

**Сергій Клименко<sup>1</sup>, Сергій Клименко<sup>2</sup>, Марина Копейкіна<sup>3</sup>,  
Андрій Манохін<sup>4</sup>, Леонід Полонський<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: [atmu@meta.ua](mailto:atmu@meta.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>. Researcher ID: [Q-8928-2019](https://orcid.org/Q-8928-2019)  
SCOPUS Author ID: [57221904325](https://orcid.org/57221904325)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, старший дослідник,  
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: [alcon1202@ukr.net](mailto:alcon1202@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>. Researcher ID: [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/FFQ-3675-2022)  
SCOPUS Author ID: [57197629303](https://orcid.org/57197629303)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: [atmu1@meta.ua](mailto:atmu1@meta.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>. Researcher ID: [FZY-5450-2022](https://orcid.org/FZY-5450-2022)  
SCOPUS Author ID: [3633766140](https://orcid.org/3633766140)

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, старший дослідник,  
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: [the.manokhin@gmail.com](mailto:the.manokhin@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>. Researcher ID: [DGN-4506-2022](https://orcid.org/DGN-4506-2022)  
SCOPUS Author ID: [37059129600](https://orcid.org/37059129600)

<sup>5</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри механічної інженерії  
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [pol@ztu.edu.ua](mailto:pol@ztu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4347-9088>. SCOPUS Author ID: [57221220964](https://orcid.org/57221220964)

## **ВИХІДНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ ТОЧІННЯ НАПЛАВЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ**

Визначено вихідні передумови розробки технології точіння наплавлених деталей, які включають розрахунок припусків та граничних розмірів виробу відповідно до технологічних переходів і товщини наплавленого покриття. Наведений підхід до встановлення глибини різання, яка забезпечує наявність у шарі покриття на обробленій деталі найкращих і найбільш сталих властивостей, що надає виробу кращі експлуатаційні показники, зокрема більшу зносостійкість. У загальному вигляді середня глибина різання може бути визначена за допомогою кривої відносної опорної поверхні профілю покриття, а з урахуванням методу Херста змінну частину глибини різання під час оброблення покриттів може бути визначено через фрактальну розмірність профілю їхньої поверхні. Розглянуто деякі підходи до визначення швидкості різання, які базуються на вимогах забезпечення якості шару наплавленого покриття і стійкості різального інструменту, та геометричних параметрів інструменту з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу.

**Ключові слова:** наплавлена деталь; припуск на механічну обробку; параметри режиму різання; геометричні параметри інструменту.

Табл.: 2. Рис.: 2. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** Розвиток сучасного машинобудування нерозривно пов'язаний із підвищенням надійності й довговічності деталей машин та механізмів, зниженням енерго- та матеріалоємності виробництва, потребує широкого використання нових прогресивних технологій. Унаслідок цього великого значення набуває забезпечення захисту поверхонь деталей і конструкцій від зносу. Здебільшого для цього використовують об'ємно леговані матеріали. Однак такий підхід стає більш проблематичним через дорожнечу та дефіцит легуючих елементів. На сьогодні економічно та технічно доцільно розвивати принципово інше ставлення до вибору матеріалів уже на стадії проектування виробів: механічна міцність деталей гарантується за рахунок застосування одного матеріалу, а специфічні властивості поверхні досягаються внаслідок формування на ній наплавленого шару з іншого матеріалу. У результаті забезпечується підвищення довговічності деталей, що поєднується з економією легуючих елементів, здешевленням виробів, можливістю їх багаторазового відновлення і використання. При реставрації деталей у 5–8 разів скорочується кількість технологічних операцій порівняно з виготовленням нових деталей, а вартість відновлення переважно на 30–50 % нижча за вартість їх виготовлення. Збільшення обсягу відновлення деталей дозволяє суттєво знизити витрати на запасні частини, а отже, і собівартість ремонту машин.

**Постановка проблеми.** У багатьох випадках механічна обробка деталей із наплавленим покриттям – важливий етап процесу формування зміцнених або відновлених виробів. Однак застосування наплавлених покриттів, враховуючи широку гаму сучасних покриттів, що характеризуються різними структурними особливостями та механічними властивостями, стримується у зв'язку з нестачею науково обґрунтованих рекомендацій щодо підготовки та реалізації процесу їхньої якісної механічної обробки. Обґрунтоване призначення припуску на обробку, вибір робочого матеріалу різального інструменту, превентивне призначення оптимальних режимів різання та геометричних параметрів інструменту багато в чому визначаються морфологією напавленої поверхні, гетерогенністю структури покриттів і, відповідно, неоднорідністю механічних властивостей шару покриття як за інтерфейсом, так і глибиною. Зазначене зумовлює як можливість ефективної обробки деталей з покриттям, так і працездатність різального інструменту та перспективи досягнення необхідної якості виробів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зазвичай за розрахунковий розмір припуску застосовують мінімальний припуск, достатній для усунення на переході, що виконується, похибок оброблення та дефектів поверхневих шарів (висот нерівностей профілю, глибини дефектного шару, сумарного відхилення поверхонь, похибок установаження деталі у пристосуванні), сформованих на попередніх переходах або операціях. Здебільшого розрахунок технологічних припусків для виготовлення деталей виконують розрахунково-аналітичним методом або згідно з таблицями з урахуванням методу отримання заготовки [1; 2].

