УДК 621.921

В. І. Лавріненко
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна
lavrinen52@gmail.com

Опорна крива профілю шорсткої поверхні, отриманої під час алмазно-абразивної обробки, як один з факторів її тримальної здатності

Досліджено показники шорсткості і опорну криву профілю, що лежать в основі теорії контактної взаємодії шорстких поверхонь. Показано, що чим більшим є показник відносної опорної довжини профілю tp (від 20 до 50 % Rmax), тим більшою буде тримальна здатність поверхні та її наповненість оброблюваним матеріалом. Показано, що плазмовий вплив середньої потужності, коли не відбувається оплавлення оброблюваної поверхні, позитивно впливає на неї. Плазмовий вплив з оплавленням погіршує як висотні показники мікронерівностей, так і тримальну здатність поверхні. Доведено, що одночасне застосування в кругах зерен компактів і алмазних зерен дозволяє досягти зниження шорсткості обробленої поверхні і отримати специфічний профіль мікронерівностей поверхні з підвищеною наповненістю, збільшеною тримальною здатністю та з утворенням так званих "мастильних кишень".

Ключові слова: *шорстка поверхня, опорна крива, наповненість профілю, тримальна здатність, алмазно-абразивна обробка, показники шорсткості.*

Шорсткість поверхні оброблюваного виробу впливає як на надійність і довговічність машин, так і на вартість виготовлення деталей, а також визначає тривалість нормальної роботи сполучних деталей. Від шорсткості залежать також щільність посадок із натягом, стабільність посадок із зазором, тримальна здатність з'єднання та інші експлуатаційні показники виробу.

Здебільшого дослідники не звертають увагу на особливості формування шорсткості обробленої поверхні, орієнтуються лише на показник шорсткості *Ra* і фактично ігнорують інші показники. Особливо це стосується саме процесів алмазно-абразивної обробки. Проте важливо оцінити, як змінюються показники шорсткості *Ra*, *R*max*, Sm, tp* для різних процесів обробки, характеристик алмазно-абразивного інструмента, і як можна спрямовано вплинути на зміну характеристик шорсткості поверхні.

В попередніх публікаціях [1, 2] автором було досліджено висотні та крокові показники шорсткої поверхні, а в цій роботі розглянуто показник *tp* відносної опорної довжини профілю (*p* – значення рівня перерізу профілю).

Раніше [3] було показано, для яких саме поверхонь необхідно контролювати показник *tp*:

– поверхонь, що працюють за умов тертя-ковзання і кочення, та таких, що мало зношуються;

© В. І. ЛАВРІНЕНКО, 2023

– поверхонь, де діють контактні напруження;

– поверхонь, що утворюють герметичні поєднання.

Тобто, вказані поверхні повинні мати високу зносостійкість, тримати контактне навантаження і утворювати герметичні поєднання. У таких поверхонь мають бути високі значення показника *tp*, і чим більшим є цей показник, тим більшим буде наповнення обробним матеріалом мікропрофілю шорсткої поверхні [4], а це означає, що більшою буде тримальна здатність такої поверхні [5, 6].

За своїм фізичним сенсом параметр *Ra* характеризує висоту всіх нерівностей профілю, *Rz* – найбільших нерівностей, а *R*max – повну висоту профілю. Параметри *S* та *Sm* характеризують взаємне розташування (відстань) характерних точок нерівностей – вершин (максимумів) і точок перетину профілю зі середньою лінією (нулів профілю) в межах базової довжини. Показник *tp* містить найбільшу інформацію про висотні властивості профілю, оскільки є аналогічною функції розподілу. В подовжньому напрямку *tp* характеризує фактичну площу контакту під час контактування шорстких поверхонь на заданому рівні перерізу. Рівень *p* відраховують від лінії виступів і він виражається у відсотках від максимальної висоти профілю *R*max. Опорна крива характеризує структуру нерівностей – показує закономірність наростання площі опори у вибраному перерізі у разі зближення (в процесі контактування) абсолютно гладкого тіла з даною поверхнею. Тобто, опорна крива поверхні є однією з важливих характеристик шорсткої поверхні та визначає розподіл матеріалу по висоті шорсткого шару [4]. За розташуванням опорних кривих і значенням їхніх параметрів порівнюють тримальну здатність шорсткої поверхні, обробленої різними методами та з різним значенням *Ra* [5]. Водночас, у разі гостровершинних нерівностях тримальна поверхня є малою, а у разі площинно-вершинних – зростає [6].

