

УДК 621.452.3

**Канд. техн. наук Э. В. Кондратюк<sup>1</sup>, канд. техн. наук Г. В. Пухальская<sup>2</sup>,  
В. Г. Жарик<sup>1</sup>, Т. А. Панченко<sup>2</sup>, С. В. Критчин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс»,

<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет;  
г. Запорожье

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВСФ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОЛЕС ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ**

*Исследовано влияние режимов резания на параметры качества поверхностного слоя при высокоскоростном фрезеровании центробежных колес из титановых сплавов, предложен оптимальный режим для чистового фрезерования. В результате сравнения двух методов черновой обработки центробежных колес показана экономическая эффективность использования плунжерного фрезерования.*

**Ключевые слова:** центробежное колесо, высокоскоростное фрезерование, плунжерное фрезерование, качество поверхностного слоя.

### **Введение**

В настоящее время на производстве стоит задача не только обеспечить требуемую точность размеров детали и заданных параметров качества поверхностного слоя, но и повысить производительность процесса резания. Существует два способа управления качеством: управление режимами резания в процессе механической обработки и обеспечение требуемых параметров последующим воздействием на деталь [1]. Первый способ позволяет избавиться от финишных операций и является наиболее эффективным. Режим высокоскоростного фрезерования (ВСФ), при котором обеспечиваются необходимые параметры качества обработки, стойкость инструмента, наибольшая производительность, является оптимальным. При этом должна обеспечиваться достаточная жесткость системы СПИД и максимальная эффективность использования мощности станка путем увеличения режимов резания, близких к предельным, либо путем применения высокопроизводительных способов фрезерования.

Лопатки центробежного колеса (ЦБК) являются тонкостенными деталями с узким межлопаточным пространством, фрезы имеют большой вылет при малом диаметре и работают при высоких частотах вращения.

На данный момент отсутствуют объективные рекомендации по выбору режимов резания для концевое фрезерование ЦБК из титановых сплавов и обеспечиваемое при этом качество поверхностного слоя. А вопрос о применении плунжерного фрезерования для черновой обработ-

ки ЦБК недостаточно изучен, что делает эти проблемы весьма актуальными.

**Цель работы:** повышение параметров качества поверхностного слоя ЦБК из титанового сплава при высокоскоростном фрезеровании за счет оптимизации режимов резания и применения продуктивного способа фрезерования.

**Объект исследования:** центробежное колесо компрессора двигателя АИ-450 из титанового сплава BT25-У.

**Предмет исследования:** режимы высокоскоростного фрезерования, характеристики поверхностного слоя лопаток моноколеса после финишного ВСФ, методы чернового фрезерования ЦБК.

### **Методика исследований**

Главным критерием оценки качества высокоскоростной обработки ЦБК является точность геометрии детали и характеристики качества поверхностного слоя. С учетом рационального использования дорогостоящих моноколес, представлена следующая последовательность выполнения экспериментов: исследование влияния режимов высокоскоростной обработки на формирование шероховатости поверхности, на степень наклепа поверхностного слоя, на формирование остаточного напряженного состояния, определение рационального режима ВСФ и его опытная проверка.

В качестве основного объекта исследования был взят сектор ЦБК из титанового сплава BT3-1 с 10 лопатками (5 больших и 5 маленьких), который изготавливался согласно технологическому процессу изготовления ЦБК (рис. 1).

Такой подход, за счет сохранения геометрии лопатки и ступицы, позволяет устанавливать адекватные закономерности механической обработки и является экономически целесообразным.

Параметры качества поверхности лопаток и ступицы моноколеса контролировали после чистового высокоскоростного фрезерования. Для определения влияния режимов резания на характеристики качества поверхностного слоя лопатки, образцы обрабатывались по различным технологическим схемам (табл. 1).

После обработки сектора моноколеса вырезали образцы для исследования качества поверхностного слоя (рис. 2). Вырезку образцов из лопаток производили электроэрозионным способом.

Высокоскоростная обработка сектора ЦБК производилась на универсальном обрабатывающем центре Starrag ZS-500/130 фирмы Starrag Neckert.

При черновом фрезеровании межлопаточного пространства моноколеса использовались кони-

ческие фрезы диаметром  $D = 5$  мм и  $D = 4$  мм. Режимы резания составили: минутная подача  $S = 250$  мм/мин ( $S_z = 0,016$  мм/об), частота вращения шпинделя  $n = 4000$  об/мин ( $V = 50,2...62,8$  м/мин). Финишное фрезерование выполнялось конической фрезой со сферическим зубом  $D = 3,2$  мм по режимам резания, представленным в табл. 1.

Основными критериями выбора данных режимов являлись: обеспечение необходимых характеристик качества поверхностного слоя, исследование динамических характеристик шпиндельного узла и максимальное использование мощности станка, рассмотренные в работе [2].

Геометрическое состояние качества поверхностного слоя оценивали по шероховатости поверхности при помощи электронного профилометра Mahr Perthometer M3 контактным методом. Шероховатость измеряли по перу лопаток в верхней и нижней частях в продольном и поперечном направлениях. База измерения 5,6 мм. Величины  $Ra$ ,  $Rz$  получены автоматически.