Залежно від технологічних режимів нанесення і вмісту хімічних елементів у складі покриттів їхня твердість змінюється у широких межах. При цьому такі деталі з покриттями, як вали автомобілів і тракторів (місця під підшипники), прокатні валки (бочки) тощо, що мають володіти високою якістю поверхні, потребують механічної обробки. Загалом, технологія обробки покриттів залежить від співвідношення допусків на розміри заготовки, деталі з покриттям і покриття ( $\delta_{\text{заг}}$ ,  $\delta_{\text{дет}}$ ,  $\delta_{\text{п}}$ ) [3]. Можливі три випадки:  $\delta_{\text{заг}} > \delta_{\text{дет}}$  – за будь-яких значень  $\delta_{\text{п}}$  покриття піддається обробці різанням;  $\delta_{\text{заг}} = \delta_{\text{дет}}$  – покриття також піддається обробці;  $\delta_{\text{заг}} < \delta_{\text{дет}}$  – при  $\delta_{\text{заг}} - \delta_{\text{дет}} \geq \delta_{\text{п}}$  обробка покриття виключається; при  $\delta_{\text{заг}} - \delta_{\text{дет}} < \delta_{\text{п}}$  покриття оброблюється.

Мінімальний припуск на обробку деталей з покриттями пропонується визначати за відомими у технології машинобудування методиками [4; 5]. Розрахункова формула для визначення припуску на обробку має вигляд  $z = (Rz_0 + H_0) + |\rho_{\text{заг}} + \varepsilon|$ , де  $Rz_0$ ,  $H_0$  – висота макронерівностей і глибина дефектного шару покриття відповідно;  $\rho_{\text{заг}}$ ,  $\varepsilon$  – просторове відхилення розташування поверхні вихідного покриття відносно базових поверхонь заготовки й похибка установки деталі з покриттям на операції обробки відповідно.

Формоутворення деталей із покриттям виконується різними методами лезової механічної обробки. Основний об'єм обробки припадає на точіння.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Водночас традиційні підходи до визначення припусків, вибору матеріалу різальної частини інструменту, призначення режимів різання та геометричних параметрів інструменту не враховують особливостей наплавлених деталей – наявності нерівностей на вихідній поверхні, гетерогенності структури, неоднорідності властивостей за інтерфейсом та глибиною покриття. Крім того, потрібно враховувати стан і розміри деталі на етапі до нанесення покриття.

**Метою статті** є вдосконалення підходу до визначення умов механічної обробки, зокрема, точіння, деталей із наплавленим поверхневим шаром з урахуванням морфології поверхні деталі та особливостей побудови припуску на обробку, робочого матеріалу різального інструменту, режимів різання, геометричних параметрів інструменту.

**Виклад основного матеріалу.** Розрахунок припусків на обробку потрібно виконувати після того, як попередньо обрано метод нанесення покриття і намічений маршрут механічної обробки поверхні з покриттям [1; 6]. Можлива схема розташування загальних і міжопераційних припусків і допусків під час зміцнення або відновлення деталей наведена на рис. 1 ( $a_{\min}, a_{\max}$  – задані розміри деталі, мм;  $b_{\min}, b_{\max}$  – розміри деталі після її виходу з ладу, мм;  $c_{\min}, c_{\max}$  – розміри деталі після попередньої механічної обробки перед відновленням, мм;  $d_{\min}, d_{\max}$  – проміжні розміри, отримані після чорнової механічної обробки, мм;  $l_{\min}, l_{\max}$  – вихідні розміри зміцненої або відновленої деталі, мм;  $T_a, T_b, T_c, T_d, T_l$  – допуски відповідно на розміри  $a, b, c, d, l$ , мкм;  $\Delta_{\min}, \Delta_{\max}$  – величини мінімальної та максимальної зміни розміру деталі в разі її виходу з ладу, мм;  $z'_{\min}, z'_{\max}$  – мінімальний і максимальний припуски, що видаляються під час попередньої механічної обробки деталі перед зміцненням або відновленням, мм;  $z''_{\min}, z''_{\max}$  – мінімальний і максимальний припуски, що видаляються під час чистової механічної обробки зміцненої або відновленої деталі, мм;  $z'''_{\min}, z'''_{\max}$  – мінімальний і максимальний припуски, що видаляються під час чорнової механічної обробки зміцненої або відновленої деталі, мм;  $\Delta h_{\min}, \Delta h_{\max}$  – мінімальна і максимальна товщини шару покриття, мм. Тут і нижче індекси при значеннях  $R_z, h, \Delta_\Sigma$  і  $\varepsilon$  показують, з урахуванням показників якості яких поверхонь потрібно визначити значення цих параметрів).

