

**Н. Ю. КАЛИНИЧЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ГОЛОВОК**

*Развитие авиационной техники основывается на внедрении новых прогрессивных технологий, применении новых материалов, совершенствовании технологического оборудования и инструмента. Совершенствование авиационных двигателей зачастую обуславливает большее применение износостойких, жаропрочных, жаростойких материалов на основе никеля и титана, характеризующиеся низкими коэффициентами обрабатываемости. Лезвийная обработка таких сплавов сталкивается с рядом трудностей: повышенный износ оборудования, увеличенное время наладки станка на операцию, высокие силы резания, повышенный износ режущего инструмента, увеличение времени обработки и т.д. Все это негативно сказывается на производительности, увеличению времени производственного процесса и снижению экономической эффективности. Применение операции глубинного шлифования взамен лезвийных операций фрезерования, протягивания, строгания и абразивных операций (шлифование предварительное, шлифование окончательное) позволяет сократить время изготовления деталей с сохранением ее качественных и точностных показателей. Исследование технико-экономического аспекта предлагаемой технологии глубинного шлифования взамен операций предварительного и окончательного шлифования представляет интерес. В работе проводится сравнение двух методов абразивной обработки: традиционное шлифование и глубинное шлифование на плоскошлифовальном станке SPD-30B фирмы «Jotes» (Польша) с установленной на его шпинделе планетарной шлифовальной головкой (ПШГ). Исследование проводилось при шлифовании замковой части турбинных лопаток. Снимаемый припуск составлял 3,8 мм. Обработка по традиционной схеме шлифования проходила за 10 проходов, при этом время обработки составило около трёх с половиной минут. Обработка по схеме глубинного шлифования с применением ПШГ за 4 прохода, что по времени заняло порядка минуты машинного времени. Следует отметить значительный рост производительности на первом переходе при снятии припуска в 3,5 мм в режиме глубинного шлифования по сравнению с традиционным шлифованием в 2,1 раза. На втором и третьем переходах производительность обоих методов фактически одинакова.*

**Ключевые слова:** *глубинное шлифование; планетарная шлифовальная головка; плоское шлифование; лопатки ГТД; производительность глубинного шлифования*

**Введение**

В настоящее время детали авиационных двигателей: пазы валов, впадины между зубьев зубчатых колес, хвостовики турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов обрабатываются методом глубинного шлифования [1, 2], который обеспечивает повышенную производительность и экономичность обработки. Цель работы – практическое подтверждение экономического преимущества метода глубинного шлифования в сравнении с традиционными методами абразивной обработки. Исследование технико-экономического показателя процесса глубинного шлифования проводили на примере обработки замковой части и полки турбинных лопаток из сплава марки ЭП 741. Лопатки обрабатывались на плоскошлифовальном станке SPD-30B фирмы «Jotes» (Польша) с установленной на его шпиндель ПШГ. В качестве инструмента использовались шлифовальные круги типоразмера 1 100×20×32 с

характеристикой 25A F80 F, установленные на ПШГ и круг типоразмера 1 350×32×203,2.

**Постановка задачи**

Проводили сравнение двух разных режимов шлифования, которые отличались количеством проходов на переходах, а также параметрами режимов обработки и правки абразивного инструмента (табл. 1). Исходя из кинематических особенностей ПШГ, которые обеспечивают снижение контактных температур, уменьшают на порядок потребность в расходе СОЖ, повышают, не менее чем в два раза, стойкость абразивного инструмента [3], обработку с применением ПШГ возможно проводить на более интенсивных режимах шлифования, табл. 1.

По результатам производственных испытаний был выполнен анализ работоспособности высококопρισного шлифовального круга с характеристикой

Таблица 1

Режимы профильного глубинного шлифования и правки абразивного инструмента

Варианты	Номер перехода	Число проходов	Припуск на обработку, мм	Параметры режима шлифования			Режим правки
				$V_{кр}$ , м/с	$t_{общ}$ , мм	$S_{пр}$ , мм/мин	$S_{пр.кр.}$ , мкм/проход
1	1	3	1,200	25	3,500	420	200
	2	2	0,225	20	0,450	450	
	3	5	0,010	20	0,050	520	
2	1	1	3,500	20	3,500	360	50
	2	2	0,225	18	0,450	480	
	3	1	0,050	18	0,050	520	

25A F80 F 12V при двух вариантах режима глубинного шлифования замковой части и полки лопаток турбины.

