростання сумарної амплітуди відносних коливань шліфувальної головки та пристроїв на частотах 54 та 108 Гц при зменшенні жорсткості від 5,39 до 1,67 МН/м підвищує питомі витрати алмазів більш як в 3,5 рази [4]. Тим самим, роблять висновок автори [5] — жорсткість технологічної системи верстата повинна бути не менше 4,4—4,9 МН/м.

З наведеного вище можна зробити декілька висновків: по-перше — жорсткість шліфувальних та заточувальних верстатів коливається у межах від 2 до 13 МН/м, а по-друге — чим більшою є жорсткість у цих межах, тим менше знос кругів, більше продуктивність та точність обробки. Разом з тим виникає питання, які значення жорсткості є оптимальними для шліфувальних кругів. З аналізу табл. 1 виходить, що зменшення жорсткості обладнання збільшує знос алмазних кругів. Важливо отримати такі дані для одного верстата, але при обробці алмазним інструментом з різною жорсткістю корпусу, і виявити, саме якою повинна бути гранична жорсткість кругів у реальних величинах.

Автором були проведені дослідження по виявленню залежності відносних витрат алмазів та шорсткості поверхні, що піддавали обробці, від зміни величини осьової жорсткості круга. Дослідження проводили на крузі форми 12A2-45° 150×40×10×3×32 — АС6 80/63-B1-13-100. Матеріал корпусу — алюмінієвий сплав АК6. Обробці піддавали твердий сплав Т15К6 (режими різання: повздовжня подача — 2 м/хв, поперечна подача — 0,05 мм/пдв. хв, швидкість обертання круга — 15 м/с, продуктивність обробки без охолодження — 600 мм³/хв). Жорсткість круга визначали експериментально за схе-

мою із зосередженим навантаженням. Для контролю величини навантаження використовували пружинний динамометр ДОСМ 3-02ГОСТ 9500—84 з діапазоном вимірювання 0—200 кГ. Зміна жорсткості круга відбувалася за рахунок зміни конструктивних параметрів його корпусу. Було розглянуто чотири варіанти: 1 — стандартний корпус, 2 — зміна зовнішнього діаметра корпусу з 150 до 140 мм, 3 — додатково до варіанта 2 проточування конічної частини корпусу на глибину 5 мм (товщина стінки змінилася з 10 до 5 мм), 4 — додатково до варіанта 3 проточування опорної поверхні круга у місці кріплення на глибину 7 мм зі зміною діаметра з 100 до 50 мм. Результати досліджень наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Вплив жорсткості шліфувального круга форми 12A2-45° на його експлуатаційні показники

Корпус	Жорсткість круга, МН/м	Відносні витрати алмазів, мг/г	Висота хвильового формозмінення на крузі, мкм	Шорсткість оброблюваної поверхні Ra, мкм
Стандартний (1)	105,2	9,97	22	0,07
Змінений (2)	102,6	10,3	24	0,08
Змінений (3)	33,5	10,8	30	0,08
Змінений (4)	5,7	25,4	6	0,09

Дослідження засвідчили, що при жорсткості круга, яка значно перевищувала жорсткість обладнання, зменшення її майже в три рази фактично не вплинуло на експлуатаційні показники круга. А при зниженні жорсткості круга до значень близьких до жорсткості обладнання експлуатаційні показники погіршилися. Побіжно вкажемо, що зміна жорсткості круга майже у 20 разів фактично не відбилася на показниках шорсткості оброблюваної поверхні, що підтверджує дані [4]. Цікаво, що висота хвильового формозмінення на крузі, яка характеризує різальні властивості шліфувального інструменту [6], залишалася майже стабільною в межах підвищеної жорсткості, але значно зменшилася при зниженій жорсткості. Це означає підвищену швидкість переміщення гребеня хвилі в напрямку обертання круга, що збільшує його знос та утримує від зростання шорсткості оброблюваної поверхні.

З наведених вище досліджень можна зробити такі висновки. По-перше, шліфувальні круги у їх стандартному виконанні мають достатньо високий рівень жорсткості. Зниження цієї жорсткості майже в три рази фактично не змінює експлуатаційні показники кругів при шліфуванні. По-друге, граничною межею жорсткості як шліфувальних кругів, так і універсального верстатного обладнання для процесів шліфування з урахуванням викладених вище досліджень та даних [2] і [3] слід вважати величину 10 МН/м, тому твердження авторів [5] про те, що жорсткість технологічної системи при заточуванні повинна бути в межах 4,4—4,9 МН/м є в певній мірі невиправданим, а ці значення заниженими.