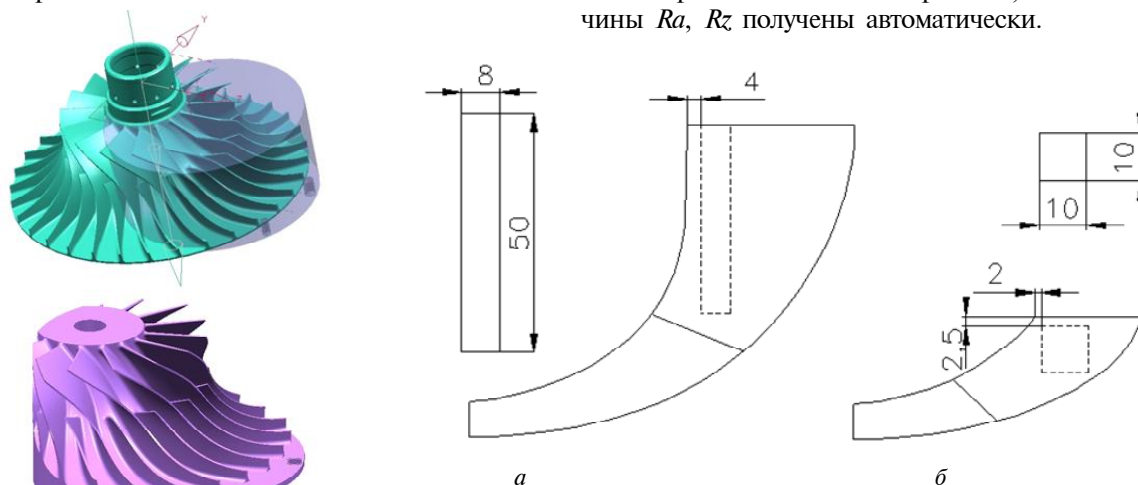


Рис. 2. Схема вырезки образцов из лопаток сектора ЦБК для исследования качества поверхностного слоя: а – образцы для исследования остаточных напряжений первого рода, б – образцы для исследования микротвердости

Таблица 1 – Технологические схемы обработки и режимы резания для чистового фрезерования сектора ЦБК

| № лопатки                  | Технология обработки                                  | Режимы чистового фрезерования  |                               |
|----------------------------|---|--------------------------------|-------------------------------|
|                            |   | $n$ , об/мин<br>( $V$ , м/мин) | $S$ , мм/мин ( $S_z$ , мм/об) |
| Большие лопатки            |   |                                |                               |
| 1                          | Черновое фрез.+п/чистовое фрезер.+ТО(отжиг)           | –                              | –                             |
| 2                          | Черн. фрез.+ п/чист. фрезер. + ТО(отжиг)+чист. фрез.  | 8000 (80,4)                    | 1000 (0,031)                  |
| 3                          | Черн. фрез.+ п/чист. фрезер. + ТО(отжиг)+чист. фрез.  | 8000 (80,4)                    | 1400 (0,043)                  |
| 4                          | Черн. фрез.+ ТО(отжиг)+п/чист. фрезер. + чист. фрез.  | 9500 (95,5)                    | 1000 (0,026)                  |
| 5                          | Черн. фрез. + ТО(отжиг)+п/чист. фрезер. + чист. фрез. | 9500 (95,5)                    | 1400 (0,037)                  |
| Маленькие лопатки          |   |                                |                               |
| 1'                         | Черновое фрез.+п/чистовое фрезер.+ТО(отжиг)           | –                              | –                             |
| 2'                         | Черн. фрез.+ п/чист. фрез. + ТО(отжиг)+чист. фрез.    | 8000 (80,4)                    | 1000 (0,031)                  |
| 3'                         | Черн. фрез.+ п/чист. фрез. + ТО(отжиг)+чист. фрез.    | 8000 (80,4)                    | 1400 (0,043)                  |
| 4'                         | Черн. фрез.+ п/чист. фрез. + ТО(отжиг)+чист. фрез.    | 9500 (95,5)                    | 1000 (0,026)                  |
| 5'                         | Черн. фрез.+ п/чист. фрез. + ТО(отжиг)+чист. фрез.    | 9500 (95,5)                    | 1400 (0,037)                  |
| Межлопаточное пространство |   |                                |                               |
|                            | Черн. фрез. + ТО(отжиг)+п/чист. фрез. + чист. фрез.   | 1000 (10)                      | 120 (0,03)                    |

Измерение микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием индентора под нагрузкой  $P = 1\text{Н}$  по 10 отпечаткам, имеющим правильную форму. В качестве индентора применена алмазная пирамида с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями  $136^\circ$  [3]. Степень поверхностного наклепа пера лопаток после механической обработки оценивали по изменению микротвердости поверхностного слоя до и после обработки.

Исследование остаточных напряжений на пера лопаток производили механическим методом, разработанным акад. Н. Н. Давиденковым с использованием формул из работы [4] для построения эпюр и прибора ПИОН-2.

**Результаты исследования влияния режимов резания ВСФ на формирование характеристик поверхностного слоя ЦБК**

**1. Оценка шероховатости поверхности**

Шероховатость поверхностей в значительной степени определяет основные эксплуатационные свойства деталей. Поэтому характеристики шероховатости поверхности строго нормируются и подвергаются постоянному анализу в технологических исследованиях и контролю в процессе производства.

Результаты измерений шероховатости лопаток после обработки на различных режимах чистового фрезерования (табл. 2) показали, что шероховатость поверхностей лопаток после чистового фрезерования оказалась лучше у четвертой лопатки, обработанной при режимах резания:  $n = 9500$  об/мин,  $S = 1000$  мм/мин (рис. 3) и составила  $Ra^{prod} = 0,36$  мкм ( $Rz^{prod} = 2,33$  мкм),  $Ra^{non} = 0,37$  мкм ( $Rz^{non} = 2,3$  мкм), более низкое качество поверхностного слоя наблюдается на второй лопатке ( $n = 8000$  об/мин,  $S = 1000$  мм/мин), самая высокая шероховатость на третьей и пятой лопатках. Увеличение подачи приводит к ухудшению шероховатости как в продольном, так и в поперечном направлениях. Также наблюдается увеличение шероховатости поверхности от входной к выходной кромке. Увеличение чисел оборотов благоприятно сказывается на уменьшении параметров шероховатости.

