

УДК 621.923.9:62-253.5

*Наталья Гончар, Дмитрий Степанов, Марк Кучугуров***ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ВАРИАНТА ОПЕРАЦИИ
ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ КРОМОК ХВОСТОВИКОВ ЛОПАТОК ГТД***Наталья Гончар, Дмитро Степанов, Марк Кучугуров***ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ВАРІАНТА ОПЕРАЦІЇ ФІНІШНОЇ
ОБРОБКИ КРОМОК ХВОСТОВИКІВ ЛОПАТОК ГТД***Natalia Honchar, Dmitriy Stepanov, Mark Kuchugurov***ECONOMIC SUBSTANTIATION OF CHOOSING OF SHANK OF GTE BLADES
EDGES FINISHING**

Статья посвящена минимизации доли ручного труда при удалении заусенцев и скруглении острых кромок сложнопрофильных тонкостенных деталей газотурбинных двигателей на примере «елочного» хвостовика лопатки турбины ГТД. Предложено три варианта механизированного выполнения этой операции с применением щеточных полимерно-абразивных инструментов и различного сопутствующего оборудования и оснастки, проведен экономический анализ предложенных вариантов и экономическое обоснование выбора наиболее рационального варианта.

Ключевые слова: заусенец, кромка, сложный (криволинейный) профиль, «елочный» хвостовик, полимерно-абразивный инструмент, экономическое обоснование.

Рис.: 3. Табл.: 1. Библ.: 12.

Стаття присвячена мінімізації частки ручної праці у процесі зняття задирок та заокруглення гострих крайок складнопрофільних тонкостінних деталей газотурбінних двигунів на прикладі «ялинкового» хвостовика лопатки турбіни ГТД. Запропоновано три варіанти механізованого виконання цієї операції з застосуванням щіткового полімерно-абразивного інструменту та різного супутнього обладнання й оснащення, проведено економічний аналіз запропонованих варіантів та економічне обґрунтування вибору найбільш раціонального варіанта.

Ключові слова: задирка, крайка, складний (криволінійний) профіль, «ялинковий» хвостовик, полімерно-абразивний інструмент, економічне обґрунтування.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 12.

The article focuses on minimization of manual labor in deburring and in rounding sharp edges operations of complex thin-walled details of gas turbine engines in example of "herringbone" shank turbine blades. Three variants of mechanized implementation of this operations using brush polymer-abrasive tool and additional related equipment are proposed. The economic analysis of proposed variants and economic substantiation of the choice of the most rational one were made.

Key words: burr, edge, complex (curvilinear) profile, «herringbone» shank, polymer-abrasive tool, economic substantiation.

Fig.: 3. Tabl.: 1. Bibl.: 12.

Постановка проблемы. Надежность работы газотурбинных двигателей (ГТД) непосредственно зависит от качества каждой детали, особенно деталей ответственных, несущих разнообразный спектр нагрузок. Поэтому особое внимание уделяется операциям финишного этапа изготовления деталей ГТД, обеспечивающего необходимое качество их поверхностей. Как известно, большинство деталей ГТД являются сложнопрофильными и тонкостенными, что сильно сужает разнообразие финишных методов и затрудняет, а иногда делает невозможным полную или частичную автоматизацию процесса отделочной и слесарной обработки. Например, довольно трудоемким процессом является удаление заусенцев после формообразующих операций протягивания, фрезерования или шлифования на острых кромках сложного профиля, таких как «елочные» хвостовики лопаток турбины, выполняемые преимущественно вручную. Уменьшение доли ручного труда на этих операциях является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализу широко распространенных методов финишной обработки и поиску малоизвестных, новых методов и инструментов для финишного этапа изготовления деталей ГТД, учитывая их сложный профиль, тонкостенность и различные габариты, посвящены работы [1; 2]. Опираясь на многочисленные публикации и исследования, мы обращаем особое внимание на щеточные инструменты на основе полимерно-абразивных волокон, которые представляют серьезную альтернативу существующим методам.

Эти инструменты, несмотря на свою относительную новизну, находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Высокая эффективность

работы полимерно-абразивных инструментов (ПАИ) достигается благодаря твердым и острым граням абразивных зерен, равномерно распределенных в массе очень гибкого и прочного волокна типа полиамид, которое в свою очередь закреплено в ступице, образуя щеточный инструмент вращательного действия.