Розрахунок припусків, граничних розмірів за технологічними переходами й товщини покриття на прикладі валів виконується в такій послідовності:

– виходячи із заданих і вибракувальних розмірів деталі, визначають величини мінімальної і максимальної зміни розміру деталі під час її виходу з ладу:  $\Delta_{\max} = a_{\max} - b_{\max}$ ,  $\Delta_{\min} = a_{\min} - b_{\min}$ ;

– для кожного технологічного переходу записуються значення  $R_z, h, \Delta_\Sigma, \varepsilon$  і  $T_d$ ; величина допуску на розмір визначається за таблицями залежно від якості точності; після попередньої механічної обробки перед зміцненням або відновленням визначають припуски і граничні розміри деталі:

$$z'_{\min} = 2 \left[ (R_{zb} + h_b) + \sqrt{\Delta_{\Sigma b}^2 + \varepsilon_c^2} \right], c_{\max} = b_{\max} - 2z'_{\min}, c_{\min} = c_{\max} - T_c;$$

– знаючи задані розміри деталі, а також величини  $R_z, h, \Delta_\Sigma$  і  $T_d$ , за технологічними переходами, розраховуються припуски і проміжні розміри деталі при механічній обробці після її зміцнення або відновлення;

– визначаються припуски на чистову механічну обробку зміцненої або відновленої деталі та її граничні розміри після чорнової обробки:

$$2z''_{\min} = 2 \left[ (R_{zd} + h_d) + \sqrt{\Delta_{\Sigma d}^2 + \varepsilon_a^2} \right], d_{\min} = a_{\max} + 2z''_{\min}, d_{\max} = d_{\min} + T_d, 2z''_{\max} = 2z''_{\min} + T_a + T_d;$$

– визначаються припуски на чорнову механічну обробку зміцненої або відновленої деталі та її граничні розміри:

$$2z'''_{\min} = 2 \left[ (R_{ze} + h_e) + \sqrt{\Delta_{\Sigma e}^2 + \varepsilon_d^2} \right], l_{\min} = d_{\max} + 2z'''_{\min}, l_{\max} = l_{\min} + T_e, 2z'''_{\max} = 2z'''_{\min} + T_d + T_e;$$

– визначається товщина шару покриття під час зміцнення або відновлення деталі:

$$2\Delta h_{\min} = l_{\min} - c_{\max}, 2\Delta h_{\max} = l_{\max} - c_{\min};$$

– перевіряється коректність розрахунків припусків на кожному переході й товщині покриття:

$$2z'_{\max} - 2z'_{\min} = T_b + T_c, 2z''_{\max} - 2z''_{\min} = T_d + T_e, 2z'''_{\max} - 2z'''_{\min} = T_a + T_d, 2h_{\max} - 2h_{\min} = T_e + T_c.$$

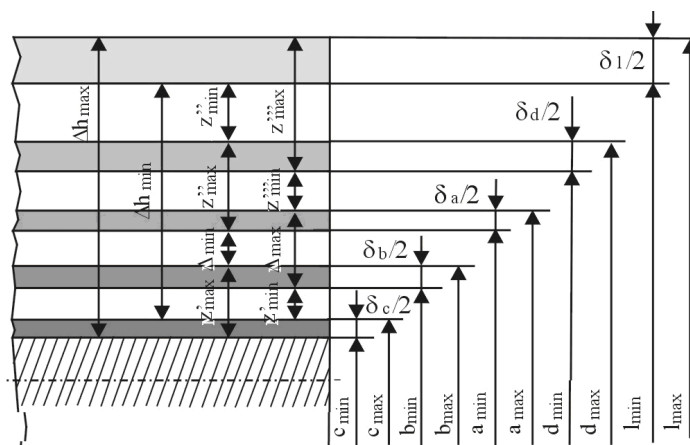


Рис. 1. Схема графічного розташування припусків і допусків при зміцненні або відновленні деталі типу вал

Як зрозуміло [7], не весь шар покриття за товщиною має стабільні властивості. Перехідний шар між основним металом і покриттям відрізняється від матеріалу покриття хімічним складом, структурою та властивостями. Верхній шар може містити шлаки, залишки присадного матеріалу й різні дефекти. Застосування в таких умовах розрахунково-аналітичного методу визначення товщини покриття не дає змоги врахувати якісних показників покриття. Це може призвести до того, що шар покриття, призначений для забезпечення ресурсу роботи, опиняється в зонах з пониженими механічними властивостями і, як наслідок, працездатність виробу з покриттями може бути меншою.

Щоб забезпечити високі експлуатаційні властивості деталей із покриттями можна використовувати такий підхід: на пробну заготовку наноситься шар покриття і проводиться пошарове його видалення; після кожного проходу інструменту вимірюється будь-який показник якості поверхні, наприклад, шорсткість або мікротвердість і будується відповідний графік зміни показника за глибиною покриття; ділянки, які мають найкращі та стабільні параметри якості, матимуть кращі експлуатаційні показники, зокрема, більшу зносостійкість; для забезпечення максимального ресурсу роботи деталі, бажано, щоб оброблена поверхня шару покриття перебувала в цій ділянці. Визначивши розміри ділянки з потрібними показниками якості, і розмістивши в ній шар покриття, що забезпечує ресурс роботи деталі, з урахуванням відомої перехідної ділянки необхідно скоригувати розміри вихідної заготовки під нанесення покриття. Після цього можна виготовляти деталі з покриттями та призначати припуски під механічну обробку.