На основании полученных данных построены усредненные графики зависимостей (рис. 4), которые демонстрируют тенденцию изменения шероховатости поверхности от режимов резания.

Из рис. 4 видно, что с увеличением подачи фрезы качество поверхностного слоя ухудшается, а при увеличении частоты вращения шпинделя, при подаче  $S = 1000$  мм/мин, микропрофиль поверхности улучшается, при  $S = 1400$  мм/мин – практически не изменяется.

**Таблица 2 – Результаты измерения шероховатости лопаток по спинке в продольном и поперечном направлении**

| Лопатка №                            | Обработка           | Режимы резания при чистовом фрезеровании |           | Верхняя часть лопатки |      |      |              |      |      | Нижняя часть лопатки |      |      |              |      |      | Среднее значение вдоль лопатки |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|---------------------|--|-----------|-----------------------|------|------|--------------|------|------|----------------------|------|------|--------------|------|------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
|                                      |                     | n, об/мин                                | S, мм/мин | Среднее значение      |      |      | Номер замера |      |      | Среднее значение     |      |      | Номер замера |      |      | Ra                             | Rz   |      |      |      |      |
|                                      |                     |  |           | 1                     | 2    | 3    | 1            | 2    | 3    | 1                    | 2    | 3    |              |      |      |                                |      |      |      |      |      |
|                                      |                     | Ra                                       | Rz        | Ra                    | Rz   | Ra   | Rz           | Ra   | Rz   | Ra                   | Rz   | Ra   | Rz           | Ra   | Rz   | Ra                             | Rz   |      |      |      |      |
| <b>Продольная шероховатость, мкм</b> |                     |  |           |                       |      |      |              |      |      |                      |      |      |              |      |      |                                |      |      |      |      |      |
| 1'                                   | Черн+л/чист+ГО      | –  | –         | 0,61                  | 2,89 | 1,11 | 4,97         | 1,76 | 7,53 | 1,16                 | 7,70 | 1,02 | 5,6          | 1,19 | 5,93 | 1,08                           | 4,77 | 1,10 | 5,43 | 1,13 | 6,57 |
| 2'                                   | Черн+л/чист+ГО+чист | 8000                                     | 1000      | 0,66                  | 3,8  | 0,47 | 2,2          | 0,59 | 2,75 | 0,57                 | 4,38 | 0,99 | 5,05         | 0,62 | 2,99 | 0,8                            | 4,11 | 0,80 | 4,05 | 0,69 | 4,22 |
| 3'                                   | Черн+л/чист+ГО+чист | 8000                                     | 1400      | 0,58                  | 2,51 | 1,08 | 4,81         | 0,77 | 3,64 | 0,81                 | 5,48 | 0,79 | 5,03         | 0,9  | 5,06 | 0,6                            | 2,81 | 0,76 | 4,30 | 0,79 | 4,89 |
| 4'                                   | Черн+л/чист+ГО+чист | 9500                                     | 1000      | 0,48                  | 2,49 | 0,15 | 0,79         | 0,19 | 1,02 | 0,27                 | 2,15 | 0,45 | 2,59         | 0,44 | 2,55 | 0,44                           | 2,39 | 0,44 | 2,51 | 0,36 | 2,33 |
| 5'                                   | Черн+л/чист+ГО+чист | 9500                                     | 1400      | 0,95                  | 3,92 | 0,55 | 2,35         | 0,91 | 3,67 | 0,80                 | 4,97 | 1,00 | 5,64         | 1,04 | 5,01 | 0,93                           | 4,6  | 0,99 | 5,08 | 0,90 | 5,03 |
| <b>Поперечная шероховатость, мкм</b> |                     |  |           |                       |      |      |              |      |      |                      |      |      |              |      |      |                                |      |      |      |      |      |
| 1'                                   | Черн+л/чист+ГО      | –  | –         | 1,46                  | 9,26 | 0,94 | 4,67         | 2,41 | 11,1 | 1,60                 | 8,34 | 1,66 | 7,92         | 1,69 | 9,05 | 1,74                           | 9,2  | 1,70 | 8,72 | 1,65 | 8,53 |
| 2'                                   | Черн+л/чист+ГО+чист | 8000                                     | 1000      | 0,43                  | 2,03 | 0,27 | 1,31         | 0,27 | 1,73 | 0,32                 | 1,69 | 0,71 | 3,85         | 0,85 | 4,63 | 0,8                            | 4,13 | 0,79 | 4,20 | 0,56 | 2,95 |
| 3'                                   | Черн+л/чист+ГО+чист | 8000                                     | 1400      | 0,45                  | 3,27 | 0,79 | 5,58         | 0,7  | 5,15 | 0,65                 | 4,67 | 0,8  | 3,98         | 1,3  | 7,74 | 1,26                           | 7,64 | 1,12 | 6,45 | 0,89 | 5,56 |
| 4'                                   | Черн+л/чист+ГО+чист | 9500                                     | 1000      | 0,4                   | 2,39 | 0,26 | 1,42         | 0,19 | 1,16 | 0,28                 | 1,66 | 0,43 | 3,03         | 0,5  | 3,04 | 0,42                           | 2,71 | 0,45 | 2,93 | 0,37 | 2,30 |
| 5'                                   | Черн+л/чист+ГО+чист | 9500                                     | 1400      | 0,64                  | 3,01 | 0,75 | 3,46         | 0,8  | 4,13 | 0,73                 | 3,53 | 1,01 | 5,08         | 1,11 | 6,16 | 1,23                           | 5,96 | 1,12 | 5,73 | 0,93 | 4,63 |