Тримальну здатність пари тертя ковзання визначають наступні параметри [7]: критичний тиск, за якого найвищі мікронерівності більш твердої поверхні втискуються в м'яку поверхню контртіла і руйнують мастильну плівку; *R*max і *r* – найбільша висота і радіус кривизни нерівності профілю відповідно; 5/6*R*max ≈ *Rz* – середня від п'яти найбільших і найменших точок нерівності профілю, параметри кривої опорної поверхні та мікротвердість більш м'якої поверхні. Крім того, щоби за тиску під час контакту не виникало защемлення, мікронерівності поверхні повинні мати можливість утримувати мастило у своєрідних "мастильних кишенях".

Вплив показників шорсткості на тримальну здатність поверхневого шару було досліджено в [8, 9]. Показано [8], що тримальна здатність поверхні деталі залежить від її шорсткості та метода обробки. За висоти мікронерівностей від 2,5 до 8 мкм після розгортання і шліфування вона складає 10 %, за висоти мікронерівностей від 0,8 до 2,5 мкм за тих же методів обробки підвищується до 40 %, у разі алмазного точіння і притирки складає ~ 65 %, а у разі застосування тонкого шліфування, алмазного вигладжування або суперфінішу досягає 80–90 % (не дуже зрозуміло, що мали на увазі автори під відсотками тримальної здатності поверхні).

Для аналізу експлуатаційних характеристик в [9] було обрано опорну криву профілю шорсткості поверхні. Аналіз різних її профілів показує, що за незмінних *R*max(*Rz*) та *Ra* тримальна здатність поверхневого шару тим більша, чим менша висота згладжування *Rp* (відстань від лінії виступів до середньої лінії). За однакових значень *Rp* і *R*max(*Rz*) тримальна здатність поверхні тим більша, чим вище параметр *Ra*. Зі зменшенням висоти мікронерівності *R*max параметри *Ra* і *Rp* зменшуються, а тримальна здатність збільшується.

В [10] звернено увагу на те, що чим меншими є параметри субшорсткості *Rac* та *Smc*, тим більшим є напруження, необхідне для руху дислокацій, а відтак, меншою є інтенсивність зношування матеріалу на поверхні тертя. Крім того, чим вищою є мастилоємність спряжених поверхонь, тим кращими є їхні експлуатаційні характеристики. Одним зі шляхів збільшення мастилоємності поверхонь є створення регулярного мікрорельєфу зі згаданими вище "мастильними мікрокишенями" під час фінішної обробки деталі.

В даній роботі основну увагу приділено дослідженню опорної кривої профілю та її зв'язку з іншими показниками шорсткості.

Площа поверхні, що розташована нижче опорної кривої, характеризує наповненість шорсткої поверхні матеріалом, що обробляють. Це означає, що чим вище опорна крива, тобто чим більшими (від 20 до 50 % *R*max) є показники *tp*, тим більшою є наповненість шорсткої поверхні і тим більшою є її тримальна здатність. Це показано на прикладі реальних мікронерівностей поверхні, обробленої алмазним шліфуванням (рис. 1), та їхніх опорних кривих. На рис. 1, *а*, *б* наведено типову шорстку поверхню, коли показник *t*20 складає ~ 5 %, а показник *t*50 – ~ 65 %. У випадку, коли формується нетипова шорстка поверхня зі зниженою тримальною здатністю (див. рис. 1, *в*, *г*), показник *t*20 складає ~ 2 %, а показник *t*50 – ~ 12 %.