Ефективна обробка наплавлених деталей багато в чому пов'язана з вибором матеріалу робочої частини різального інструменту. Аналіз хімічного складу й механічних властивостей наплавлених матеріалів та матеріалів інструментів, а також результати лабораторних та промислових досліджень працездатності інструментів при обробці деталей, наплавлених електродуговим методом, дозволили сформулювати загальні рекомендації з вибору матеріалу інструменту для обробки наплавлених покриттів (табл. 1) відповідно до позначення Міжнародного інституту зварювання.

При обробці наплавлених деталей глибина різання є одним з основних параметрів умов різання. У загальному випадку від неї залежать усі вихідні характеристики процесу оброблення: сили різання, температура в зоні різання, інтенсивність зношування інструмента, стан обробленої поверхні деталі. При цьому потрібно враховувати принципово різні умови призначення глибини різання для випадків обробки нерівного наплавленого поверхневого шару та під час чистової обробки основного масиву покриття. На рис. 2 наведено наочний приклад поздовжнього та поперечного перерізів шару покриття, наплавленого порошковою проволокою, пояснюючий вищенаведене.

Таблиця 1 – Рекомендації з вибору матеріалу інструменту для обробки наплавлених покриттів

Тип	Позначення	Твердість, HRC	Обробка	
			по корці	чистова
Низьколегована сталь, C < 0,4 %	A	40	киборит, борсиніт, T5K10	киорит, борсиніт, композит 10, PсBN-TiC45%, BOK72, T15K6
Низьколегована, сталь, C > 0,4 %	B	60	киборит, борсиніт	киборит, борсиніт, композит 10, PсBN-TiC45%, BOK72, силініт-Р, T30K4
Аустенітна високомарганцева сталь	C	50	BK15OM, BK8, TT10K8, T5K10	киборит, борсиніт, BK8, TT10K8, T15K6
Аустенітні хромо-нікелеві сталі	D	40	BK8, BK15OM	BK4, BK6M, BK8, силініт-Р, композит 10, PсBN-TiC45%
Хромисті сталі	E	45	киборит, борсиніт, T5K10, T15K6	киборит, борсиніт, композит 10, PсBN-TiC45%, BK6M, T15K6, BOK72
Швидкорізальні сталі	F	62	киборит, борсиніт	киборит, борсиніт, композит 10, PсBN-TiC45%, силініт-Р, BOK72
Хромовольфрамкові чавуни	G	60	киборит, борсиніт, BK3M, BK6M	киборит, борсиніт, композит 10, PсBN-TiC45%, BK6M, BK6OM, BOK72
Хромовольфрамкові сталі	H	45	киборит, борсиніт, T15K6	киборит, борсиніт, композит 10, PсBN-TiC45%, силініт-Р, T15K6, BK6M, BOK72
Кобальтові сплави	N	40	киборит, борсиніт, T15K6	киборит, борсиніт, композит 10, PсBN-TiC45%, силініт-Р
Нікелеві сплави	Qa	55	киборит, борсиніт, BK8, BK10OM	борсиніт, композит 10, PсBN-TiC45%, BK6M, BK6M, силініт-Р
	Qв	220HV	BK8, BK10OM	BK6M, BK6M
Карбидні сплави	P	67	киборит, борсиніт, АТП	киборит, борсиніт, АТП, композит 10

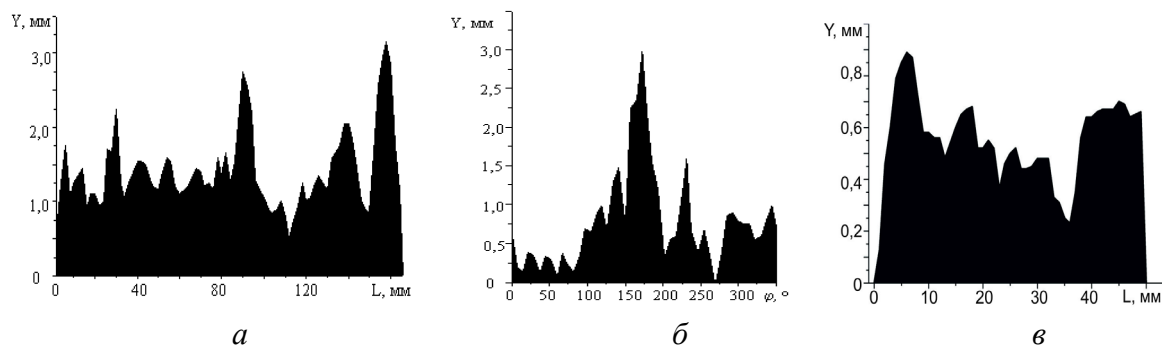


Рис. 2. Профілі поздовжнього (а, в) і поперечного (б) перерізів шару покриття, нанесеного електродуговим наплавленням проволокою ПП-Нп-25Х5ФМС (а, б) і мікродуговим наплавленням сплавом ЖС6К (в)

У зв'язку з тим, що на поверхні деталей з покриттям є значні макронерівності, їхню обробку необхідно проводити за кілька проходів.