Сравнительная оценка вариантов обработки лопаток методом глубинного шлифования выполнялась по показателям, принятым в работе [4, 5]:

1. Производительность глубинного шлифования как скорость съема материала, отнесенная к 1 мм высоты круга для каждого перехода  $Q_w$  с размерностью  $мм^3/(мм \cdot с)$ :

$$Q_{wj} = \sum_{i=1}^n V_{cmi} \cdot t_i, \quad (1)$$

где  $V_{cmi}$  – относительная скорость продольной подачи детали и круга на  $i$ -м проходе, [мм/мин];

$t_i$  – припуск, удаляемый на  $i$ -м проходе;

$n$  – количество проходов в одном переходе.

Более точным будет выражение, в котором учитывается неполнота удаляемого профиля обрабатываемой заготовки через коэффициент  $K_F$ :

$$Q_w = K_F \cdot \sum_{j=1}^m Q_{wj}, \quad (2)$$

где  $m$  – количество переходов.

2. Машинное время, затрачиваемое на один переход  $\tau_j$  [с]:

$$\tau_j = \sum_{i=1}^n \frac{l_d}{V_{cmi}} \quad (3)$$

и соответственно общее время рабочего цикла  $\tau$  [с]

$$\tau = l_d \sum_{j=1}^m \tau_j, \quad (4)$$

где  $l_d$  – длина обрабатываемой поверхности, мм.

Машинное время обработки отражает преимущественно физическую сторону глубинного шлифования по интенсивности воздействия на инструмент и заготовку.

Расход абразива как уменьшение диаметра шлифовального круга/кругов ПШГ при обработке детали за  $n$  проходов  $\delta_D$  [мм]:

$$\delta_D = \frac{120}{\pi} \cdot \frac{l_d}{D} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_{pi} \cdot V_{kpi}}{V_{cmi}}, \quad (5)$$

где  $S_{pi}$  – величина подачи алмазного правящего ролика на  $i$ -м проходе, мкм/об.кр;

$V_{kpi}$  – скорость круга на  $i$ -м проходе, м/с.

3. Количество деталей (поверхностей)  $n_d$ , которые могут быть обработаны кругом до полного его износа:

$$n_d = \frac{\pi(1-K_D) \cdot D^2}{120l_d} \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{S_{pi} \cdot V_{kpi}}{V_{cmi}}} \right), \quad (6)$$

где  $K_D$  – коэффициент, определяющий предел уменьшения наружного диаметра круга.

Стоимость работы круга  $q'_c$ , приходящаяся на изготовление одной детали [грн./дет]:

$$q'_c = C_{кр} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \delta_{Di}}{(1-K_D)D}, \quad (7)$$

где  $C_{кр}$  – стоимость круга, грн.

Расход абразива, связанное с ним количество обрабатываемых деталей и стоимость работы круга определяют преимущественно экономику и экологию выбранного варианта технологии профилирования глубинным шлифованием.

Для расчетов по формулам (5) – (7) были приняты следующие постоянные величины:  $D = 350$  мм;  $K_D = 0,75$ ;  $l_d = 120$  мм, стоимость круга 1 350×32×203,2 с характеристикой 25A F80 F 12V – 1375 грн. для первого случая и стоимость кругов ПП 100×20×32 – 65 грн × 4 шт = 260 грн.

## Результаты

Полученные данные для двух исследованных вариантов режима глубинного шлифования замковой части и полки лопаток турбины и правки круга приведены в табл. 2.

На рис. 4 – 6 показаны графики, отражающие значения производительности шлифования, машинного времени и расхода абразивного материала по трем позициям профильного глубинного шлифования замковой части и полки лопаток турбины с различными вариантами обработки.

