

УДК 621.452.3.03

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.164622

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ПЛАНЕТАРНОЮ ШЛІФУВАЛЬНОЮ ГОЛОВКОЮ

Калініченко М. Ю.

### 1. Вступ

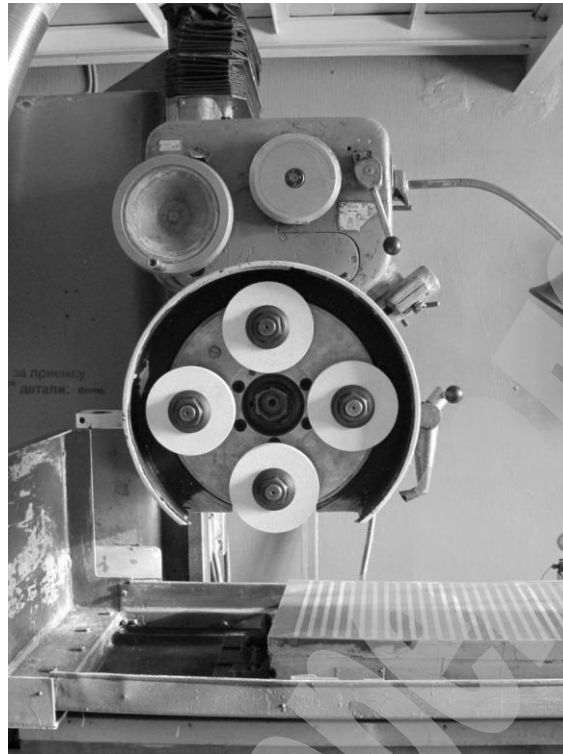
Розвиток сучасного машинобудування, легкої та харчової промисловостей супроводжується освоєнням нових конструкційних, теплостійких і зносостійких сталей і сплавів з високими властивостями міцності. Ці матеріали застосовують у виробництві таких відповідальних деталей, як лопатки, вали, зубчасті колеса, забезпечуючи високі характеристики міцності, тим самим збільшуючи термін роботи виробів, що працюють в умовах високих температур при знакозмінних циклічних навантаженнях. Оброблення таких матеріалів є дуже трудомістким, а застосування лезових методів оброблення малопродуктивним [1]. Одним із шляхів підвищення ефективності механічної обробки є впровадження у виробництво технології глибинного шліфування. Процес глибинного шліфування забезпечує мінімальне пошкодження оброблюваної поверхні, є більш продуктивним порівняно з фрезеруванням і протягуванням. А також характеризується високою економічністю порівняно з традиційними методами оброблення. Технологія глибинного шліфування дозволяє скорочувати час оброблення, збільшувати якість і точність показників оброблених поверхонь деталей. Це можливо лише на основі опису температурного стану підповерхневих шарів заготовки для встановлюваних режимів оброблення з урахуванням геометричних параметрів форми шліфувальних кругів, а також кінематики процесу оброблення [2, 3]. Як *об'єкт дослідження* вибрано процес глибинного шліфування деталей авіаційних двигунів із важкооброблюваних матеріалів. *Метою дослідження* є забезпечення параметрів якості поверхонь деталей загального машинобудування, харчової і авіаційної промисловості методом глибинного шліфування.

### 2. Методика проведення досліджень

Експериментальні дослідження плоского планетарного шліфування проводили на плоскошліфувальному верстаті польського машинобудівного підприємства Jotes, моделі SPD 30-b [4] з встановленою на його шпинделі, через спроектований перехідник, планетарною шліфувальною головкою (ПШГ) [5, 6].

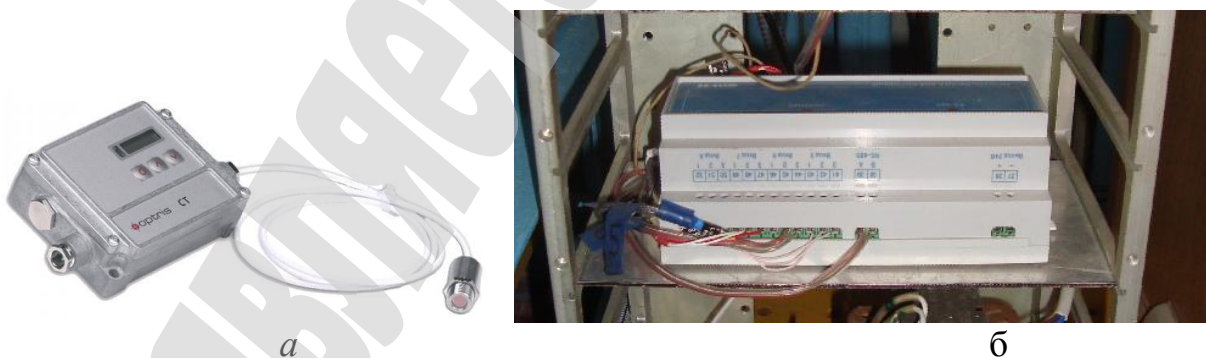
Обороти ПШГ регулювали в діапазоні  $n_{ПШГ}=0-800$  об/хв шляхом включення в ланцюг двигуна головного робочого руху частотного перетворювача Lenze ESV752N04TXB (Німеччина) [7]. У процесі експериментальних досліджень на ПШГ установлювали абразивні круги прямого профілю (ПП)  $100 \times 20 \times 32$  з такими характеристиками: 38A25BM28K35A3; 24A40M36K6. Діаметр планетарної головки (разом з абразивними кругами)  $D_{ПШГ}=350$  мм, передаточне відношення  $i=3,5$ . Поздовжню подачу деталі  $S_{позд}$  змінювали в межах 0,1–0,8 м/хв, а глибина