У загальному вигляді під час обробки покриттів глибина різання складається з двох складових – змінної (у межах нерівного шару покриття)  $t_{зм}$  і постійної (нижче нерівного шару покриття)  $t_{пст}$ . Середню величину  $t_{ср}$  може бути визначено за допомогою кривої відносної опорної поверхні профілю покриття –  $p = kt_p^u e^{nt_p}$ , де  $p$  – рівень перерізу поверхні від вершини найбільшої нерівності площиною, паралельною середній площині;  $t_p$  – величина відносної опорної профілю поверхні на рівні  $p$ ;  $k$ ,  $u$ ,  $n$  – коефіцієнти.

Таким чином, фактична продуктивність процесу обробки покриттів не визначається добутком режимів різання  $v$ ,  $S$ ,  $t$ , заданими на верстаті, тому що змінна складова глибини різання  $t_{3M}$  повинна враховуватися або через розподіл матеріалу в шарі, що видаляється, або через її середню величину.

З урахуванням методу Херста [8], приймаючи, як функцію, довжину зразка і приймаючи коефіцієнт, що залежить від виду розподілу випадкової величини  $\sim \pi/2$ , забезпечуючи масштабну інваріантність, змінну частину глибини різання під час оброблення покриттів може бути визначено через фрактальну розмірність профілю їхньої поверхні, визначену комірковим методом –  $t_{3M} = \text{const} (\delta^{3-D}/LR^2)$ , де  $\delta$  – характерний розмір комірки, за допомогою якої розглядається профіль;  $D$  – фрактальна розмірність профілю поверхні;  $L$  – довжина оброблюваного зразка;  $R$  – радіус зразка нижче нерівного шару покриття.

Максимальна величина змінної складової глибини різання визначається залежністю  $t_{3M, \max} = \sigma(\alpha L)^{2-D}$ , де  $\sigma$  – квадратичне відхилення висоти нерівностей профілю поверхні покриття;  $\alpha$  – коефіцієнт, що залежить від виду розподілу випадкової величини.

Вибір подачі виконується відповідно до загальних розуміннь стосовно конкретної операції обробки. Під час чорнового точіння величина подачі вибирається з умови максимальної продуктивності обробки, яка допустима за міцністю різального інструменту. В умовах чистової обробки наплавлених покриттів інструментами із твердих сплавів та PcBN величина подачі  $S < 0,2$  мм/об.

Підходи, запропоновані для випадків обробки різанням традиційних конструкційних матеріалів, можуть бути використані і для обробки наплавлених покриттів. При цьому потрібно враховувати специфічні особливості – значні мікронерівності на наплавленій поверхні та відхилення показників механічних властивостей шару покриття на різних ділянках, нестабільність, складність і неоднорідність хімічного складу, наявність у матеріалі твердих включень, раковин, пор. Рівень оптимальних швидкостей різання буде зумовлений обраним критерієм, за яким вона оцінюється, наприклад, якістю обробленої деталі, стійкістю інструменту або іншим.

Розглянемо такий приклад. Процеси різання характеризуються комплексною дією силового й температурного чинників на стан матеріалу покриття, і наслідком цієї дії є зміна, наприклад, відкритої пористості поверхні деталей із покриттями. Під дією сил з боку задньої поверхні інструмента за відносно невисокої швидкості різання (0,25–0,33 м/с) і температурних впливів на оброблюваний матеріал за підвищених швидкостей різання (1,0–3,0 м/с) відбувається зміна величини відкритої пористості щодо її вихідного значення. Вказане пояснюється так: підвищення швидкості різання, спричиняючи зменшення сил різання, веде до зменшення пластичної деформації оброблюваного матеріалу на контактних ділянках та відкрита пористість матеріалу покриття зі зростанням швидкості різання знижується; водночас нагрівання до значної температури призводить до розм'якшення та бічної течії поверхневих шарів матеріалу покриття, що обробляється, тому після досягнення певного значення швидкості різання, а отже, і температури на контактній ділянці деталі зі сторони задньої поверхні інструменту спостерігається закриття пор.

Таким чином, зміна структурного стану матеріалу покриття визначається взаємним проявом дії силового й теплового чинників процесу різання, інтенсивність яких при температурі, що відповідає певній швидкості різання, призводить, наприклад, до зменшення відкритої пористості покриття після обробки відносно її вихідної величини. Варіюванням швидкості різання можна досягти мінімальної зміни пористості від вихідної. Швидкість, що відповідає мінімальній зміні пористості, є оптимальною швидкістю різання за обраного критерію оптимальності – поверхневої пористості покриття після обробки. Наведене відповідає роботі [9], де дані свідчать, що під час оброблення з оптимальною швидкістю різання формується поверхневий шар виробу, що характеризується мінімальним ступенем деформації.