Тепер розглянемо питання спрямованого регулювання жорсткості кругів. Раніше в [7—9] були визначені конкретні значення величин осьової жорсткості різних типорозмірів шліфувальних кругів з НТМ. Зокрема, в [7] показано, що в залежності від геометричних розмірів величина жорсткості може змінюватися від 6,1 до 22,4 МН/м. Це означає, що жорсткість круга може бути меншою або перевищувати вказану граничну величину. Виникає питання,

яким чином можна впливати на жорсткість шліфувальних кругів та регулювати її.

В [7—9] показано, що в залежності від форми круга на його жорсткість можна впливати як зміною матеріалу корпусу, так і зміною певних геометричних розмірів. Наприклад, стосовно стандартизованих кругів форми 1A1 показано, що зі зростанням товщини круга, модуля пружності матеріалу корпусу та зменшенням зовнішнього діаметра D круга його жорсткість буде зростати. Зміна форми з прямого профілю (1A1) на більш складний (12A2-45°) змінює і напрямки впливу на жорсткість. При виведенні формули для розрахунку осьової жорсткості кругів форми 12A2 виходили з загальноприйнятого визначення J як відношення навантаження P , що викликає переміщення ϖ , до величини цього переміщення у точці його прикладення у напрямку дії навантаження [8]. У випадку розрахункової схеми з розподіленим навантаженням постійної інтенсивності q за P приймали усе навантаження, що приходить на торцеву поверхню круга ($P = \pi b(D - b)q$, де b — ширина робочого шару круга), а за переміщення ϖ — прогин у її середній точці. З урахуванням викладеного отримано формулу для розрахунку осьової жорсткості кругів форми 12A2 [8]:

$$J = \pi b(D - b)q/\varpi. \quad (1)$$

Результати обрахунку осьової жорсткості по формулі (1) для стандартизованих кругів форми 12A2-45° показали, що діапазон жорсткості таких кругів знаходиться в межах 140—900 МН/м. Аналіз отриманих даних дозволив зробити висновок, що найбільш істотно на осьову жорсткість круга впливають такі його конструктивні параметри, як ширина робочого шару круга b та посадковий діаметр d . Так, збільшення b приблизно в 1,7 рази з 6 до 10 мм підвищує осьову жорсткість приблизно в 1,2 рази. Більш істотно J залежить від діаметра посадкового отвору. Збільшення d приблизно у 2,4 рази з 32 до 76 мм при збереженні постійними інших параметрів приводить до підвищення жорсткості у 3,6 рази, що викликано зменшенням моменту дії зусилля відносно місця закріплення круга на шпинделі верстата.

Осьова жорсткість кругів з НТМ форми 12A2-20° стандартних типорозмірів, як засвідчили дослідження [9], змінюється в діапазоні 35—93 МН/м. При цьому показано, що середні експериментальні значення показника осьової жорсткості круга зовнішнім діаметром 125 мм дорівнювали 37,8 МН/м для алюмінієвого корпусу і 129,2 МН/м — для сталюого. Тим самим, перевод корпусу з алюмінієвого на сталюий більш ніж втричі підвищує жорсткість круга. Крім того, виявлено, що найвагоміший вплив на осьову жорсткість J круга форми 12A2-20° чинять такі його конструктивні параметри як d , D , b , а також параметр h , який характеризує товщину корпусу в місці його закріплення. Характер цього впливу є таким, що зростання b та d приводить до підвищення осьової жорсткості, а для D та h спостерігається зворотна картина. Так, збільшення ширини b у два рази з 3 до 6 мм приводить до підвищення жорсткості приблизно в 1,4 рази. Більш сильна залежність J спостерігається від товщини основи корпусу та від діаметра d . Так, зростання d у 2 рази при збереженні постійними значень решти параметрів приводить до збільшення жорсткості в 1,8—3,7 рази в залежності від співвідношення параметрів b і D для стандартних типорозмірів кругів. Аналогічне зменшення h призводить до зниження J у 2,2 рази. Збільшення D у 1,5 рази з 50 до 75 мм при незмінних b і d та пропорційному збільшенні інших параметрів призводить до зменшення жорсткості приблизно у 1,7 рази.