шліфування  $t=1-7$  мм. Оброблення проводили при попутному обертанні шліфувальних кругів ПШГ (рис. 1) [8].



**Рис. 1.** Загальний вигляд планетарної шліфувальної головки, встановленої на плоскошліфувальному верстаті Jotes SPD-30b (Польща)

Температуру оброблюваної заготовки вимірювали двома способами – контактним і безконтактним. Пірометр СТ 3М (Optris, Німеччина) здійснював безконтактне вимірювання температури на поверхні шліфувального круга в зоні різання, а також під оброблюваною поверхнею заготовки з варійованою глибиною вимірювань. Контактне вимірювання температур здійснювали за допомогою термопар, підключених до вимірника ОВЕН МВА 8 (Росія), рис. 2.



**Рис. 2.** Вимірювальні комплекси:  
*а* – пірометр СТ 3М; *б* – вимірювач ОВЕН МВА 8

Термопари діаметром 1,8 мм типу К підключали вільними кінцями до входів вимірювального приладу з дотриманням полярності, щоб уникнути серйозних помилок. Підключення ж самого вимірника ОВЕН МВА 8 до

комп'ютера здійснювали за допомогою адаптера інтерфейсу RS-485 ОВЕН АС3 (Росія). Далі, за допомогою програмного забезпечення, що поставляється в комплекті з вимірювальним приладом, проводилося опитування термопар із подальшим виведенням результатів.

Як зразки для проведення експериментів з метою опису процедури попередньої підготовки були вибрані заготовки прямокутної форми з розмірами  $85 \times 25 \times 25$  мм, виконані з інструментальної штампової сталі 4Х5МФ1С за ГОСТ 5950–2000 [9] і твердістю 49–51 HRC. З боку настановної площини заготовки виконували глухі отвори, забезпечуючи глибину закладки термопар у 2 мм під оброблюваною поверхнею. Для цього використовували вертикально свердлильний верстат 2ЧС112 СФ (Росія) і електроерозійний верстат 4Е723–01Ф1 (СРСР) з латунним електродом RBS1D180×300. У результаті виходили отвори діаметром 1,8–2 мм з радіусним заокругленням торця отвору і шорсткістю  $R_a$  0,8 мкм (згідно з паспортом верстата). Схему закладення термопар показано на рис. 3.

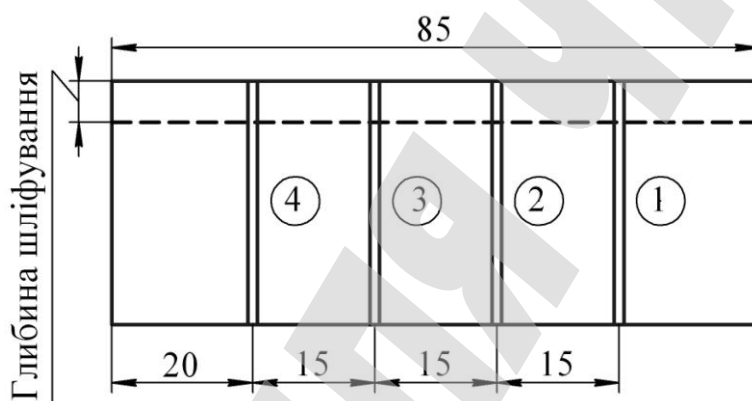


Рис. 3. Схема закладення термопар

Згідно зі встановленою методикою проведення експериментів було підготовлено 18 зразків. У кожен з них були вмонтовані термопари, як показано на рис. 4.