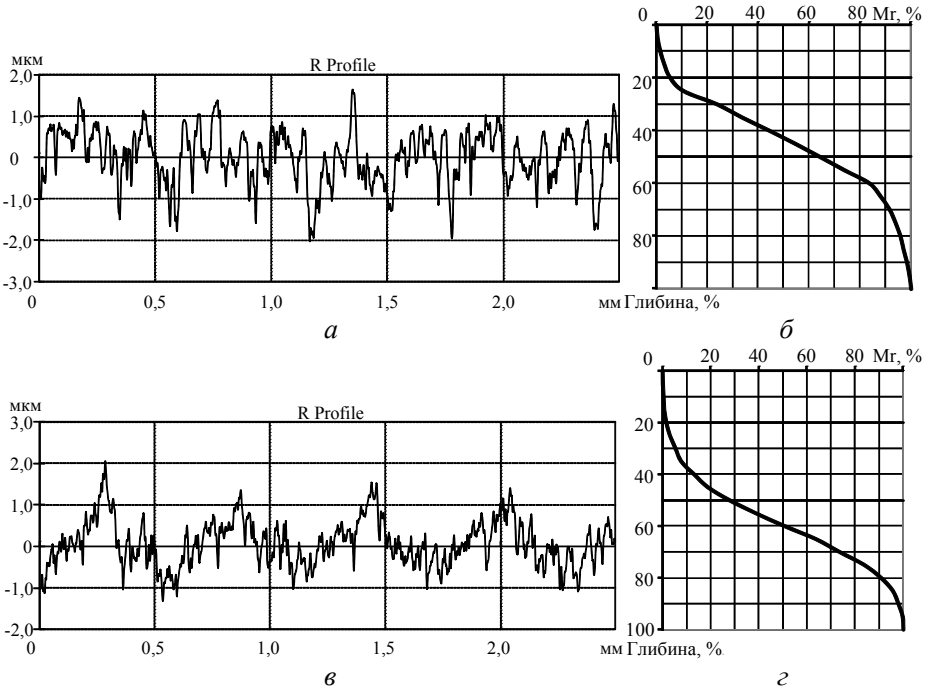


Рис. 1. Профілограми (*а*, *в*) і опорні криві профілю (*б*, *г*) поверхні твердого сплаву, обробленої алмазним кругом, у разі отримання типової шорсткої поверхні (*а*, *б*) і поверхні зі зниженою тримальною здатністю (*в*, *г*) після шліфування.

Було досліджено зв'язок опорної кривої профілю з висотними параметрами шорсткості за різних умов обробки. Кореляційний зв'язок між *Ra* та *tp* було досліджено для відносної опорної кривої профілю *tp* в різних перерізах висоти шорсткості обробленої поверхні. В табл. 1 наведено значення параметрів *tp* на рівні 30 і 50 % *R*max в залежності від *Ra* для різних способів обробки.

Таблиця 1. Функції апроксимації залежності *tp* від *Ra* для різних умов обробки (діапазон значень *Ra* = 0,1–1,0 мкм)

Обробка	Функція апроксимації	Відносна похибка апроксимації, %
Глибинне електрошліфування кругами з КНБ швидкорізальних сталей	$t50 = 80{,}64 - 23{,}19Ra$	15,5
Багатопрохідне шліфування сталі Р6М5 кругами з електрокорунду без охолодження	$t50 = 66{,}43 + 5{,}502Ra$	8,3
Багатопрохідне шліфування сталі Р6М5 кругами з КНБ без охолодження	$t50 = 37{,}41 + 23{,}89Ra$	22,1
Багатопрохідне шліфування сталі 10+9ХФ кругами з КНБ з охолодженням	$t50 = 72{,}8 - 7{,}873Ra$	9,1
Глибинне алмазне шліфування безвольфрамового твердого сплаву (БВТС) марки КНТ	$t50 = 76{,}42–81{,}93Ra + 66{,}93Ra^2$	30,5
Глибинне алмазне шліфування БВТС марки ТН	$t50 = 62{,}2– 36{,}35Ra + 50{,}64Ra^2$	24,3
Глибинне алмазне шліфування твердих сплавів	$t50 = 84{,}08–144{,}2\mathrm{Ra} + 137{,}3Ra^2$	14,9
Глибинне алмазне шліфування оксидно-карбідної кераміки	$t50 = 66{,}6 - 4{,}621Ra$	22,4
Пружне алмазне шліфування оксидно-карбідної кераміки	$t50 = 70{,}47 - 16{,}04\ Ra$	16,4
Врізне алмазне шліфування оксидно-карбідної кераміки	$t50 = 56{,}51Ra^{-0{,}09175}$	16,3
Двостороннє алмазне шліфування оксидно-карбідної кераміки	$t50 = 58{,}4 - 123{,}2Ra+227{,}9Ra^2$	17,0
Багатопрохідне алмазне шліфування магнітотвердих сплавів	$t30 = 19 + 9Ra^2$	40,4
Точіння сталі Х12М різцями з Гексаніту-Р	$t50 = 61{,}42 - 1{,}28Ra$	18,7
Точіння сталі 40Х різцями з Гексаніту-Р	$t50 = 54{,}97 + 4{,}621Ra$	19,8

Не було виявлено переважної тенденції впливу способів обробки або оброблюваного матеріалу на зміну параметра ~~а~~ *t*50. Так, глибинне шліфування твердих сплавів характеризується ростом *t*50 з підвищенням *Ra*, а оксидно-карбідної кераміки – зі зниженням. Аналогічно, зниження параметра *t*50 спостерігається і у разі глибинного шліфування швидкорізальної сталі. Слід враховувати такий характер зміни параметра *t*50 від значення *Ra*, оскільки, наприклад, у разі глибинного і багатопрохідного шліфування швидкорізальної сталі заповнення профілю на рівні 50 % *R*max (*t*50) за *Ra* = 1 мкм є приблизно однаковим і становить ~ 60 %, тоді як за *Ra* = 0,1 мкм глибинне шліфування забезпечує заповнення профілю на рівні 78 %, а багатопрохідне – тільки 40 %. Це доводить перевагу глибинного шліфування за умови забезпечення невисокої шорсткості обробленої поверхні.