ПАИ демонстрируют еще одно преимущество, до настоящего времени пока недостаточно полно используемое, позволяющее автоматизировать операции удаления заусенцев кромок сложнопрофильных деталей: отсутствие необходимости в точном совпадении инструмента и обрабатываемых поверхностей. При использовании негибких типов инструментов требуется точное позиционирование. В случае обработки деталей сложной формы необходимо обеспечить множество движений при точной последовательности и позиционировании, что делает автоматизацию процесса технически или экономически неприемлемой. При использовании для удаления заусенцев ПАИ в значительной степени снижаются требования к точности взаимного расположения детали и инструмента, уменьшается сложность движений. Эти факторы снижают стоимость автоматических устройств, их программирования и технического обслуживания для удаления заусенцев.

Если для мелкогабаритных лопаток можно применить виброгалтовку, то доля ручного труда в обработке хвостовиков типа «елка» средне- и крупногабаритных лопаток достаточно велика.

Применение ПАИ значительно упрощает и облегчает процесс удаления заусенцев и скругления острых кромок заданным радиусом скругления.

Выделение не исследованных ранее частей общей проблемы. Недавние исследования и публикации показали возможность обработки кромок сложного профиля дисков ГТД [3; 4], других деталей [5–10]; были определены рациональные режимы обработки ПАИ кромок с заусенцами для труднообрабатываемых лопаточных сплавов [11], разработана методика контроля полученных радиусов скругления [12]. Нерешенной осталась задача непосредственной обработки кромок «елочного» хвостовика лопаток турбины с помощью ПАИ в производственных условиях.

Цель статьи. Цель данной работы – предложить несколько вариантов выполнения с помощью ПАИ операции удаления заусенцев и скругления острых кромок хвостовика с использованием различного оборудования и оснастки, и, учитывая все нюансы производства, посредством экономического обоснования определить рациональный вариант.

Изложение основного материала. В работе рассматривается 4 варианта выполнения данной операции для хвостовиков рабочих лопаток турбины (рис. 1) из сплава ЭИ437-ВД.

I вариант. Обработка вручную на шлифовальной установке по действующей технологии.

II вариант. На установке с поворотным столом (рис. 2) и специальными накладками (установочными элементами), которые позволяют выставить хвостовик лопатки под определенным углом. Работают два ПАИ одновременно, вращаются в противоположных направлениях.

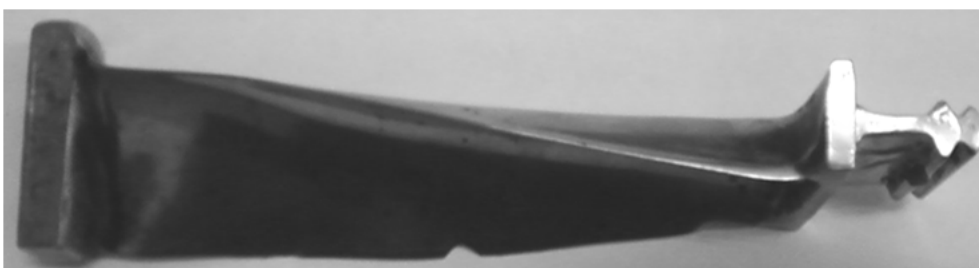


Рис. 1. Среднегабаритная лопатка турбины

III вариант. Та же установка с поворотным столом и двумя ПАИ. Лопатки устанавливаются в специальный монтажный (или «ложный») диск, оставляя свободными кромки, обрабатывается сразу весь набор лопаток.

IV вариант. Кассетное приспособление с накладками (рис. 3), установленное на универсальный плоскошлифовальный станок. ПАИ установлен в шпинделе станка.