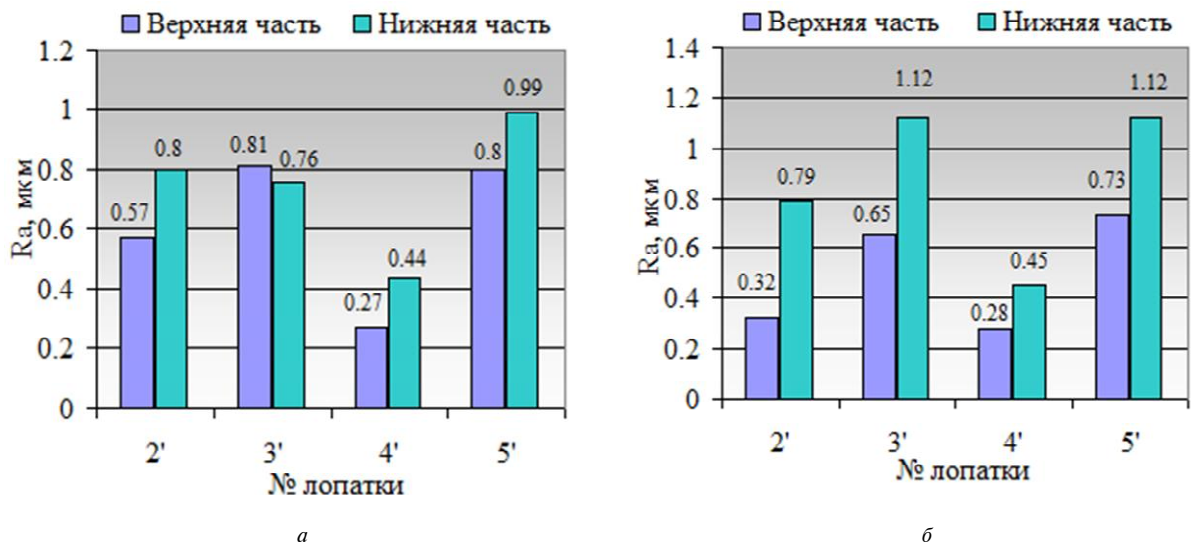


Рис. 3. Исследование шероховатости поверхностного слоя вдоль пера лопаток в продольном (а) и поперечном (б) направлениях

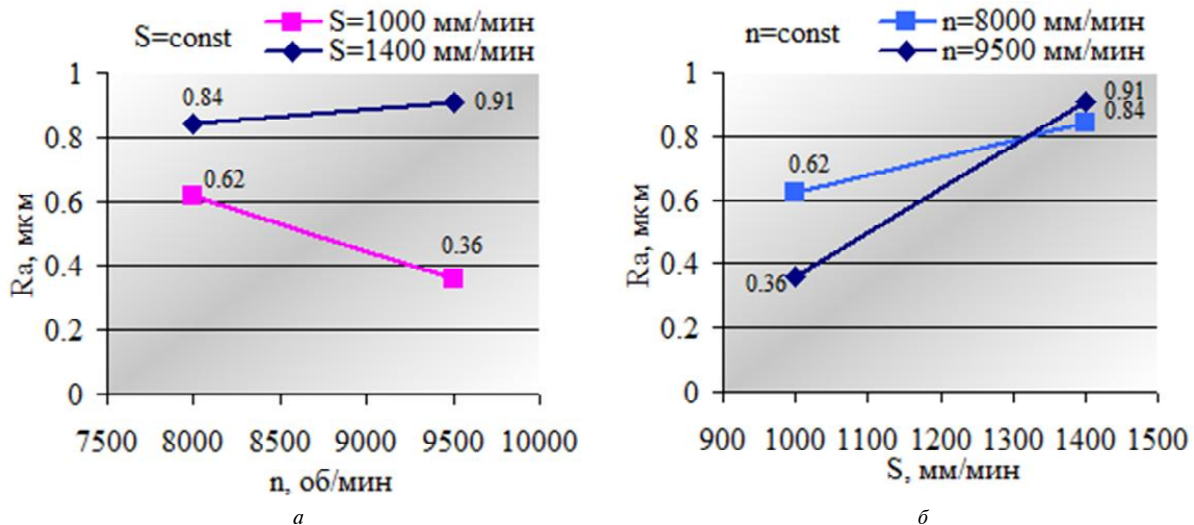


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхностного слоя лопаток от режимов резания: а – от частоты вращения шпинделя, б – от подачи резания

## 2. Определения микротвердости и степени наклепа поверхностного слоя лопаток ЦБК

Одним из основных критериев воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали является изменение микротвердости поверхности по сравнению с исходной. Микротвердость поверхностного слоя зависит не только от силового, но и от тепловых факторов, действующих в зоне обработки [5].

При исследовании наклепа определяли микротвердость поверхности малых лопаток (табл. 3).

На рис. 5 видно, что максимальное значение степени наклепа наблюдается на четвертом образце и составляет 30 %, на втором и пятом образце они практически равны, а третий образец имеет минимальное значение микротвердости.

На основании полученных данных постро-

ены графики зависимостей микротвердости лопаток от режимов резания (рис. 6). Степень наклепа поверхностного слоя лопаток уменьшается с увеличением подачи и уменьшением частоты вращения шпинделя.