Рис. 4. Закладення термопари

Експериментальні дослідження температурних полів заготовок зі сталі 4Х5МФ1С у процесі їх оброблення кругами ПП  $100 \times 20 \times 32$  38А25ВМ28К35А3, встановлених на ПШГ, проводили при таких параметрах процесу шліфування:

- глибина шліфування  $t$ , мм: 0,5; 1,0; 1,5; 2,5;
- швидкість обертання кругів  $V_{кр}$ , м/с: 12, 16, 20;

- поздовжня подача  $S_{\text{Позд}}$ , мм/с: 0,50; 0,75; 1,00; 1,50;
- ширина шліфування  $B$ , мм: 20;
- правку кругів здійснювали однокотковим алмазним олівцем.

В якості змащувально-охолоджувальної технологічної рідини (ЗОТР) використовували 5 %-ий водний розчин  $\text{NaHCO}_3$  («содову воду»).

### 3. Результати досліджень та обговорення

Як наведено в табл. 1, експериментальні значення демонструють гарне узгодження з результатами теоретичного теплового аналізу. Таким чином, коректність теплової моделі була перевірена для процесу глибокого шліфування із застосуванням ПШГ великою кількістю експериментів. Крім того, результати показують, що виміряна температура тим вище, чим вище швидкість заготовки і більше глибина різання. Однак, температура заготовки не знижується, а, навпаки, незначно збільшується при збільшенні швидкості круга. Незважаючи на це, цей ефект зниження температури заготовки не застосовується при використанні більш високих швидкостей круга. Співвідношення теплового розподілу показують, що збільшення швидкості круга ефективніше збільшує частку теплопередачі в інструмент і змащувально-охолоджувальну рідину (ЗОР). Енергія шліфування також підвищується зі збільшенням швидкості круга, в результаті чого більша кількість теплової енергії надійде в заготовку і температура стане вище.

**Таблиця 1**

Результати експериментальних і теоретичних досліджень

№ експерименту	Технологічні режими оброблення				Тепловий потік, Вт/мм <sup>2</sup>		$R_w$	Температура заготовки, °С		
	$V_{\text{кр}}$ , м/с	$D_{\text{кр}}$ , мм	$t$ , мм	$S_{\text{Позд}}$ , м/хв	$Q_{\text{КРИТ}}$	$Q_{\text{ЗАГАЛ}}$		$T_{\text{ЕКСП}}$ (2 мм)	$T_{\text{ТЕОР}}$ (2 мм)	$T_{\text{ТЕОР}}$ (0 мм)
1	20	80,2	1,50	0,200	6,48	7,15	0,320	160,9*	183,1	250,5
2	20	79,6	1,50	0,075	6,42	6,24	0,310	72,5	74,2	86,0
3	20	79,4	1,50	0,060	6,34	5,28	0,292	69,5	68,5	79,1
4	20	79,0	1,50	0,045	6,38	4,61	0,280	65,2	63,7	73,8
5	20	78,6	1,50	0,030	6,24	4,20	0,272	59,5	61,8	69,4
6	20	78,4	1,00	0,090	7,05	5,73	0,332	69,5	65,8	78,4
7	20	78,2	1,00	0,075	7,14	4,87	0,326	63,5	61,0	70,8
8	20	77,8	1,00	0,060	7,13	4,26	0,316	59,4	56,7	64,1
9	20	77,4	1,00	0,045	7,03	3,79	0,296	55,5	52,9	60,7
10	20	77,0	1,00	0,030	7,03	3,47	0,288	51,9	51,7	57,7
11	16	76,8	2,50	0,090	4,97	6,17	0,311	230,9*	210,7	320,1
12	16	76,6	2,00	0,060	5,40	5,27	0,328	77,2	78,6	88,0
13	16	76,2	1,50	0,060	5,70	4,50	0,332	66,5	67,9	77,6
14	16	75,8	1,00	0,060	6,47	3,96	0,340	56,8	57,4	65,8
15	16	75,4	0,50	0,060	7,57	3,37	0,380	50,4	46,8	55,1
16	12	62,8	1,50	0,060	5,01	4,06	0,377	67,6	66,9	77,3
17	16	62,0	0,50	0,030	–	–	–	820,0*	–	–
18	16	74,0	0,50	0,030	7,54	3,25	0,369	48,2	47,0	54,2

Примітка: \* – поява припікань

В табл. 1 значення енергії шліфування  $q_{заг}$  є вище значень критичної енергії шліфування  $q_{крит}$  для експериментів № 1 і № 11. Крім того, в обох цих випадках максимальна температура поверхні заготовки  $T_{теор}$  (0 мм) дуже близька до температури точки бульбашкового кипіння рідини. Припикання заготовки не виникає на початку процесу шліфування, а лише після деякої довжини переміщення шліфувальної головки. До того ж, перехідна ділянка від нормальних умов оброблення до утворення припикання супроводжується раптовим (стрибкоподібним) збільшенням сили шліфування і стрімким зростанням температури заготовки.