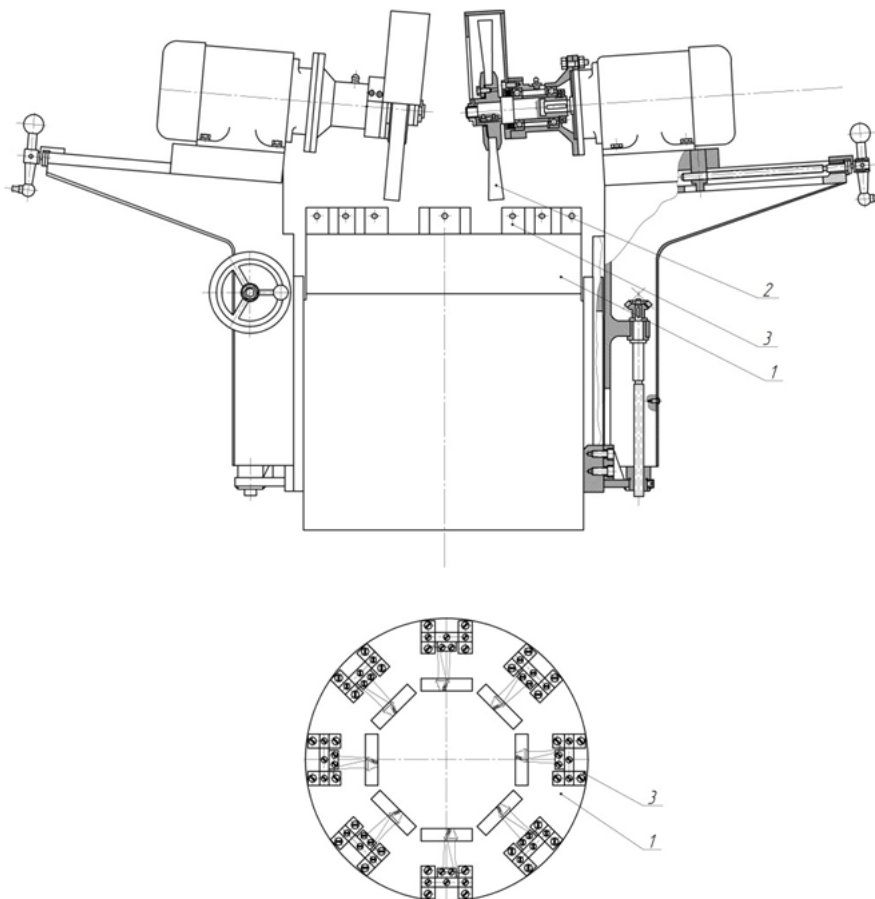
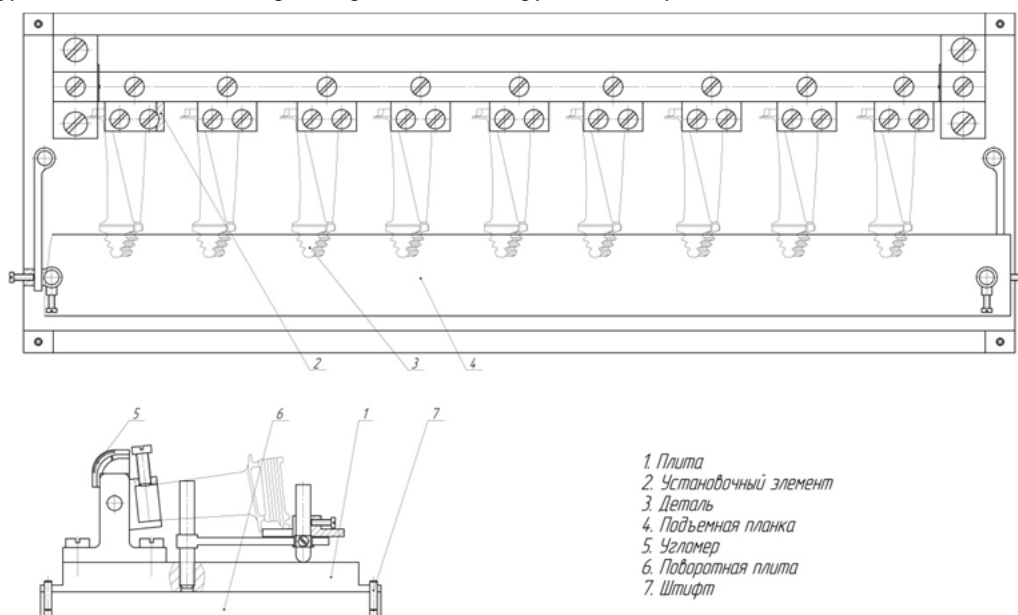


Рис. 2. Схема установки с поворотным столом:

1 – круглый стол; 2 – полимерно-абразивный инструмент; 3 – установочный элемент с лопаткой 1



- 1. Плита
- 2. Установочный элемент
- 3. Деталь
- 4. Подъемная планка
- 5. Узломер
- 6. Поворотная плита
- 7. Штифт

Рис. 3. Схема приспособления для плоскошлифовального станка

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Общие исходные данные:

- набор лопаток данной ступени $N=42$ шт.;
- количество проходов ПАИ $n=5$ дв.х.;
- продольная подача ПАИ $S=1$ м/мин.