## 3. Формирование остаточных напряжений в лопатках ЦБК

Исследование остаточного напряженного состояния выполняли на образцах, вырезанных из лопаток ЦБК, обработанных по различным технологиям, что дает возможность оценить влияние режимов резания на качество поверхностного слоя; исследовать остаточные напряжения, которые формируются после чистового фрезерования, а также изучить влияние наследственности на формирование окончательного напряженного состояния поверхностного слоя после получистового фрезерования.

Таблица 3 – Результаты определения микротвердости на спинке лопаток

| № лопатки | Технология обработки | Режимы резания при чистовом фрезеровании |              | Среднее значение микротвердости $\bar{H}_\mu$ , МПа | Степень наклепа, $S_H$ % |
|-----------|----------------------|--|--------------|---|--------------------------|
|           |                      | $n$ , об/мин                             | $S$ , мм/мин |   |                          |
| 1'        | Черн+п/чист+ТО       | –  | –            | 2862  | Исходн.                  |
| 2'        | Черн+п/чист+ТО+чист  | 8000                                     | 1000         | 3445  | 20                       |
| 3'        |                      | 8000                                     | 1400         | 3320  | 16                       |
| 4'        |                      | 9500                                     | 1000         | 3728  | 30                       |
| 5'        |                      | 9500                                     | 1400         | 3450  | 20,5                     |

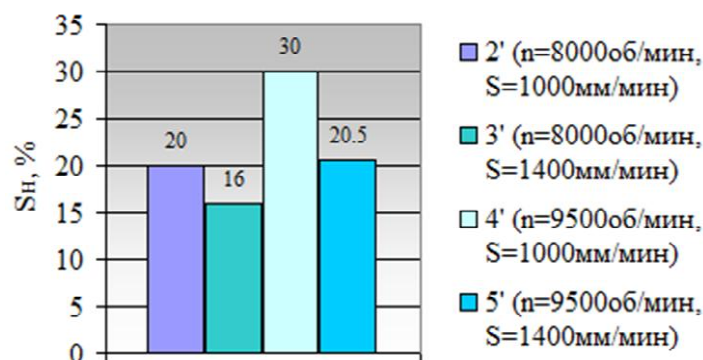


Рис. 5. Исследование степени наклепа поверхностного слоя пера лопаток

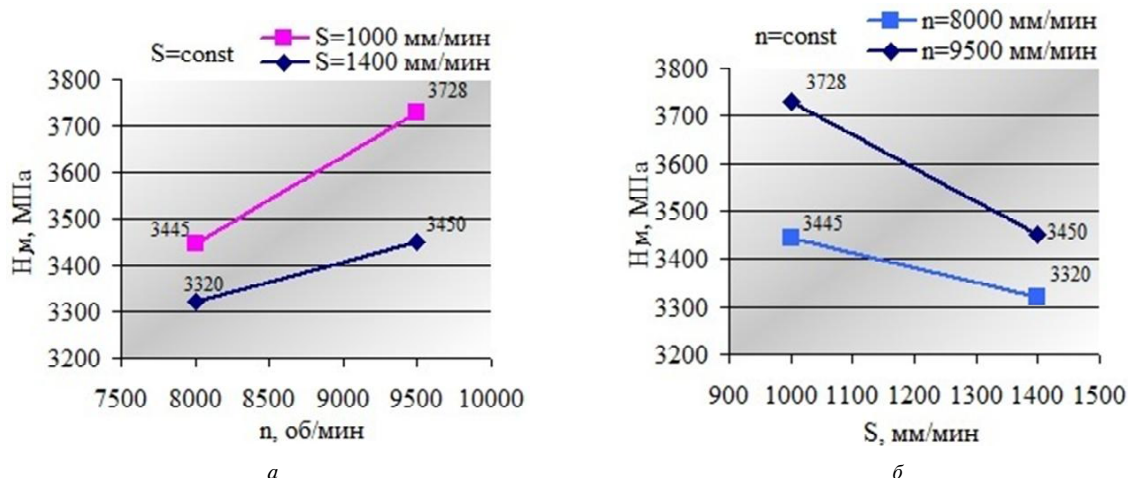


Рис. 6. Зависимость микротвердости поверхностного слоя лопаток от режимов резания: а – от частоты вращения шпинделя, б – от подачи резания

Анализ распределения эпюр остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя показывает, что высокоскоростное фрезерование способствует формированию на поверхности лопаток благоприятных сжимающих остаточных напряжений. В поверхностных слоях наводятся остаточные напряжения сжатия с глубиной распространения до 50 мкм. Причиной возникновения на поверхности сжимающих остаточных напряжений является то, что большая часть тепла переходит в стружку, что не характерно для традиционного фрезерования. В результате, действие упрочняющего силового фактора превосходит действие теплового – разупрочняющего, и в поверхностном слое формируются благоприятные сжимающие напряжения [6].

На рис. 7, а показано распределение остаточных напряжений на поверхности лопатки после чистового фрезерования, где третья лопатка имеет наибольшую величину остаточных напряжений на поверхности до 168 МПа. Также наблюдается рост величины остаточных напряжений с 106 МПа до 168 МПа при увеличении подачи резания с 1000 мм/мин до 1400 мм/мин.

Эпюры (рис. 7, б) показывают распределение остаточных напряжений на поверхности лопатки после получистового и чистового фрезерования. Наблюдается рост величины остаточных напряжений с 79,4 МПа до 95 МПа при увеличении подачи резания с 1000 мм/мин до 1400 мм/мин, а глубина их залегания уменьшается.