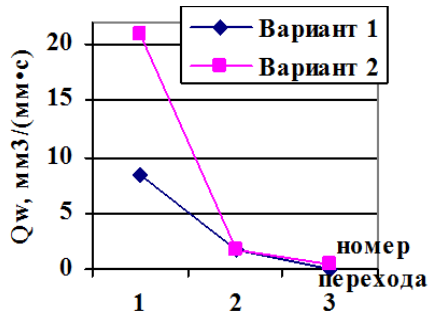


Рис. 4. Производительность двух вариантов режима глубинного шлифования турбинной лопатки кругом с характеристикой 25A F80 F 16V по переходам

Уменьшение величины правки абразивного инструмента до 4-х раз при втором варианте шлифования позволило сократить расход абразивного инструмента при шлифования заднего торца бандажной полки на 52 %, при шлифовании гребешков замковой части и полки со стороны входной кромки на 86 %, а в целом по операции расход абразива сократился в несколько раз.

Увеличение относительной подачи “деталь-круг” и уменьшение подачи алмазного ролика для правки круга позволило увеличить в 3 раза количество деталей, которые могут быть обработаны кругом до его полного износа (рис. 6, а). В конечном итоге это позволило снизить относительную стоимость шлифовального круга, приходящуюся на обработку одной детали с 423,85 грн./дет. до 96,78 грн./дет. (рис. 6, б). Доказательством роста

экономической эффективности от внедрения ПШГ на базе универсального оборудования взамен специальному, служит исследование [6].

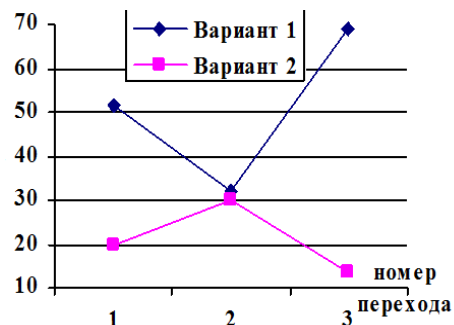


Рис. 5. Машинное время двух вариантов режима глубинного шлифования турбинной лопатки кругом с характеристикой 25A F80 F 16V по переходам

В работе [6] автором производилось экономическое сравнение двух вариантов технологий обработки турбинной лопатки первой ступени двигателя Д-36. В базовом варианте применялся специализированный станок ЛШ-233 совместно с высокоструктурными шлифовальными кругами, в новом варианте – 3E711, который оснащался ПШГ с кругами отечественного производства обычной структуры.

При этом, автор работы [6] отмечает, что сокращение расходов в новом варианте обработки достигается за счёт:

- срок службы вспомогательного режущего инструмента, за счёт использования более рациональных режимов обработки, увеличивается на всю программу выпуска деталей;
- трудоемкость наладок снижается за счёт сокращения частоты их проведения;
- замены дорогостоящей СОЖ Аквол-2 на раствор соды Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>;

Таблица 2

Технико-экономический анализ обработки замковых частей и полок лопаток турбины профильным глубинным шлифованием

Вариант	Номер перехода	Число проходов	Припуск на обработку, мм	Параметры режима шлифования			Технико-экономические показатели						
				V <sub>кр</sub> , м/с	t <sub>общ</sub> , мм	S <sub>пр</sub> , мм/мин	Q <sub>wi</sub>	Q <sub>w</sub>	τ <sub>j</sub> , с	τ, с	δ <sub>D</sub> , мм	n <sub>d</sub> , шт	q <sub>c</sub> , грн/дет
1	1	3	1,200	25	3,500	420	8,40	10,17	51,42	152,62	0,964	142	423,85
	2	2	0,225	20	0,450	450	1,69		32				
	3	5	0,010	20	0,050	520	0,08		69,20				
2	1	1	3,500	20	3,500	360	21,00	23,23	20	63,68	0,272	426	96,78
	2	2	0,225	18	0,450	480	1,80		30				
	3	1	0,050	18	0,050	520	0,43		13,84				

- применения интенсивных режимов обработки приводит к снижению времени операции.

Как отмечает автор [6], экономический эффект от внедрения нового технологического процесса начнёт появляться после выпуска 127 изделий.

Образцы обрабатываемых лопаток представлены на рис. 7.