Условие оптимальности варианта технологической операции:

$$C = \min(C_1; C_2; C_3; C_4), \quad (1)$$

где $C_1 \dots C_4$ – себестоимости финишной обработки лопатки каждым из вариантов.

Себестоимость изготовления детали рассчитывается по формуле:

$$C_i = 3 + H + A + \text{Э} + И + П + Ж + O, \quad (2)$$

где 3 – заработная плата рабочего, грн;

H – начисления, составляющие 39,5 % от заработной платы, грн;

A – амортизационные отчисления, составляют 20 % от заработной платы, грн;

Э – затраты на электроэнергию, грн;

$И$ – затраты на инструмент, грн;

$П$ – расходы на переточку/правку инструмента, грн;

$Ж$ – расходы на СОТС, грн;

O – стоимость установки в пересчете на одну деталь, грн.

Заработная плата рабочего:

$$3 = C_T \cdot t_{um} / 60, \quad (3)$$

где C_T – часовая ставка работника, грн/ч; для ручной обработки на шлифовальной бабке рабочему 7-го разряда 7,4 грн/ч; для обработки на установке слесарю 3-го разряда – 5,09 грн/ч;

t_{um} – штучное время, мин, рассчитывается по формуле:

$$t_{um} = t_o + t_g + t_{np}, \text{ мин}, \quad (4)$$

где t_o – основное время, затрачиваемое непосредственно на обработку, мин;

t_g – вспомогательное время, затрачиваемое на установку, переустановку и снятие обрабатываемых деталей и вспомогательной оснастки, мин;

t_{np} – прибавочное время, мин, принимается укрупненно 10 % от суммы основного и вспомогательного времени.

Минимальное основное время для ручной обработки одной лопатки 12 мин. Для механизированной операции рассчитывается по формуле:

$$t_o = \frac{\pi \cdot D}{1000 \cdot S} \cdot z \cdot p \cdot n / N, \text{ мин}, \quad (5)$$

где z – количество запусков установки для обработки всего набора деталей, зависит от числа одновременно обрабатываемых изделий; для вариантов обработки 2...4 равно соответственно 6, 1, 5;

p – число обрабатываемых поверхностей, равно 4.

Вспомогательное время t_g в зависимости от варианта обработки рассчитывается по разному. Для варианта 1 принимается равным 3 мин. Для варианта 2 и 4 рассчитывается по формуле (6), для варианта 3 по формуле (7).

$$t_g = t_y + q \cdot t_n + t_c, \text{ мин}, \quad (6)$$

где t_y – время установки детали в наладке, принимается 0,17 мин;

t_n – время перестановки детали в наладке, равно 0,12 мин;

t_c – время снятия детали с наладки, равно 0,17 мин;

$q = 3$ – число переустановок детали в процессе обработки.

$$t_g = ((t_y + t_n + t_c) \cdot N + t_{dy} + t_{dc}) \cdot 2 / N, \text{ мин}, \quad (7)$$

где $t_{dy} = 1 \text{ мин}$ – время установки монтажного диска;

$t_{dc} = 1 \text{ мин}$ – время снятия монтажного диска.

Для варианта 3 время установки, переустановки и снятия детали принимаются 0,05 мин.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E} = P_{\Sigma} \cdot t \cdot \mathcal{E}_{CT}, \quad (8)$$

где \mathcal{E}_{CT} – стоимость электроэнергии на производстве, составляет 0,33 грн/кВт;

P_{Σ} – суммарная мощность применяемого электрооборудования; с учетом количества двигателей установок и расчетной мощности 0,5 кВт на единицу для вариантов обработки 1...4 принимается соответственно 2 кВт, 1,5 кВт, 1,5 кВт, 0,5 кВт.

Стоимость инструмента I , учитываемая в себестоимости детали, определяется его видом и количеством, достаточным для выполнения обработки. Для ручного труда и механизированной обработки данная стоимость рассчитывается по формуле:

$$I = C_{II} \cdot K_d / (N \cdot V), \text{ грн}, \quad (9)$$

где C_{II} – стоимость одного инструмента; стоимость шлифовального круга для ручной обработки равна 250 грн; стоимость одного ПАИ составляет 200 грн;

K_d – число инструментов на набор деталей; для вариантов обработки 1...4 соответственно равно 4, 2, 2, 1;

V – число наборов, обрабатываемых на данном оборудовании в год; для вариантов обработки 1...4 принимается соответственно 100, 200, 200, 50.