Було проаналізовано апроксимуючі функції залежності комплексу параметрів від $t10$ до $t90$ від параметра Ra (табл. 2). Для діапазону параметрів від $t10$ до $t40$ характерним є збільшення їхніх значень зі зростанням значення Ra. Водночас для діапазону параметрів від $t60$ до $t90$ характерним є їхнє зниження зі збільшенням значення Ra. Характер зміни параметра $t50$, а також параметрів $t40$ і $t60$ є дещо невизначеним. У більшості (~ 60 %) випадків він знижується з ростом Ra, а для 40 % – підвищується.

Таблиця 2. Функції апроксимації залежності *tp* від *R*max у разі багатопрохідного шліфування сталі Р6М5 кругом з електрокорунду білого

Функція апроксимації	Відносна похибка апроксимації, %
$t10 = Ra/(1{,}878Ra^2 - 3{,}97Ra - 2{,}23)$	27,6
$t20 = -32{,}627Ra^2 + 77{,}767Ra - 29{,}517$	25,3
$t30 = -47{,}42Ra^2 + 116{,}5Ra - 34{,}74$	19,5
$t40 = -32Ra^2 + 83{,}65Ra + 3{,}018$	12,1
$t50 = 66{,}43 + 5{,}502Ra$	8,3
$t60 = 88{,}45 - 3{,}348/Ra$	4,1
$t70 = 93{,}723 - 1{,}145/Ra$	1,9
$t80 = 96{,}59 - 0{,}488/Ra$	0,9
$t90 = 0{,}489Ra^2 + 0{,}975Ra - 97{,}35$	0,4

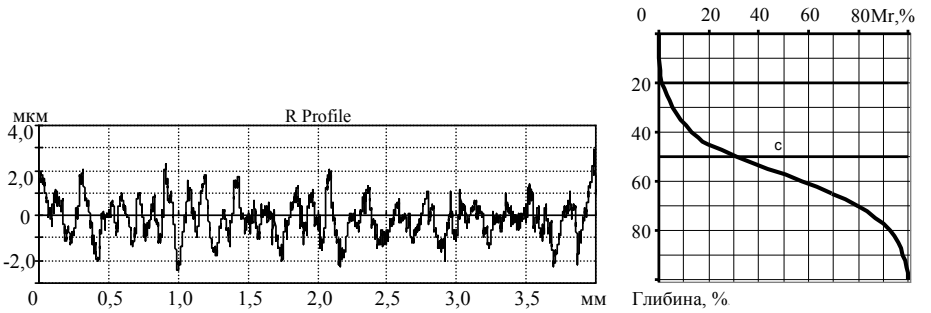
Було досліджено вплив шліфування на зміну опорної поверхні на прикладі впливу плазмової обробки на зміну морфології та елементного складу поверхневого шару твердосплавного інструменту після алмазного шліфування і, як наслідок, на його експлуатаційні показники. Було відібрано чотирьохгранні твердосплавні пластини SPUN–120304 марки ВК10ХОМ у кількості 6 шт. Один з кутів пластини піддавали плазмовій обробці зі струмом 380 А за швидкості руху струменю 25 см/хв, що відповідало впливу за температури 1300–1400 °С, інший, протилежний кут обробляли зі струмом 250 А за тієї ж швидкості струменю, що відповідало впливу за температури 800–900 °С, інші два кути не обробляли. Далі досліджували шорсткість поверхонь вихідних і тих, що піддавали обробці, зміни в елементному складі, а також в приповерхневому шару тих зон, що піддавали плазмовій обробці. Шорсткість оброблених поверхонь контролювали за допомогою профілографа-профілометра мод. SurfTest SJ-201 фірми “Mitutoyo” (Японія).

Дослідження особливостей формування показників шорсткості поверхні після плазмової обробки показало, що у вихідному стані твердосплавна поверхня пластини має наступні показники шорсткості: Ra = 0,67 мкм, Rmax = 5,33 мкм, Sm = 70 мкм. Характер мікронерівностей та вихідна опорна крива поверхні представлено на рис. 2.

У разі впливу плазмового струменю середнього рівня зі струмом 250 А показники шорсткості змінювалися так: Ra залишався майже незмінним – 0,68 мкм, Rmax зростав до 7,55 мкм, Sm зменшувався до 62 мкм. Такий середній плазмовий вплив покращує опорну криву і наповненість профілю мікронерівностей зростає – показник $t50$, який дорівнював 30 %, збільшується до 80 % (див. рис. 3).