Інший приклад. Величина сили опору контактної взаємодії поверхневого шару покриття з індентором, який під навантаженням переміщується вздовж оброблюваної деталі, та її дисперсія визначає енергетичну спектральну щільність розподілу сили контактної взаємодії  $S$ . Величина співвідношення значень  $S$  для контактуючих матеріалів дозволяє оцінити їх взаємовплив у парі тертя «різальний інструмент – оброблюване покриття». Зокрема, для випадку точіння покриттів запропоновано залежність [10] –  $v_{opt} = c(S_i / S_o)^a e^{-b(S_i/S_o)}$ , де  $v_{opt}$  – швидкість різання, відповідна мінімальному зносу інструменту;  $S_i$  і  $S_o$  – максимальна величина енергетичної спектральної щільності сили контактної взаємодії поверхневого шару інструменту і покриття з індентором відповідно;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – експериментальні коефіцієнти, які залежать від використаних матеріалу інструмента й оброблюваного матеріалу.

Враховуючи наявність кореляційного зв'язку між фрактальними розмірностями структури і властивостей матеріалів, залежність, що зв'язує співвідношення параметрів структури матеріалу інструмента й оброблюваного матеріалу зі швидкістю різання, оптимальною для цієї пари, може бути представлена у вигляді:  $v_{opt} = cK(D_{0i} / D_{0o})^a e^{-b(D_{0i}/D_{0o})}$ , де  $v_{opt}$  – швидкість різання відповідно мінімальному зносу інструменту;  $D_{0i}$  та  $D_{0o}$  – величини фрактальної розмірності структури або сукупності механічних властивостей інструментального та оброблюваного матеріалів відповідно;  $K$  – коефіцієнт, що враховує співвідношення середніх величин механічних показників, наприклад, твердості за Віккерсом, матеріалів.

Підхід, заснований на використанні статистичної інформації про структури та властивості оброблюваних матеріалів, дозволяє мінімізувати необхідні дані, традиційно одержані при проведенні експериментів з різання для оцінки оброблюваності матеріалів. Це також дозволяє коригувати умови обробки для окремої обмеженої партії деталей із матеріалів з гетерогенною структурою, наприклад, із наплавленим покриттям.

Слід зазначити, що ефективність використання різальних інструментів при обробці деталей із наплавленим покриттям проявляється у величині швидкості різання та обумовлена твердістю оброблюваного матеріалу, його хімічним складом і наявністю у структурі абразивних включень (табл. 2 [11]).

Таблиця 2 – Орієнтовні швидкості різання (м/хв) при точінні наплавлених покриттів

Матеріал інструменту		Твердість (HRC) наплавлених матеріалів типу А, В, С, D			
		30–40	40–50	50–60	60–65
Твердий сплав групи	ВК	15–17	11–15	7–11	5–7
	ТК	18–21	14–18	11–14	8–11
	ТТК	21–24	17–21	14–17	12–14
Безвольфрамовий твердий сплав ТН 20		16–18	13–16	11–13	7–11
Мінералокераміка ВОК		30–33	27–30	27	21–24
PcBN	композит 01	72–76	66–72	60–66	54–60
	композит 05	78–84	72–78	66–72	60–66
	композит 09	108–120	96–108	96	90
	композит 10	108–120	96–108	90–96	81–90
	киборит	108–120	96–108	90–96	81–90
	томал 10	96–108	90–96	87–90	78–82

Превентивне визначення геометричних параметрів інструменту для обробки покриттів є складною задачею, за рішенням якої потрібно розглядати значну кількість показників.

Різальний інструмент повинен мати від'ємний передній кут, що дає змогу підвищити його міцність (від'ємний передній кут можна виконувати тільки на фасці завширшки 0,2–0,4 мм, а на решті частини передньої поверхні різця передній кут може бути нульовим); радіус при вершині різця слід приймати досить великим (0,3–1,0 мм) або необхідно виконувати перехідну кромку 0,2–0,4 мм з  $\phi_0 = 0^\circ$ ; головний кут у плані різця має бути  $\phi > 30^\circ$ –



35°, оскільки малі кути в плані зумовлюють наявність значної радіальної сили різання, що, поряд із великою шириною різальної кромки, сприяє появі вібрацій і зниженню точності оброблення за недостатньої жорсткості технологічної системи. Величину допоміжного кута різця в плані залежно від його виду рекомендується вибирати в діапазоні 5–20°.

Висока вартість матеріалів покриттів, відносно невелика (особливо для умов обробки по кірці) товщина покриття обумовлюють складності експериментального визначення геометричних показників інструменту. У цьому випадку значний інтерес становить спроба їх орієнтовного теоретичного визначення, наприклад з урахуванням підходів, запропонованих в [12].

Якщо прийняти, що знос інструменту при точінні покриттів відбувається тільки по задній поверхні, а коефіцієнт тертя матеріалу інструменту по наплавленому матеріалу приблизно той самий, як і по сталях, для визначення заднього кута інструменту можна використати залежність  $-\sin\alpha = \text{const}/a_{\text{max}}^k$ , де  $a_{\text{max}}$  – найбільша товщина зрізу;  $k$  – показник, який залежить від типу інструменту і матеріалу оброблюваної деталі.

З урахуванням того, що максимальна товщина зрізу під час точіння пов'язана з величиною подачі, отримуємо  $-\sin\alpha = \text{const}/S_k \sin^k \varphi_i$ , де  $\varphi_i$  – головний кут у плані в точці різальної кромки, що відповідає  $a_{\text{max}}$ .