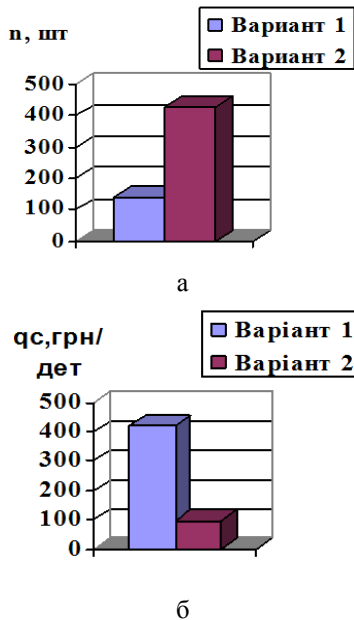


Рис. 6. Количество деталей (а) и стоимость работы шлифовального круга (б) по двум вариантам глубинного шлифования турбинной лопатки



Рис. 7. Образцы обработанных турбинных лопаток ХН53КВМТЮБ

При этом была достигнута шероховатость поверхности замковой части лопатки  $Ra\ 0,8...1,2\ \mu\text{м}$ . Кроме шлифования турбинных лопаток из сплава ХН53КВМТЮБ с применением ПШГ, производилась обработка деталей из материалов 4Х5МФ1С, ВТ6 и ШХ-15. При этом диапазон шероховатостей колебался в диапазоне  $Ra\ 1,2...2,5\ \mu\text{м}$ .

Общий вид технологического оборудования с установленной планетарной шлифовальной головкой представлен на рис. 8.

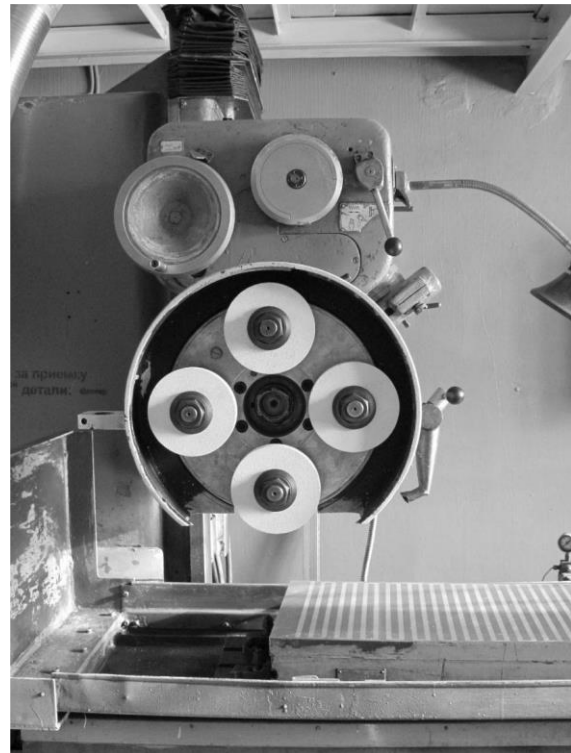


Рис. 8. Общий вид плоскошлифовального станка SPD-30В фирмы «Jotes» (Польша) с установленной на его шпиндель ПШГ

Технологические возможности и универсальность применяемого оборудования, совместно с высокопористым абразивным инструментом, специальной оснасткой - позволяют выполнять как серийные, так и единичные заказы по изготовлению деталей авиационных двигателей (лопаток, валов, зубчатых колес и т.д.) из конструкционных легированных сталей, жаропрочных сплавов и материалов с низкой теплопроводностью различных марок, в том числе после химико-термической обработки.

## Выводы

1. Результаты технико-экономического анализа свидетельствуют о том, что на экспериментальных режимах обработки (вариант 2) с применением ПШГ по сравнению с вариантом 1, производительность шлифования возросла в 2 раза.

2. Сокращение количества проходов на переходах I и III и увеличение относительной подачи “деталь-круг” позволило повысить производительность операции на 30,7%.

3. Использование второго варианта режима глубинного шлифования позволяет сократить ма-

шинное время обработки детали в целом по операции до 1,5...2 раза.

4. Доказана возможность использования ПШГ в сравнении с высокопористым шлифовальным кругом с повышенной структурностью на указанной операции с более производительными режимами по съему материала и с сопутствующей экономией расхода абразива до 3,3 раз.