Більш потужний (380 А) плазмовий вплив суттєво впливає на всі показники шорсткості оброблюваної поверхні. Значно зростають висотні показники:

Ra = 1,03 мкм, *R*max = 8,72 мкм. Разом з тим, крок нерівностей знижується до *Sm* = 51 мкм. Це все вказує на значні зміни у характері мікронерівностей оброблюваної поверхні після досить потужної плазмової обробки, що впливає як на зміну профілю мікронерівностей (рис. 4), так на стан поверхні зразків (рис. 5). Плазмова обробка такої потужності призводить навіть до оплавлення поверхні твердосплавного зразка і утворення поруватості, що призводить до різкого зменшення тримальної здатності такої поверхні (рис. 6).



а *б*

Рис. 2. Характер мікронерівностей поверхні у вихідному стані (*а*) та її опорна крива (*б*).

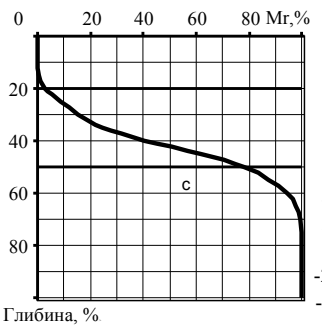


Рис. 3. Опорна крива поверхні після плазмової обробки середньої потужності (250 А).

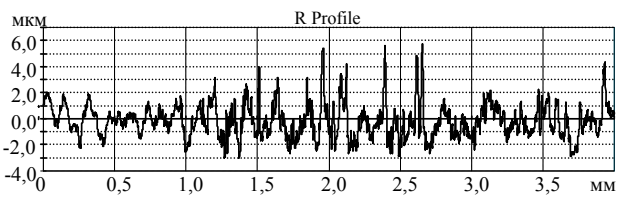
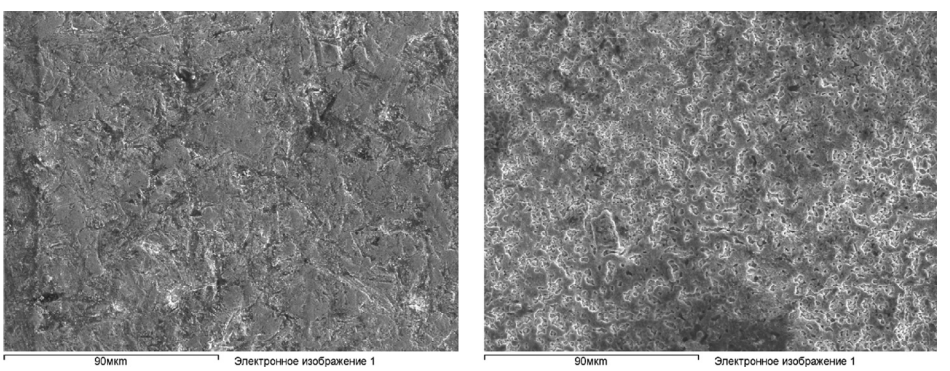


Рис. 4. Характер мікронерівностей поверхні після потужної плазмової обробки.



а *б*

Рис. 5. Поверхні твердого сплаву у вихідному стані (*а*) і після потужної плазмової обробки (*б*).

Отже, плазмовий вплив середньої потужності, коли ще не відбувається оплавлення поверхні, позитивно впливає на оброблювану поверхню, відбувається її значне покращення.

Було досліджено особливості формування обробленої поверхні зі спеціальним мікропрофілем підвищеної тримальної здатності з “мастильними кишенями”, про можливість появи яких повідомляли в [7, 10].

В [12] було показано, що одним з шляхів підвищення техніко-експлуатаційних показників двигуна внутрішнього згоряння є формування на поверхнях циліндрів такого двигуна спеціального мікропрофілю з пласкими виступами, що чергуються, із заглибленнями (своєрідними “кишенями”) для розміщення мастила (рис. 7). Водночас збільшується маслоємність і опорна площа обробленої поверхні. Як наслідок цього, скорочується тривалість припрацювання, зменшуються витрати мастила, підвищується зносостійкість циліндрів і збільшується ресурс двигуна. Встановлено, що площино-вершинність такої поверхні складає 50–66 % на рівні перерізу профілю p = 1–2 мкм від лінії максимального виступу, глибина рисок для розміщення мастила – 2,5–10 мкм. Поверхні такого типу можна отримати притупленням виступів мікропрофілю після попереднього хонінгування, а також вигладжуванням кінцевої обробленої поверхні.