Расходы на переточку/правку инструмента Π определяются затратами на восстановление режущих (обрабатывающих) свойств инструмента, для ручной и механизированной обработки определяются по формуле:

$$\Pi = \Pi_p \cdot K_{IP} \cdot K_d, \text{ грн}, \quad (10)$$

где Π_p – стоимость правки инструмента; на производстве стоимость правки шлифовального круга равна 20 грн, стоимость правки ПАИ равна 5 грн;

K_{IP} – число правок на одну деталь; для всех вариантов обработки равно 0,02.

Расходы на СОТС вычисляются для механизированной операции, хотя обработка ПАИ на рациональных режимах не требует обязательного его применения.

$$Ж = C_{Ж} \cdot O_{Ж} / 1000, \text{ грн}, \quad (11)$$

где $C_{Ж}$ – стоимость 1л СОТС, составляет 55 грн/л;

$O_{Ж}$ – объем СОТС, требуемый для обработки одной детали (35 мл).

Стоимость установки в пересчете на одну деталь O зависит от ее конфигурации и рассчитывается по формуле:

$$O = (O_{CT} + O_{CV}) / (N \cdot V), \text{ грн}, \quad (12)$$

где O_{CT} – стоимость стационарной установки, грн;

O_{CV} – стоимость съемных узлов, грн.

При обработке вручную используется специальная шлифовальная установка, стоимость которой принимается равной 3000 грн. Стоимость круглого стола составляет

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

3000 грн. При обработке на круглом столе с использованием монтажных дисков стоимость последних (250 грн за 1 диск) на один набор лопаток, т.к. для каждого набора изготавливаются новые диски с определенной геометрией. При обработке на плоскошлифовальном станке стоимость приспособления составляет 250 грн.

Полученные результаты сведены в табл.

Таблица

К расчету экономической эффективности варианта операции

Параметр	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар.4
Исходные данные:				
Набор лопаток N, шт	42			
Диаметр обработки на вращающемся столе D, мм	600			
Величина продольной подачи S, м/мин	1			
Количество дв. ходов или оборотов стола	5			
Вспомогательные величины				
Ставка рабочего 7-го / слесаря 5-го разряда Ст, грн/ч	7,40	5,09	5,09	5,09
Число обрабатываемых лопаток за одну установку	-	8	42	9
Обрабатываемых поверхностей, p	4	4	4	4
Количество проходов (фактических), n	-	5	5	5
Число запусков установки для обработки всего набора, z	-	6	1	5
Основное время обработки t_o , мин	12,00	5,39	0,90	4,49
Время установки одной лопатки t_y , мин	-	0,17	0,05	0,17
Время переустановки одной лопатки t_n , мин	-	0,12	0,05	0,12
Время снятия одной лопатки t_c , мин	-	0,17	0,05	0,17
Время установки монтажного диска $t_{дв}$, мин	-	-	1,00	-
Время снятия монтажного диска t_c , мин	-	-	1,00	-
Вспомогательное время t_b , мин	3,00	0,68	0,40	0,68
Прибавочное время $t_{пр}$, мин	1,50	0,61	0,13	0,52
Штучное время $t_{шт}$, мин	16,50	6,68	1,42	5,69
Процент амортизации A, %	20	20	20	20
Суммарная мощность электродвигателей P_{Σ} , кВт	2	1,5	1,5	0,5
Стоимость электроэнергии $\mathcal{E}_{ст}$, грн/кВт	0,33	0,33	0,33	0,33
Стоимость шлифовального круга для ручной обработки $\mathcal{C}_{и}$, грн	250	-	-	-
Стоимость одного ПАИ $\mathcal{C}_{и}$, грн	-	200	200	200
Количество инструментов в обработке $K_{д}$, шт.	4	2	2	1
Стоимость правки шлифовального круга P_p , грн	20	-	-	-
Стоимость правки ПАИ P_p , грн	-	5	5	5
Число правок инструмента на одну деталь $K_{пр}$, шт.	0,02	0,02	0,02	0,02
Стоимость 1 л СОТС $\mathcal{C}_{ж}$, грн/л	-	55	55	55
Количество СОТС на 1 деталь $O_{ж}$, мл	-	35	35	35
Стоимость установки $O_{ст}$, грн	3000	3000	3000	250
Стоимость съемных узлов $O_{св}$, грн			500	
Стоимость монтажного диска, грн	-	-	250	-
Количество монтажных дисков для установки, шт.	-	-	2	-
Число наборов, обрабатываемых установкой V, шт.	100	200	200	50
Нормы расходов (на 1 деталь)				
1. Заработная плата З, грн	2,04	0,57	0,12	0,48
2. Начисления на ЗП (39,5%) Н, грн	0,80	0,22	0,05	0,19
3. Амортизация А, грн	0,41	0,11	0,02	0,10
4. Затраты на электроэнергию Э, грн	7,92	2,67	0,44	0,74
5. Стоимость инструмента И, грн	0,24	0,05	0,05	0,10
6. Расходы на переточку/правку П, грн	1,60	0,20	0,20	0,10
7. Использование СОТС Ж, грн	-	1,93	1,93	1,93
8. Стоимость установки на 1 деталь О, грн	0,71	0,36	12,26	0,12
Общая норма расходов на 1 лопатку С, грн	13,72	6,10	15,07	3,75
Общая норма расходов на набор лопаток \mathcal{C}_n , грн	576,16	256,15	632,99	157,48