### Литература

1. Uhlmann, E. *Creep Feed Grinding* [Электронный ресурс] / E. Uhlmann. – Режим доступа: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-35950-7\\_16714-1.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-35950-7_16714-1.pdf). – 23.08.2017 г.

2. Kovač, P. *Grinding Force of Cylindrical and Creep-Feed Grinding Modeling, Abrasive Technology* [Электронный ресурс] / P. Kovač, M. Gostimirović, A. Rudawska – Режим доступа: <https://www.intechopen.com/books/abrasive-technology-characteristics-and-applications/grinding-force-of-cylindrical-and-creep-feed-grinding-modeling.html>. – 24.10.2018 г.

3. Курин, М. А. Дослідження технології планетарного глибинного шліфування плоских поверхонь деталей авіаційних двигунів [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.07.02 . захищена 13.05.11 . утв. 10.11.11 / Курин Максим Александрович. – Х., 2011. – 179 с.

4. Елисеєв, Ю. С. Профильное глубинное шлифование зубчатых колес [Текст] / Ю. С. Елисеєв // Вестник машиностроения. – Москва, 2001. – Вып. 1. С. 41–44.

5. Старков, В. К. Теоретические и технико-экономические предпосылки профильного глубинного шлифования с непрерывной правкой круга [Текст] / В. К. Старков // Вестник машиностроения. – Москва, 2010. Вып. 12. С. 39–43.

6. Горбачев, А. А. Глубинное шлифование турбинных лопаток из труднообрабатываемых материалов с применением планетарно-шлифовальных головок [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.07.02 защищена 14.04.10 . утв. 15.09.10 / Горбачев Алексей Александрович. – Харьков, 2010. – 172 с.

### References

1. Uhlmann, E. *Creep Feed Grinding*. The International Academy for Production Engineering et al. (eds.), CIRP 2017. Available at: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-35950-7\\_16714-1.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-35950-7_16714-1.pdf). (Accessed 23.08.2019).

2. Kovač, P. *Grinding Force of Cylindrical and Creep-Feed Grinding Modeling, Abrasive Technology*. Available at: <https://www.intechopen.com/books/abrasive-technology-characteristics-and-applications/grinding-force-of-cylindrical-and-creep-feed-grinding-modeling.html>. (Accessed 24.10.2018).

3. Kurin, M. O. *Doslidzhennya tehnologiyi planetarnogo gly`by`nnogo shlifuvannya plosky`x poverxon` detalej aviacijny`x dvy`guniv*: dys. ... kand. tex. nauk [Research of the technology of planetary creep feed grinding of flat surfaces of aircraft engine parts. diss. ... cand. tech. sci.]. Kharkov, Nat. aerospace. univ. named after. M. Ye. Zhukovs`kogo «Kharkov avia. inst» Publ., 2011. 179 p.

4. Eliseev, Ju. S. *Profil'noe glubinnoe shlifovanie zubchatykh koles* [Profile creep feed grinding of gears]. *Vestnik mashino-stroenija – Mechanical Engineering Bulletin*, 2001, no. 1, pp 41–44.

5. Starkov, V. K. *Teoreticheskie i tehniko-jekonomicheskie predposylki profil'nogo glubinnogo shlifovaniya s nepreryvnoj pravkoj kruga* [Theoretical and technical-economic prerequisites for deep profiled grinding with continuous circle editing]. *Vestnik mashinostroenija – Mechanical Engineering Bulletin*, 2010, no. 12, pp. 39–43.

6. Gorbachev, A. A. *Glubinnoe shlifovanie turbinnykh lopatok iz trudnoobrabatyvaemykh materialov s primeneniem planetarno-shlifoval'nykh golovok*: dys. ... kand. tekhn. nauk [Creep feed grinding of turbine blades of hard-to-machine materials with the use of planetary grinding heads. diss. ... cand. tech. sci.]. Kharkov, Nat. aerospace. univ. named after. M. Ye. Zhukovs`kogo «Kharkov. avia. inst». Publ., 2010. 172 p.