При сравнении эпюр распространения в поверхностном слое лопаток остаточных напряжений по двум технологическим схемам наблюдается снижение величины остаточных напряжений на поверхности и увеличение глубины залегания после получистового и чистового фрезерования. Увеличение глубины залегания остаточных напряжений благоприятно сказывается на качестве поверхностного слоя, эксплуатационных характеристиках детали и связано с перераспределением остаточных напряжений сжатия в результате получистового и чистового фрезерования.

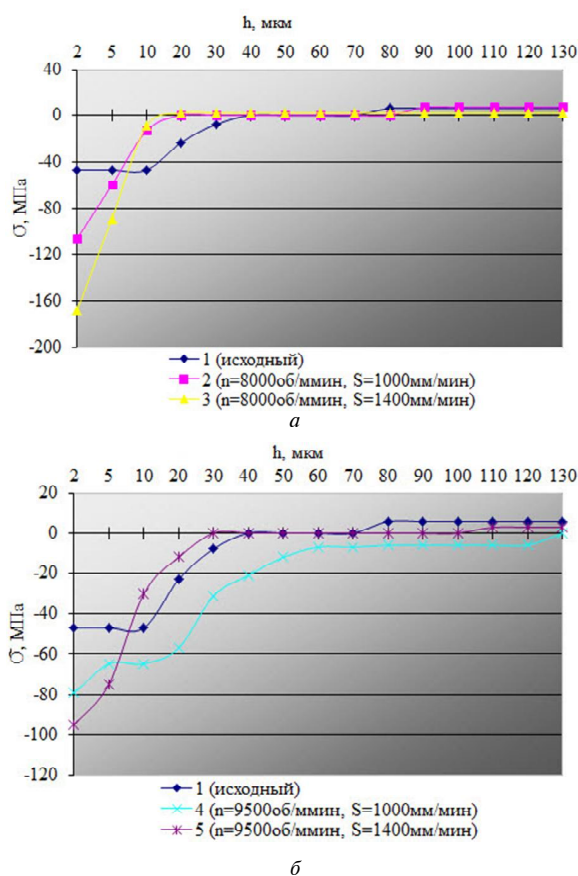


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений в лопатках, обработанных по различным технологиям:  
 а – черн. фр. + п/чист. фр. + ТО + чист. фр.;  
 б – черн. фр. + ТО + п/чист. фр. + чист. фр.

4. Исследование влияния режимов резания на качество поверхностного слоя ЦБК

Закономерности формирования характеристик поверхностного слоя аэродинамических поверхностей лопаток при формообразовании ВСФ могут быть установлены путем разработки и реализации матрицы планирования эксперимента [6]. Для лопаток сектора ЦБК был реализован полнофакторный эксперимент с двумя факторами, варьируемыми на двух уровнях. В качестве факторов использовались переменные, которые оказывают непосредственное влияние на формирование параметров качества поверхностного слоя:  $X_1$  – число оборотов шпинделя станка, об/мин,  $X_2$  – минутная подача фрезы, мм/мин.

В качестве параметров оптимизации (зависимых переменных) использовались: шероховатость поверхности лопаток, максимальный уровень остаточных напряжений первого рода в поверхностном слое, степень наклепа. Функции откликов имеют вид:

$$Y(X_1, X_2) = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2. \quad (1)$$

Уровни варьирования факторами приведены в табл. 4. Интервалы варьирования факторами назначены исходя из исследования рабочих диапазонов частот вращения шпинделя станка и рекомендуемых режимов фрезерования титановых сплавов.

Матрицы планирования эксперимента и полученные значения параметров оптимизации для лопаток приведены в табл. 5.

Таблица 4 – Уровни варьирования независимыми переменными

| Фактор                 | Интервал варьирования | Уровень -1 | Уровень 0 | Уровень +1 |
|------------------------|-----------------------|------------|-----------|------------|
| $n$ , об/мин ( $X_1$ ) | 750                   | 8000       | 8750      | 9500       |
| $S$ , мм/мин ( $X_2$ ) | 200                   | 1000       | 1200      | 1400       |

$$t = 0,25 \text{ мм}$$

Таблица 5 – Функции отклика, полученные при реализации эксперимента

| № режима | Кодированный масштаб факторов |       | Натурный масштаб факторов |                | Параметры продольной шероховатости лопаток, мкм |       | Параметры поперечной шероховатости лопаток, мкм |       | Степень наклепа лопаток, % | Распределение остаточных напряжений на лопатках, МПа |
|----------|-------------------------------|-------|---------------------------|----------------|---|-------|---|-------|----------------------------|--|
|          | $X_1$                         | $X_2$ | $X_1$ , об/мин            | $X_2$ , мм/мин | $Ra$  | $Rz$  | $Ra$  | $Rz$  |                            |  |
| 1        | +1                            | +1    | 9500                      | 1400           | 0,895   | 5,025 | 0,925   | 4,63  | 20,55                      | -95,1  |
| 2        | -1                            | +1    | 8000                      | 1400           | 0,785   | 4,89  | 0,885   | 5,56  | 16                         | -168   |
| 3        | +1                            | -1    | 9500                      | 1000           | 0,355   | 2,33  | 0,365   | 2,295 | 30,26                      | -79,4  |
| 4        | -1                            | -1    | 8000                      | 1000           | 0,685   | 4,215 | 0,555   | 2,945 | 20,37                      | -106   |

Полученные в результате реализации экспериментов согласно разработанной матрице планирования функции откликов имеют вид:

$$1) \text{ по продольной шероховатости лопаток:} \\ \text{по } Ra: Y = 0,68 + 0,055X_1 - 0,16X_2$$

$$\text{по } Rz: Y = 4,115 + 0,438X_1 - 0,843X_2; \quad (2)$$

по поперечной шероховатости лопаток:

$$\text{по } Ra: Y = 0,683 + 0,038X_1 - 0,223X_2$$

$$\text{по } Rz: Y = 3,8575 + 0,395X_1 - 1,238X_2; \quad (3)$$

2) по степени наклепа лопаток:

$$Y = 21,795 - 3,61X_1 + 3,52X_2; \quad (4)$$

3) по остаточным напряжениям для лопаток:

$$Y = -112,125 - 24,875X_1 + 19,425X_2. \quad (5)$$

Полученные зависимости можно использовать для создания математической модели ВСФ ЦБК из титановых сплавов.