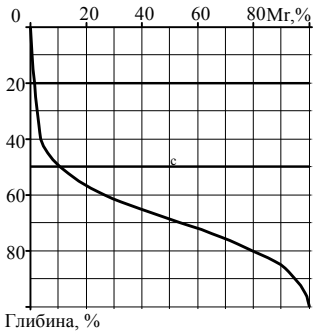


Рис. 6. Опорна крива поверхні пластини після потужної плазмової обробки (370 А).

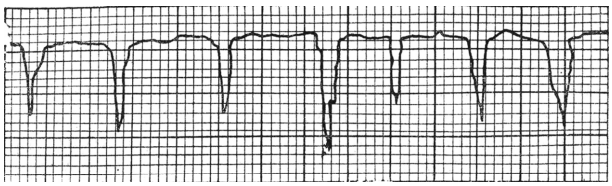


Рис. 7. Профілограма поверхні, обробленої методом площино-вершинного алмазного хонінгування [12].

Дослідженнями автора встановлено, що можна отримати таку ж поверхню в процесі шліфування без будь-якого її доопрацювання, але для цього треба застосувати в робочому шару суміш абразивів (алмазів і КНБ), а також додатково вводити до робочого шару компакти шліфпорошків на основі мікропорошків кубоніту [13].

Різальна здатність кругів у разі застосування зерен компактів з мікропорошків кубоніту є невеликою. Водночас, ймовірно, через дещо незвичний (пошаровий) знос зерен компактів [14] можливе формування оригінального, неоднорідного, незвичного для традиційних кругів з НТМ профілю мікронерівностей обробленої поверхні з наявністю своєрідних “кишень” на обробленій поверхні (рис. 8). Тобто, сполучення у робочому шару різних абразивів, наприклад, алмазів та компактів, які підрізають верхню частину мікронерівностей оброблюваної поверхні, допомагає досягти ефекту, характерного для площинно-вершинного хонінгування, коли підрізаються вершини мікронерівностей, що виступають.

Встановлено, що одночасне застосування в шліфувальних кругах зерен шліфпорошків компактів на основі мікропорошків кубоніту і стандартних зерен кубоніту покращує працездатність кругів у порівнянні із застосуванням виключно шліфпорошків компактів, оскільки стає можливим досягнення більшої продуктивності безприпальної обробки швидкорізальних сталей –

300 мм^3/хв у разі використання суміші компактів і алмазних зерен та 200 мм^3/хв – тільки компактів, а також знизити шорсткість обробленої поверхні з Ra = 0,72 мкм, за умови використання компактів, до Ra = 0,52 мкм, за умови додавання суміші шліфпорошків кубоніту. Оскільки застосування суміші шліфпорошків дає позитивний ефект, то для порівняння вивчали експлуатаційні показники кругів, в яких застосовували суміш компактів КМ різної зернистості і стандартних алмазних зерен відповідних зернистостей. Було досліджено шорсткість поверхні у разі застосування кругів із сумішшю 50 % зерен з компактів зернистістю КМ 400/315 і 50 % алмазних зерен марки АС32, які у разі обробки швидкорізальній сталі мають наближений до компактів механізм зношування, оскільки на них також утворюються площинки зносу, характерні для мікронерівностей обробленої поверхні (рис. 8).

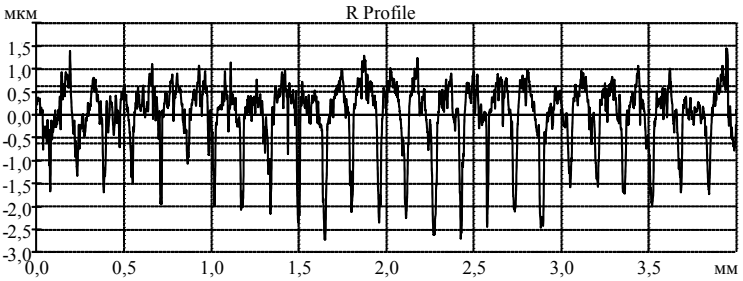


Рис. 8. Профіль мікронерівностей поверхні, обробленої кругом із сумішшю шліфпорошків компакту КМ 400/315 і алмазу АС32 400/315.