Приближенный расчет экономической эффективности применения различных вариантов выполнения данной финишной операции, в пересчете на 1 лопатку, показал следующее. Применяя механизированную установку и приспособление (варианты 2 и 4), время обработки можно сократить в 2...3 раза по сравнению с ручной операцией, а в случае применения монтажных дисков (вариант 3) – более чем в 10 раз.

Себестоимость механизированной операции по 2-му варианту в 2 раза меньше выполняемой вручную, а по 4-му варианту – почти в 4 раза. В 3-м варианте стоимость изготовления монтажных дисков превышает эффект от сокращения продолжительности операции.

Вариант 4 с кассетным приспособлением для плоскошлифовального станка можно принять наиболее выгодным.

Так как конструкция предлагаемых наладок универсальна, их можно применять для различных лопаток турбин и обеспечить полную загрузку оборудования.

Выводы. В результате проведенных исследований обработки полимерно-абразивным инструментом острых кромок хвостовиков лопаток из жаропрочного сплава ЭИ437Б-ВД можно сделать следующие выводы:

- применение ПАИ дает возможность механизировать и автоматизировать операции по удалению заусенцев и острых кромок сложных пространственных форм;
- предложенные конструкции установок и приспособлений (варианты 2-4) позволят практически избавиться от ручного труда при обработке кромок «елочных» хвостовиков лопаток, сократить продолжительность операции в 2...10 раз с определенной экономической эффективностью.

Список используемых источников

1. Степанов Д. Н. Финишная обработка тонкостенных и сложнопрофильных деталей. Сообщение 1. Анализ финишно-отделочных методов / Д. Н. Степанов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 2. – С. 122–125.
2. Степанов Д. Н. Финишная обработка тонкостенных и сложнопрофильных деталей. Сообщение 2. Щеточные инструменты на основе полимерно-абразивных волокон / Д. Н. Степанов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 2. – С. 126–132.
3. Применение полимерно-абразивных инструментов для обработки острых кромок пазов типа «ласточкин хвост» / Ю. М. Внуков, Н. В. Гончар, Э. В. Кондратюк, Д. М. Степанов // Резание и инструмент в технологических системах. – 2011. – № 79. – С. 14–24.
4. Патент 79066 (РФ). Установка для скругления острых кромок пазов дисков турбины газотурбинного двигателя / Заколоткин В. В., Виноградов А. В. ; патентообладатель открытое акционерное общество «Пермский моторный завод». – № 2008126653/22 ; заявл. 30.06.2008 ; опубл. 20.12.2008.
5. Проволоцкий А. Е. Технологические возможности полимер-абразивного инструмента / А. Е. Проволоцкий, С. Л. Негруб // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: машинобудування. – 2004. – № 71, вип. 1. – С. 125–133.
6. Применение полимерно-абразивных инструментов для слесарной обработки торцевых поверхностей зубьев конических зубчатых колес / Д. Н. Степанов, М. В. Кучугуров, Е. А. Гончар, Е. С. Дядя // Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок» (23–28 сентября 2013 г., Алушта). – Запорожье : АО Мотор Сич, 2013. – С. 92–94.
7. Трошин Ф. В. Некоторые особенности применения щеток из полимерно-абразивного ворса / Ф. В. Трошин // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 8. – С. 35.
8. Яковлев Д. Р. Теоретическое и экспериментальное исследование технологических возможностей абразивно-полимерных щеток с определением эффективных областей их использования / Д. Р. Яковлев // Материалы международной научно-технической конференции «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров» (17 ноября 2010, Москва). – М. : МГТУ, 2010. – С. 293–299.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

9. Устинович Д. Ф. Моделирование тепловых процессов при обработке тел вращения полимерно-абразивными щетками / Д. Ф. Устинович, В. М. Голуб // Вестник национальной академии наук Беларуси. – 2011. – № 2. – С. 62–68.