5. Оптимизация процесса финишного высокоскоростного фрезерования ЦБК

При управлении характером формообразования приходится решать сложную задачу оптимизации, учитывая, с одной стороны – экономические критерии, с другой – физические процессы, сопровождающие процесс обработки [1].

Под оптимальным режимом высокоскоростного фрезерования понимают режим, при

котором достигаются необходимые характеристики поверхностного слоя, при условии наибольшей производительности. Для реализации данного подхода на процесс ВСФ накладываются технические ограничения в виде линейных функций. К данному виду функций, путем логарифмирования, можно привести степенные формулы, которыми выражаются обычно режимы резания.

Основой для задания характеристик режимов ВСФ является совокупность (система) процессов образования параметров качества поверхностного слоя детали. Экспериментальным путем были получены зависимости, устанавливающие связь между режимами резания и параметрами высокоскоростной обработки (шероховатость, степень наклепа, остаточные напряжения).

Используя модель, рассмотренную в работе [7], особенности ВСО, требуемые параметры качества поверхностного слоя и экспериментальные данные на процесс финишного высокоскоростного фрезерования ЦБК были наложены ограничения, представленные в табл. 6.

Исходными данными для математических моделей ВСФ деталей из титановых сплавов являлись:

- 1) Диаметр фрезы  $D = 3,2$  мм;
- 2) Число зубьев фрезы  $z = 4$ ;
- 3) Стойкость фрезы  $T = 240$  мин;
- 4) Глубина фрезерования  $t = 0,25$  мм;
- 5) Ширина фрезерования  $B = 0,19$  мм;

Таблица 6 – Математическая модель процесса ВСФ

| Ограничение                                | Математическая модель в общем виде   | Математическая модель для данной технологич. системы |
|--|--|--|
| 1. По скорости резания                     | $(1-y)x_1 + yx_2 \leq \ln \frac{1000C_v D^{q-1} z^{y-p}}{\pi T^m t^x B^u}$                                   | $-0,74x_1 + 0,26x_2 \leq 8,74$                       |
| 2. По мощности гл. привода станка          | $(1-w-y)x_1 + yx_2 \leq \ln \frac{1020 \cdot 60 \cdot 1000 D^{q-1} N_{об} \eta z^{y-1}}{10 \pi C_p t^x B^u}$ | $0,38x_1 + 0,75x_2 \leq 17,49$                       |
| 3. По наибольшей частоте вращения шпинделя | $x_1 \leq \ln(n_{un}^{\max})$  | $x_1 \leq 9,16$                                      |
| 4. По наименьшей частоте вращения шпинделя | $x_1 \geq \ln(n_{un}^{\min})$  | $x_1 \geq 8,99$                                      |
| 5. По наибольшей подаче                    | $x_2 \leq \ln(S_{cm}^{\max})$  | $x_2 \leq 10,59$                                     |
| 6. По наименьшей подаче                    | $x_2 \geq \ln(S_{cm}^{\min})$  | $x_2 \geq 5,70$                                      |
| 7. По наибольшей подаче на зуб             | $-x_1 + x_2 \leq \ln(zS_z^{\max})$   | $-x_1 + x_2 \leq -1,36$                              |
| 8. По наименьшей подаче на зуб             | $-x_1 + x_2 \geq \ln(zS_z^{\min})$   | $-x_1 + x_2 \geq -2,75$                              |
| 9. По величине прод. шероховатости         | $4,16 + 0,44x_1 - 0,84x_2 \leq Rz^{n_{prod}}$  | $0,44x_1 - 0,84x_2 \leq -1,82$                       |
| 10. По минимальным остаточным напряжениям  | $-112,13 - 24,88x_1 + 19,43x_2 \leq \sigma_{ост}^{\min}$   | $-24,88x_1 + 19,43x_2 \leq 12,13$                    |
| 11. По степени наклепа пов. слоя           | $21,79 - 3,61x_1 + 3,52x_2 \leq S_n^{\max}$  | $-3,61x_1 + 3,52x_2 \leq 8,21$                       |
| 12. По жесткости системы СПИД              | $(-w-y)x_1 + yx_2 \leq \ln \frac{2812,5[f]D^3 d_{оп}^4 z^{y-1}}{C_p t^x B^u l_{оп}^3}$                       | $-0,62x_1 + 0,75x_2 \leq 8,43$                       |