Коли недостатньою є жорсткість верстатної системи, це можна компенсувати. Відомо [10], що при механічній обробці у верстатній технологічній системі виникають пружні переміщення, які призводять до зниження точності оброблюваних поверхонь. Відтак, основними напрямками підвищення точності обробки є збільшення жорсткості в технологічній системі та зниження силової напруженості процесу різання. Показано [10], що зменшити величину пружного переміщення δ , наприклад, при круглому зовнішньому врізному шліфуванні, можна за рахунок зменшення постійної часу утворення пружного переміщення в технологічній системі, а сама величина цього переміщення визначається як

$$\delta = \frac{\sigma B_1 v_d t}{c K_{ш} v_k}, \quad (2)$$

де σ — умовне напруження різання; $K_{ш}$ — коефіцієнт абразивного різання; c — приведена жорсткість технологічної системи; v_k — швидкість круга; v_d — швидкість деталі; B — ширина шліфування; t — глибина шліфування.

З формули (2) виходить, що чим більшим є коефіцієнт абразивного різання, тим меншою буде величина пружного переміщення в технологічній системі. В свою чергу відомо [10], що вказаний коефіцієнт пов'язаний зі співвідношенням товщини зрізу зерном з радіусом його заокруглення і збільшення цього співвідношення збільшує і коефіцієнт. Вкажемо, що на стандартних алмазних кругах товщина зрізу для окремих зерен є величиною змінною, оскільки вони виступають зі зв'язки на різну висоту. Останнім часом отримав розвиток напрямок створення впорядкованого ріжучого шару [11], в якому навантаження на зерна розподіляється більш рівномірно, що дозволяє досягти підвищення величини коефіцієнта абразивного різання. Саме алмазні круги з впорядкованим та структурованим [12] робочим шаром і дозволять ефективно працювати в умовах можливої недостатньої жорсткості верстатного обладнання.

Висновки

Проведеними дослідженнями показано, що шліфувальні круги з НТМ у їх стандартному виконанні мають високий рівень жорсткості. Зниження цієї жорсткості майже в три рази фактично не змінює експлуатаційні показники кругів при шліфуванні. Граничною межею жорсткості як шліфувальних кругів, так і універсального шліфувального верстатного обладнання для процесів шліфування слід вважати величину 10 МН/м.

1. Якимов А. В., Паршаков А. Н., Свиричев В. И., Ларшин В. П. Управление процессом шлифования. — Киев: Техніка, 1983. — 184 с.
2. Чмир М. Я., Троцкий Н. А. Взаимосвязь технологических показателей алмазно-электрохимического шлифования, характеристик оборудования и условий обработки // Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов: Сб. науч. тр. — Тула: ТулПИ, 1990. — С. 80—92.
3. Цыпкин Р. З., Кангун В. Р., Белов В. И. и др. Алмазное шлифование неметаллических материалов. Обзор. — М.: НИИмаш, 1978. — 57 с.
4. Захаренко И. П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. — Киев: Наук. думка, 1981. — 300 с.
5. Шульман П. А., Семенов Л. Н., Колесниченко Ю. Н. К вопросу о влиянии динамики станков на характер процесса алмазного шлифования // Вопросы теории и практики резания алмазными инструментами. — Киев: УкрНИИТИ, 1968. — С. 33—35.
6. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова — Т. 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / Под

ред. А. А. Шепелева. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля; ИПЦ АЛКОН НАНУ, 2007. — 340 с.

7. *Петасюк Г. А., Лавриненко В. И.* Осевая жесткость шлифовальных кругов прямого профиля из СТМ // *Сверхтв. материалы.* — 1993. — № 6. — С. 47—52.
8. *Петасюк Г. А., Лавриненко В. И., Петасюк О. У.* Осевая жесткость стандартизованных шлифовальных кругов формы 12A2-45° из СТМ // *Там же.* — 1994. — № 4. — С. 28—31.
9. *Шепелев А. А., Петасюк Г. А., Лавриненко В. И. и др.* Осевая жесткость шлифовальных кругов формы 12A2-20° из СТМ // *Там же.* — 1995. — № 4. — С. 43 — 60.
10. *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения: В 10 т. / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова.* — Т. 10: Концепция развития технологии машиностроения. — Одесса: ОНПУ, 2005. — 565 с.
11. *Лавриненко В. И., Пасичный О. О., Сытник Б. В.* К вопросу шлифования спеченным композитом с упорядоченными зернами алмаза // *Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы VII Пром. конф. с междунар. участием, п. Славское, Карпаты, 12—16 февраля 2007 г.* — Киев: УИЦ “НГТ”, 2007. — С. 440—442.
12. *Лавриненко В. И., Ткач В. Н., Сытник Б. В., Пасичный О. О.* Технологические аспекты изменения структурной ориентации рабочего слоя кругов из СТМ // *Сверхтв. материалы.* — 2008. — № 2. — С. 87—91.

Ін-т надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля НАН України

Надійшла 14.10.08