10. Степанов Д. М. Комплексна фінішна обробка аеродинамічних поверхонь лопаток полімерно-абразивними інструментами / Д. М. Степанов // Тези доповідей XV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (4-7 листопада 2015р., Житомир). – Житомир : ЖДТУ, 2015. – С. 76–78.

11. Гончар Н. В. Формирование радиуса скругления острых кромок сложных пространственных форм при помощи полимерно-абразивного инструмента / Н. В. Гончар, Э. В. Кондратиук, Д. Н. Степанов // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2014. – № 2 (41). – С. 178–183.

12. Методика контролю качества выполнения радиусов скругления кромок / Д. Н. Степанов, Н. В. Гончар, В. О. Щекин, М. В. Зинченко // Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок» (23-28 сентября 2013 г., Алушта). – Запорожье : АО Мотор Сич, 2013. – С. 95–96.

References

1. Stepanov, D.N. (2015). Finishnaia obrabotka tonkostennykh i slozhnoprofilnykh detalei. Soobshchenie 1. Analiz finishno-otdelochnykh metodov [Finishing of thin-walled and complex profile parts. Report 1. Analysis of the finishing techniques]. *Novi materialy tekhnologii v metalurgii ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and engineering*, no. 4, pp. 122–125 (in Russian).

2. Stepanov, D.N. (2015). Finishnaia obrabotka tonkostennykh i slozhnoprofilnykh detalei. Soobshchenie 2. Shchetochnye instrumenty na osnove polimerno-abrazivnykh volokon [Finishing of thin-walled and complex profile parts. Report 2. Brush tools based on polymer-abrasive fibers]. *Novi materialy tekhnologii v metalurgii ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and engineering*, no. 2, pp. 126–132 (in Russian).

3. Vnukov, Iu.N., Gonchar, N.V., Kondratiuk, E.V., Stepanov, D.M. (2011). Primenenie polimerno-abrazivnykh instrumentov dlia obrabotki ostrykh kromok pazov tipa “lastochkin khvost” [The using of polymer-abrasive tools for processing sharp edges of “dovetail” grooves] *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and tool in technological systems*, no. 79, pp. 14–24 (in Russian).

4. Zakolodkin, V.V., Vinogradov, A.V. (2008). Ustanovka dlia skrugleniia ostrykh kromok pazov diskov turbiny gazoturbinnogo dvigatelja [Equipment for rounding sharp edges of the grooves of turbine disks of gas turbine engine]. Patent RF No. 79066.

5. Provolotkii, A.E., Negrub, S.L. (2004). Tekhnologicheskie vozmozhnosti polimer-abrazivnogo instrumenta [Technological possibilities of polymer-abrasive tool] *Naukovi pratsi Donetckoho nacionalnoho tekhnichnoho universytetu, Seriiia mashynoobladdnannia*, vol. 1, no. 71, pp. 125–133 (in Russian).

6. Stepanov, D.N., Kuchugurov, M.V., Gonchar, E.A., Diadia, E.S. (2013). Primenenie polimerno-abrazivnykh instrumentov dlia slesarnoi obrabotki tortcevykh poverkhnostei zubev konicheskikh zubchatykh koles [The using of polymer-abrasive tools for metalwork machining of end surfaces of the bevel gear teeth] *Proceedings from X Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia “Progresivnye tekhnologii zhiznenogo tsikla aviatcionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok” – 10 th International scientific and technical conference “Progressive technologies of aircraft engines lifecycle and energetic systems” (Ukraine, Alushta, September 23-28, 2013)*. Zaporizhzhya: MOTOR SICH JSC, pp. 92–94 (in Russian).

7. Troshin, F.V. (2008). Nekotorye osobennosti primeneniia shchetok iz polimerno-abrazivnogo vorsa [Some features of the using of the brushes from the polymer-abrasive fibers]. *Avtomobilnaia promyshlennost – Automotive industry*, no. 8, p. 35 (in Russian).