Поступила в редакцию 9.07.2019, рассмотрена на редколлегии 07.08.2019

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАНЕТАРНИХ ШЛІФОВАЛЬНИХ ГОЛОВОК

М. Ю. Калініченко

Розвиток авіаційної техніки ґрунтується на впровадженні нових прогресивних технологій, застосування нових матеріалів, вдосконаленні технологічного обладнання та інструменту. Удосконалення авіаційних двигунів найчастіше обумовлює більше застосування зносостійких, жароміцних, жаростійких матеріалів на ос-

нові нікелю і титану, що характеризуються низькими коефіцієнтами оброблюваності. Лезова обробка таких сплавів стикається з низкою труднощів: підвищений знос обладнання, збільшений час наладки верстата на операцію, високі сили різання, підвищений знос ріжучого інструменту, збільшення часу обробки і т.д. Все це негативно позначається на продуктивності, збільшення часу виробничого процесу і зниження економічної ефективності. Застосування операції глибинного шліфування замість лезових операцій фрезерування, протягування, стругання і абразивних операцій (шліфування попереднє, шліфування остаточне) дозволяє скоротити час виготовлення деталей зі збереженням її якісних показників і показників точності. Дослідження техніко-економічного аспекту запропонованої технології глибинного шліфування замість операцій попереднього і остаточного шліфування представляє інтерес. У роботі проводиться порівняння двох методів абразивної обробки: традиційне шліфування і глибинне шліфування на плоскошліфувальному верстаті SPD-30B фірми «Jotes» (Польща) зі встановленою на його шпинделі планетарною шліфувальною головкою (ПШГ). Дослідження проводилося при шліфуванні замкової частини турбінних лопаток. Припуск який видався становив 3,8 мм. Обробка за традиційною схемою шліфування проходила за 10 проходів, при цьому час обробки склало близько трьох з половиною хвилин. Обробка за схемою глибинного шліфування із застосуванням ПШГ – за 4 проходу, що за часом зайняло близько хвилини машинного часу. Слід зазначити значне зростання продуктивності на першому переході при знятті припуску в 3,5 мм в режимі глибинного шліфування в порівнянні з традиційним шліфуванням в 2,1 рази. На другому і третьому переходах продуктивність обох методів практично однакова.

**Ключові слова:** глибинне шліфування; планетарна шліфувальна головка; плоске шліфування; лопатки ГТД; продуктивність глибинного шліфування.

## TECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF PLANETARY GRINDING HEADS

*N. Yu. Kalinichenko*

The development of aviation technology is based on the introduction of new progressive technologies, the use of new materials, the improvement of technological equipment and tools. Improving aircraft engines often leads to greater use of wear-resistant, heat-resistant materials based on nickel and titanium, which are characterized by low machinability. Blade processing of such alloys faces many difficulties: increased equipment wear, increased machine setup time for the operation, high cutting forces, increased wear of the cutting tool, increased processing time, etc. All this harms productivity, an increase in production time and a decrease in economic efficiency. The use of the operation of creep feed grinding instead of blade milling operations, pulling, planning and abrasive operations (pre-grinding, final grinding) reduces the time to manufacture parts while maintaining its quality and accuracy. The study of the technical and economic aspect of the proposed technology of creep feed grinding instead of preliminary and final grinding operations is of interest. The paper compares two methods of abrasive machining: traditional grinding and creep feed grinding on the SPD-30B surface grinder from Jotes (Poland) with a planetary grinding head (PGH) installed on its spindle. The study was conducted when grinding the castle part of turbine blades. The removable allowance was 3.8 mm. The processing according to the traditional grinding scheme took place in 10 passes, while the processing time was about three and a half minutes. The processing under the scheme of creep feed grinding with the use of PGH for 4 passes took about a minute of machine time. It should be noted a significant increase in productivity at the first transition when removing an allowance of 3.5 mm in the mode of deep grinding compared to traditional grinding 2.1 times. On the second and third transitions, the performance of both methods is virtually the same.

**Keywords:** creep feed grinding; planetary grinding head; flat grinding; GTE blades; creep feed grinding performance.

**Калиниченко Николай Юрьевич** – старший преподаватель кафедры технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Kalinichenko Nikolai Yurevich** – Senior Lecturer, Department of aircraft engine production technologies, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: kharcraft@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8685-065X, ResearcherID: A-4420-2019