Зміна величини заднього кута в межах 5–12° відносно слабо впливає на стійкість різців, лише його зниження до 2–4° призводить до затирання з боку задньої поверхні, зростанню площі контакту на задній поверхні та підвищенню температури, що негативно позначається на працездатності інструменту. Збільшення заднього кута > 12–15° послаблює різальний клин інструменту.

Значення переднього кута інструменту можна визначити за величиною межі міцності на розтягнення  $R_m$  оброблюваного матеріалу:  $-\gamma = 0,22 \cdot 10^{-11} R_m^{5,7}$ .

Припускаючи, що для наплавлених покриттів справедливо  $-R_m = 0,38 \text{ HB}$ , величина переднього кута визначається за виразом:  $-\gamma = 0,89 \cdot 10^{-11} \text{ HB}^{5,7}$ .

Як видно, зі збільшенням твердості покриття негативне значення переднього кута інструменту зростає, що підтверджується практикою.

Аналізуючи експериментальні дані з досліджень геометричних параметрів інструменту під час оброблення наплавлених покриттів, можна дійти висновку, що застосування інструменту з від'ємним значенням переднього кута  $-(5-10)^\circ$  призводить до зниження стійкості інструменту, збільшення сколів та викришувань через ослаблення різального клину, а це особливо помітно під час оброблення по кірці. Збільшення ж від'ємного значення переднього кута до величини  $-(20-25)^\circ$  погіршує стружкоутворення, збільшує ризик появи вібрації і навантаження на інструмент, що зумовлює зменшення його працездатності.

Зміцнення різальної кромки інструменту може бути здійснено шляхом створення фаски на передній поверхні шириною  $(1,5-2,0)S$ , при цьому на фасці виконується негативний передній кут  $\gamma_f = \gamma - \gamma_d$ , де  $\gamma_d$  – передній кут, виконаний на державці інструменту.

Наведені вище залежності дають дещо завищені значення геометричних параметрів інструменту і в першому наближенні можуть розглядатися як максимальні.

**Висновки.** Визначені основні елементи технологічної підготовки механічної обробки деталей із наплавленим поверхневим шаром. Наведені вихідні передумови розробки технології механічної обробки наплавлених деталей: розрахунок припусків та граничних розмірів виробу відповідно до технологічних переходів і товщини наплавленого покриття; загальні рекомендації з вибору матеріалу робочої частини різального інструменту для умов обробки безпосередньо по дефектному поверхневому шару та чистовій обробці покриттів; розглянуто підходи до визначення швидкості різання, які базуються на вимо-



гах забезпечення стійкості різального інструменту та якості шару наплавленого покриття; розглянуто підходи до визначення геометричних параметрів інструменту з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу.

### Список використаних джерел

1. Тарельник В. Б. Галузеве машинобудування : підручник / В. Б. Тарельник, С. В. Коноплянченко, В. М. Зубко. – Київ : Олді+, 2023. – 468 с.
2. Analysis of Multi-Objective Optimization of Machining Allowance Distribution and Parameters for Energy Saving Strategy / K. He, H. Hong, R. Tang, J. Wei // *Sustainability*. – 2020. – № 12. – С. 638-370.
3. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – Киев : Наук. думка, 1987. – 543 с.
4. Формирование газотермических покрытий при производстве деталей / С. А. Клименко, Л. Г. Полонский, М. Ю. Харламов, Ю. А. Харламов, П. А. Витязь, В. С. Ивашко, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 415 с.
5. Колев, К. С. Точность обработки и режимы резания / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – Москва : Машиностроение, 1976. – 144 с.
6. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко, В. С. Ивашко, С. А. Клименко, М. Л. Хейфец. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 464 с.
7. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин : зб. наук. праць / ред. Б. Є. Патон; ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. – Київ, 2015. – 820 с.
8. Feder J. *Fractals* / J. Feder. – New York : Springer, 1988.
9. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / под ред. М. Л. Хейфец. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 247 с.
10. Обработка материалов лезвийным инструментом / ред. С. А. Клименко. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.
11. Оптимизация процесса обработки неоднородных наплавленных материалов деталей тракторов / В. В. Коломиец, Р. В. Антощенко, Р. В. Ридный, С. А. Богданович, И. А. Фабричникова // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2019. – № 1. – С. 52-59.
12. Ларин М. Н. Оптимальные геометрические параметры режущей части инструмента / М. Н. Ларин. – Москва : Оборонгиз, 1953. – 146 с.