Виявлено, що суміш компактів з алмазами дає найменші показники шорсткості обробленої поверхні і, ймовірно, це пов'язане з тим, що вони зношуються не виколками, а пошарово, і тому різальна здатність зерна не поновлюється, зростає контакт площадки ковзання зерна по оброблюваній поверхні та знижається її шорсткість. Було досліджено вплив такої обробки на профілі мікронерівностей. Спостерігали формування мікронерівностей обробленої поверхні з "мастильними кишенями". Особливо це було характерним для кругів із сумішшю компактів КНБ і алмазів на більших (400/315) зернистостях під час обробки сталі Р6М5. Крім того, характерним є також і те, що профілі мікронерівностей обробленої такими кругами поверхні мають аномально великі кроки мікронеровностей (рис. 9), що підтверджує викладені вище уявлення щодо механізму зношування абразивних зерен в таких кругах.

Тобто, одночасне застосування в кругах зерен компактів і алмазних зерен дозволяє досягти зниження шорсткості обробленої поверхні і отримати той специфічний профіль мікронерівностей, коли формується поверхня із підвищеною наповненістю мікропрофілю та збільшеною тримальною здатністю і утворюються "мастильні кишені".

ВИСНОВКИ

Спосіб обробки і оброблюваний матеріал не впливають на значення параметра $t50$, але характер зміни параметра $t50$ залежить від значення параметра Ra: у разі глибинного і багатопрохідного шліфування швидкорізальної сталі заповнення профілю на рівні 50 % Rmax ($t50$) за Ra = 1 мкм є приблизно однаковим і складає ~ 60 %, тоді як за Ra = 0,1 мкм глибинне шліфування забезпечує заповнення профілю на рівні 78 %, а багатопрохідне – тільки 40 %, що підтверджує переваги глибинного шліфування.

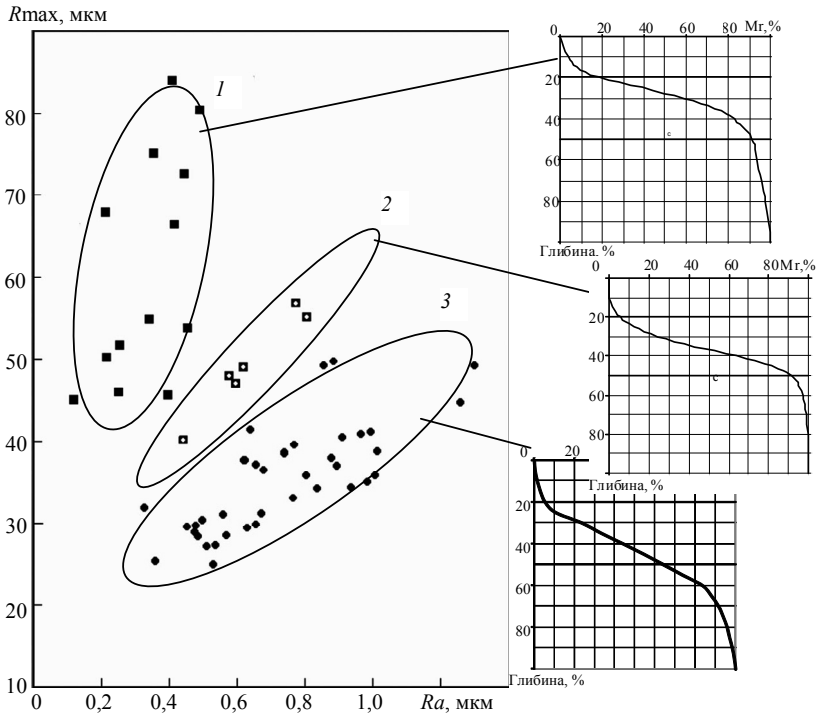


Рис. 9. Кореляційний зв'язок між параметрами шорсткості *Ra* та *Sm* під час формування мікронерівностей обробленої поверхні та опорні криві: *1* – область формування поверхні з чітко вираженими "кишенями" (див. рис. 8); *2* – проміжна область формування поверхні з нечітко вираженими "кишенями", характерна для підвищеної продуктивності шліфування з припалами на обробленій поверхні; *3* – область формування типової поверхні.

Аналіз залежності параметрів від *t*10 до *t*90 від зміни параметра *Ra* показав, що для діапазону від *t*10 до *t*40 характерним є збільшення їхніх значень зі зростанням *Ra,* а в діапазоні від *t*60 до *t*90 – зменшення зі збільшенням *Ra.* Залежність *t*40, *t*50, і *t*60 від *Ra* є невизначеною, у більшості (~ в 60 %) випадків відбувається їхнє зменшення зі зростанням *Ra*, а в 40 % – збільшення.

Додатковий плазмовий вплив середньої потужності, до початку оплавлення поверхні, позитивно впливає на шліфовану алмазними кругами поверхню, відбувається певне впорядкування і значне покращення опорної поверхні. Плазмовий вплив з оплавленням і утворенням пористого поверхневого шорсткого шару погіршує як висотні показники мікронерівностей, так і тримальну здатність поверхні.