8. Iakovlev, D.R. (2010). Teoreticheskoe i eksperimentalnoe issledovanie tekhnologicheskikh vozmozhnostei abrazivno-polimernykh shchetok s opredeleniem effektivnykh oblastei ikh ispolzovaniia [Theoretical and experimental research of technological possibilities of the abrasive-polymer brushes to determine the effectiveness of their using]. *Proceedings from Mezhdunarodnaia*

nauchno-tehnicheskaiia konferentciia "Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: priority razvitiia i podgotovka kadrov" – International scientific and technical conference "Automotive and tractor construction in Russia: priorities of development and training" (Russia, Moscow, November 17, 2010). Moscow: MGTU, pp. 293–299 (in Russian).

9. Ustinovich, D.F., Golub, V.M. (2011). Modelirovanie teplovykh protsessov pri obrabotke tel vrashcheniia polimerno-abrazivnymi shchetkami [Simulation of thermal processes in the processing of rotating bodies with polymer-abrasive brushes]. *Vestnik natsionalnoi akademii nauk Belarusi – Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus*, no. 2, pp. 62–68 (in Russian).

10. Stepanov, D.M. (2015). Kompleksna finishna obrobka aerodinamichnikh poverkhon lopatok polimerno-abrazivnymi instrumentami [Complex finishing of the blades aerodynamic surfaces with polymer-abrasive tools] Proceedings from *XV Vseukrainska molodizhna naukovo-tehnichna konferentciia. Mashinobuduvannia Ukrainy ochyma molodykh: progresyvni idei – nauka – vyrobnytstvo – 15 th Ukrainian Youth Scientific and Technical Conference. Ukraine engineering through the youth vision: progressive ideas – science – production* (Ukraine, Zhitomir, November 4–7, 2015). Zhitomir: ZhDTU, pp. 76–78 (in Ukrainian).

11. Gonchar, N.V., Kondratiuk, E.V., Stepanov, D.N. (2014). Formirovanie radiusa skrugleniia ostrykh kromok slozhnykh prostranstvennykh form pri pomoshchi polimerno-abrazivnogo instrumenta [Formation of the rounding radius of sharp complex-profile edges with polymer-abrasive tool]. *Zbirnik naukovekh prats: haluzeve mashinobuduvannia i budivnytstvo – Collection of scientific papers: Branch engineering, construction*, no. 2 (41), pp.178–183 (in Russian).

12. Stepanov, D.N., Gonchar, N.V., Shchekin, V.O., Zinchenko, M.V. (2013). Metodika kontroliia kachestva vypolneniia radiusov skrugleniia kromok [Quality control methods of the rounding radii of the edges]. Proceedings from *X Mezhdunarodnaia nauchno-tehnicheskaiia konferentciia "Progresivnye tekhnologii zhiznenogo tsikla aviatcionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok" – 10 th International scientific and technical conference "Progressive technologies of aircraft engines lifecycle and energetic systems"* (Ukraine, Alushta, September 23–28, 2013). Zaporizhzhya: MOTOR SICH JSC, pp. 95–96.

Гончар Наталья Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры технология машиностроения, Запорожский национальный технический университет (ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина).

Гончар Наталя Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування, Запорізький національний технічний університет (вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна)

Honchar Natalia – PhD in Technical Sciences, Assistant Professor of Machine Building Technology Department, Zaporizhzhya National Technical University (64 Zhukovskogo Str., 69063 Zaporizhzhya, Ukraine).

E-mail: gonchar@zntu.edu.ua

Степанов Дмитрий Николаевич – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Запорожский национальный технический университет (ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина).

Степанов Дмитро Миколайович – старший викладач кафедри технології машинобудування, Запорізький національний технічний університет (вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна).

Stepanov Dmitriy – Senior Lecturer of Machine Building Technology Department, Zaporizhzhya National Technical University (64 Zhukovskogo Str., 69063 Zaporizhzhya, Ukraine).

E-mail: stepanovzntu@yandex.ua

Кучугуров Марк Валерьевич – аспирант кафедры технологии машиностроения, Запорожский национальный технический университет (ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина).

Кучугуров Марк Валерійович – аспірант кафедри технології машинобудування, Запорізький національний технічний університет (вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна)

Kuchugurov Mark – PhD student of Machine Building Technology Department, Zaporizhzhya National Technical University (64 Zhukovskogo Str., 69063 Zaporizhzhya, Ukraine).

E-mail: markxfx@mail.ru