### References

1. Tarelnik, V.B., Konoplyanchenko, Ye.V., & Zubko, V.M. (2023). *Galuzeve mashinobuduvannia [Industrial engineering]*. Oldi+.
2. Keyan, He, Huajie, Hong, Renzhong, Tang, Junyu, Wei. (2020). Analysis of Multi-Objective Optimization of Machining Allowance Distribution and Parameters for Energy Saving Strategy. *Sustainability*, (12), 638–370.
3. Borisov, Yu.S., Kharlamov, Yu.A., Sidorenko, S.L., Ardatovskaia, Ye.N. (1987). *Gazotermicheskie pokrytiia iz poroshkovykh materialov: spravochnik [Gas-thermal coatings from powder materials: reference book]*. Nauk. dumka.
4. Klimenko, S.A., Polonskiy, L.G., Kharlamov, M.Yu., Kharlamov, Yu.A., Vityaz, P.A., Ivashko, V.S., Kheyfets, M.L., & Chizhik, S.A. (2020). *Formirovaniie gazotermicheskikh pokrytii pri proizvodstve detalei [Formation of gas-thermal coatings in the production of parts]*. Belaruskaiia navuka.
5. Kolev, K.S., & Gorchakov, L.M. (1976). *Tochnost obrabotki i rezhimy rezaniia [Machining accuracy and cutting conditions]*. Mashinostroyeniye.
6. Borodavko, V.I., Ivashko, V.S., Klimenko, S.A., & Kheyfets, M.L. (2013). *Obrabotka i uprochneniye poverkhnostey pri izgotovlenii i vosstanovlenii detalei [Treatment and hardening of surfaces in the manufacture and restoration of parts]*. Belaruskaiia navuka.
7. Paton, B.Ie. (Ed.). (2015). *Problemi resursu i bezpeki yekspluatatsiï konstruktsiï, sporud ta mashin [Problems of the resource and safety of operation of structures, buildings and machines]*. ІЕЗ ім. Іе.О. Патона NAN Ukrainy.
8. Feder, J. (1988). *Fractals*. Springer New York.
9. Kheyfets, M.L. (Ed.). (2019). *Obespecheniie kachestva izdeliy v tekhnologicheskikh kompleksakh [Ensuring the quality of products in technological complexes]*. Belaruskaiia navuka.
10. Klimenko, S.A. (Ed.). (2006). *Obrabotka materialov lezviynym instrumentom [Processing of materials with a blade tool]*. ISM im. V. N. Bakulya, IPTS «ALKON» NAN Ukrainy.

11. Kolomiyets, V.V., Antoshchenkov, R.V., Ridnyy, R.V., Bogdanovich, S.A., & Fabrichnikova, I.A. (2019). Optimizatsiia protsessa obrabotki neodnorodnykh naplavlennykh materialov detaley traktorov [Optimization of the processing process of non-homogeneous welded materials of tractor parts]. *Fiziko-khimichna mekhanika materialiv – Physico-chemical mechanics of materials*, (1), 52–59.

12. Larin, M.N. (1953). *Optimalnye geometricheskie parametry rezhushchei chasti instrumenta [Optimal geometric parameters of the cutting part of the tool]*. Oborongiz.

Отримано 25.04.23

UDC 621.9416:621.9.025.7

**Sergiy Klymenko<sup>1</sup>, Serhiy Klymenko<sup>2</sup>, Maryna Kopieikina<sup>3</sup>,  
Andriy Manohkin<sup>4</sup>, Leonid Polonsky<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Deputy Director of Science  
V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [atmu@meta.ua](mailto:atmu@meta.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>. Researcher ID: [Q-8928-2019](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)  
SCOPUS Author ID: [57221904325](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences,

Senior Researcher of the Department «Technological Control of the Quality of Machining Tools with SHM»  
V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [alcon1202@ukr.net](mailto:alcon1202@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>. Researcher ID: [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)  
SCOPUS Author ID: [57197629303](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,

Senior Researcher of the Department «Technological Control of the Quality of Machining Tools with SHM»  
V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [atmul@meta.ua](mailto:atmul@meta.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>. Researcher ID: [FZY-5450-2022](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)  
SCOPUS Author ID: [3633766140](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,

Senior Researcher of the Department «Technological Control of the Quality of Machining Tools with SHM»  
V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [the.manohkin@gmail.com](mailto:the.manohkin@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>. Researcher ID: [DGN-4506-2022](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)  
SCOPUS Author ID: [37059129600](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)

<sup>5</sup> Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering  
State University “Zhytomyr Polytechnic” (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: [pol@ztu.edu.ua](mailto:pol@ztu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4347-9088>. SCOPUS Author ID: [57221220964](https://orcid.org/0000-0002-4347-9088)

## INITIAL PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR TURNING WELDED PARTS

*The initial prerequisites for the development of technology for turning welded parts are determined, which include the calculation of allowances and boundary dimensions of the product in accordance with technological transitions and the thickness of the welded coating. An approach to setting the depth of cut is proposed, which ensures that the coating layer on the machined part has the best and most stable properties, which gives the product better performance, in particular, greater wear resistance. In general, the average depth of cut can be determined using the curve of the relative bearing surface of the coating profile, and, taking into account the Hirst method, the variable part of the depth of cut during coating processing can be determined through the fractal dimension of the surface profile. Some approaches to determining the cutting speed based on the requirements for ensuring the quality of the deposited coating layer and the stability of the cutting tool, as well as the geometric parameters of the tool, taking into account the properties of the material being processed, are considered.*

**Keywords:** deposited part; machining allowance; cutting mode parameters; geometric parameters of tool.

Table: 2. Fig.: 2. References: 12.