Одночасне застосування в кругах зерен компактів і алмазних зерен дозволяє досягти зниження шорсткості обробленої поверхні і отримати специфічний профіль мікронерівностей поверхні з підвищеною наповненістю мікропрофілю, збільшеною тримальною здатністю і утворенням "мастильних кишень".

V. I. Lavrinenko
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Fulfillment of rough surface profile obtained by diamond-abrasive treatment, as one of the factors of its bearing capacity

It is known that the theory of contact interaction of rough surfaces is based on roughness indicators and, first of all, the reference curve of the profile, which the article focuses on, and how it is related to other roughness indicators. It is shown that the greater the index of the relative reference length of the profile – tp, the greater the bearing capacity of such a surface. That is, the higher the reference curve rises, the greater the indicators of tp, for example at the level of 20 or 50 % Rmax, the greater the filling of the rough surface and the greater it's bearing capacity. The surface area, which is located below the reference curve, characterizes the filling of the rough surface with the finishing material. It is shown that the plasma effect of medium power, when the surface has not yet melted, generally has a positive effect on the treated surface, there is a certain ordering and significant improvement of the supporting surface. Plasma exposure with melting worsens both the height of microroughness and the bearing capacity of the surface. It is proved that the simultaneous use of compacts and diamond grains in wheels allows to achieve a decrease in the roughness of the treated surface and to obtain the specific profile of microroughnesses, when a surface with increased microprofile filling and increased bearing capacity is obtained, when so-called "oil pockets" are formed.

Keywords: *rough surface, reference curve, profile fullness, bearing capacity, diamond-abrasive treatment, roughness indicators, reference curve.*

1. Lavrinenko V.I., Pasichnyi O.O., Poltoratskyi V.G., Solod V.Yu., Dobroskok V.L., Ostroverkh E.V. Some specific features inherent in the relation between the roughness parameters of a treated surface under grinding wheels with a mixture of SHM grinding powders with superficially modified grains. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 6. P. 444–454.
2. Lavrinenko V.I. Grinding wheels of superhard materials for diamond-abrasive processing: new in the famous. Kyiv: Akademperiodyka, 2019. 190 p.
3. Козловский Н.С., Виноградов А.Н. Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения. Москва: Машиностроение, 1979. 224 с.
4. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. Москва: Машиностроение, 1981. 244 с.
5. Николаенко А.П. Формирование поверхности изделия при вибрационной обработке. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2010. № 2(58). С. 167–181.
6. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. Москва: Машиностроение, 1986. Т. 2. 496 с.
7. Величко С.А., Сенин П.В., Иванов В.И., Мартынов А.В. Прогнозирование работоспособности поверхностей трения, образованных электроискровой обработкой. *Электронная обработка материалов*. 2016. Т. 52, № 3. С. 9–14.
8. Бузник Е.Н. Технология автотракторостроения: Учебн. пособие. 2-е изд. Москва: МГИУ, 2008. 100 с.
9. Ткачук А.А. Підвищення зносостійкості поверхонь кочення роликопідшипників методами зміцнювально-вигладжувального оброблення. Дис. … канд. техн. наук. Луцьк, 2014. 21 с.
10. Радкевич Я.М., Схиртладзе А.Г. Метрология, стандартизация и сертификация. В 3 ч. Часть 1. Метрология : учебник для академического бакалавриата. 5 изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во "Юрайт", 2019.
11. Lavrinenko V.I. The structurally changed layer of superabrasive wheel and workpiece contact surfaces as a factor of improving their wear resistance (a change of elemental composition). *J. Superhard Mater.* 2013. Vol. 35, no. 2. P. 118–125.
12. Чеповецкий И.Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. Київ: Наук. думка, 1978. 238 с.
13. Lavrinenko V.I., Sytnyk B.V., Poltorats'kyi V.G., Bochechka O.O., Solod V.Yu. Composites based on cBN micron powders structured by carbon binder for the application as functional elements in the working layer of diamond-abrasive tools. Part 1. Composite grits as abrasive elements. *J. Superhard Mater.* 2014. Vol. 36, no. 3. P. 193–198.
14. Lavrinenko V.I., Sytnyk B.V., Poltorats'kyi V.G., Bochechka O.O., Solod V.Yu. Composites based on cBN micron powders structured by carbon binder for the application as functional elements in the working layer of diamond-abrasive tools. Part 2. Composites as bearing elements. *J. Superhard Mater.* 2014. Vol. 36, no. 5. P. 338–343.

Надійшла до редакції 13.06.22
Після доопрацювання 28.06.22
Прийнята до опублікування 30.06.22