Після цього припикання на поверхні заготовки утворюються безперервно. Відзначимо умови утворення припикання. Для цього вертикальну і горизонтальну складову сили різання визначали за її середнім значенням. Визначення її величини виконували для кожного дискретного переміщення шліфувального круга відносно оброблюваної поверхні. Як приклад, візьмемо експеримент № 1, початок утворення припикання заготовки дорівнює 38-ій секунді процесу шліфування. Період розрахунку усереднених значень температур становить з 16 по 32 секунди процесу шліфування. Таким чином, отримане експериментальним способом значення температури на другій термоділянці на глибині 2 мм  $T_{експер}$  є визначальним як максимально виміряна величина температури. В цей момент часу припикання заготовки ще не утворюється. Припикання виявляється в момент часу, коли шліфувальний круг пройшов над третьою термоділянкою, навіть, якщо вона фіксувала нижчу температуру, аніж друга термоділянка.

У результаті виконаних експериментів для деталей зі сталі 4Х5МФ1С була підтверджена адекватність теплової моделі, яка дозволяє спрогнозувати температуру заготовки, має хорошу узгодженість з експериментальними даними. Більше того, сигнали вимірюваної потужності шліфування і температури можуть встановлювати появу припикання заготовки. Результати експериментів показують, що перехід від умов оброблення без припикань до оброблення з утворенням припикань супроводжується різким зростанням потужності шліфування і подальшим зростанням температури заготовки, коли енергія шліфування, утворена в ході експерименту, перевищує критичну енергію. Таким чином, виникнення припикання заготовки може бути спрогнозовано з метою його уникнення.

#### **4. Висновки**

За результатами виконаних досліджень було встановлено, що застосування ПШГ для глибокого шліфування деталей машинобудівної і авіаційної галузей [10] з важкооброблюваних, корозійностійких матеріалів приводить до зниження енергосилових показників процесу з одночасним поліпшенням класу чистоти поверхні:

– температура в зоні контакту зменшується до значень, при яких відсутні фазові перетворення в поверхневих шарах заготовки: 60–90 °С (крім експериментів № 1, 11 і 17);

- спостерігається поліпшення фізико-механічних властивостей оброблюваної поверхні (шорсткість оброблених поверхонь знаходиться в межах  $R_a$  1,25–1,8 мкм);
- багатошпаруваті ельборові круги дозволяють форсувати режим шліфування без шкоди для точності і якості оброблення;
- значною мірою знижується витрата ЗОР, аж до її відсутності в процесі оброблення. Крім того, вимоги, що пред'являють до властивостей ЗОР, можуть бути менш критичними;
- збільшилася стійкість абразивних кругів (не менше ніж в 2 рази).

### Література

1. Research on surface integrity of grinding Inconel718 / Yao C. F., Jin Q. C., Huang X. C., Wu D. X., Ren J. X., Zhang D. H. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 65, Issue 5-8. P. 1019–1030. doi: <http://doi.org/10.1007/s00170-012-4236-7>
2. Creep feed grinding of  $\gamma$ -TiAl using single layer electroplated diamond superabrasive wheels / Hood R., Cooper P., Aspinwall D. K., Soo S. L., Lee D. S. // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2015. Vol. 11. P. 36–44. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.07.001>
3. Bi X. F. Effects of Grinding Parameters on Creep Feed Grinding // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 658. P. 255–258. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.658.255>
4. Плоскошлифовальный станок с горизонтальной осью вращения Jotes SPD-30b: техн.-эксплуатац. док. Fabryka szlifierek «PONAR-Lódz». Zaklad «Jotes», 1975. 226 с.
5. Сурду Н. В. Повышение эффективности шлифования труднообрабатываемых материалов за счет усовершенствования кинематики процессов: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Харьков: Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 2005. 241 с.
6. Создание планетарной головки для глубинного шлифования труднообрабатываемых материалов / Тарелин А. А., Сурду Н. В., Телегин А. В., Фистик А. Г. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2009. Т. 4, № 6 (40). С. 4–12. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/22015/19522>
7. Lenze SMVector – преобразователь частоты. URL: [https://saa.su/Manual/Lenze/SMV\\_IP31\\_IP65\(RUS\).pdf](https://saa.su/Manual/Lenze/SMV_IP31_IP65(RUS).pdf)
8. Курін М. О. Дослідження технології планетарного глибинного шліфування плоских поверхонь деталей авіаційних двигунів: дис. ... канд. тех. наук : 05.07.02. Харків: НАУ ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2011. 179 с.
9. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
10. Профильное глубинное шлифование зубчатых колес / Елисеев Ю. С., Новиков В. С., Старков В. К., Рябцев С. А. // *Вестник машиностроения*. 2001. № 1. С. 41–44.