- 6) Мощность привода главного движения  $N_{дв} = 30$  кВт;
- 7) КПД привода главного движения  $\eta = 0,95$ ;
- 8) Максимальная частота вращения шпинделя  $n_{шт}^{max} = 9500$  об/мин;
- 9) Минимальная частота вращения шпинделя  $n_{шт}^{min} = 8000$  об/мин;
- 10) Наибольшая подача, допустимая приводами станка  $S_{ст}^{max} = 40000$  мм/мин;
- 11) Наименьшая подача для труднообрабатываемого материала  $S^{min} = 300$  мм/мин;
- 12) Показатели в формуле скорости резания  $m = 0,37$ ;  $x = 0,24$ ;  $y = 0,26$ ;  $u = 0,1$ ;  $p = 0,13$ ;  $q = 0,44$ ;  $C_v = 145$ ;
- 13) Показатели в формуле силы резания  $x = 0,85$ ;  $y = 0,75$ ;  $u = 1$ ;  $q = 0,73$ ;  $w = -0,13$ ;  $C_p = 12,5$ ;
- 14) Допустимая величина прогиба  $[f] = 0,02$  мм;
- 15) Длина оправки  $l_{опр} = 100$  мм;
- 16) Диаметр оправки  $d_{опр} = 40$  мм;
- 17) Максимальная подача на зуб для труднообрабатываемых материалов  $S_z^{max} = 0,064$  мм/об;
- 18) Минимальная подача на зуб для труднообрабатываемых материалов  $S_z^{min} = 0,016$  мм/об;
- 19) Величина продольной шероховатости обработанной поверхности  $Ra^{прод} = 0,4$  мкм ( $Rz^{прод} = 2,3$  мкм);
- 20) Минимальные остаточные напряжения на

поверхности детали  $\sigma_{ост}^{min} = -100$  МПа;

- 21) Максимальная степень наклепа поверхностного слоя  $S_n^{max} = 30\%$ .

Совместное действие перечисленных ограничений, накладываемых на процесс резания, определяет область допустимых режимов обработки. Целевой функцией для модели оптимизации режимов резания является производительность, т. е. оптимальный режим соответствует условию:

$$F = S \cdot n \rightarrow \max . \quad (6)$$

Поскольку  $x_1 = \ln n$ ,  $x_2 = \ln S$ , то целевая функция имеет вид:

$$F = x_1 + x_2 \rightarrow \max . \quad (7)$$

Графическое представление указанных технологических ограничений приведено на рис. 8, где областью оптимальных параметров высокоскоростного фрезерования является фигура АБВГ. При ВСФ ЦБК из титанового сплава при глубине резания  $t = 0,25$  мм оптимальным является решение, указанное на рисунке точкой В, которой соответствуют следующие режимы резания:  $n = 9500$  об/мин ( $V = 95,5$  м/мин);  $S = 1002,71$  мм/мин ( $S_z = 0,026$  мм/зуб).

Таким образом, на основании теоретических и экспериментальных исследований поверхностного слоя получена модель оптимизации режимов резания при высокоскоростном фрезеровании ЦБК, учитывающая наиболее важные факторы, влияющие на формирование параметров качества поверхностного слоя.

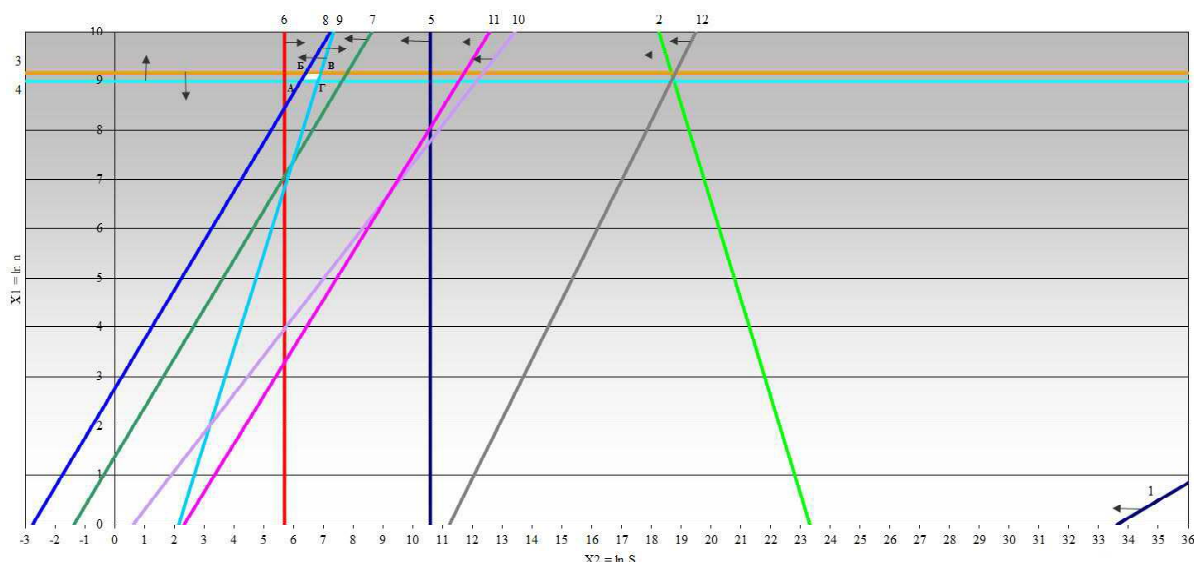


Рис. 8. Математическое представление технологических ограничений процесса ВСФ



### Оценка методов черного фрезерования ЦБК

Целью черновой обработки является удаление наибольшей части припуска и приближение формы заготовки к геометрии изделия. При этом стойкость инструмента и сокращение времени обработки являются наиболее важными.

Быстрое и эффективное удаление основного объема материала имеет важное значение для эффективного программирования станков с ЧПУ. На сегодня известно два метода черновой обработки ЦБК: строчное и плунжерное фрезерование.

Практика показала, что эффективнее удалять избыточный материал послойно. Фрезерование сложнопрофильных поверхностей ЦБК можно осуществить методом строчного высокоскоростного фрезерования, в соответствии с которым профиль образуют путем многопроходного огибания лопатки фрезой с постоянным перемещением по ее высоте. При этом в процессе фрезерования осуществляется точечный контакт инструмента и обрабатываемой поверхности лопатки [8]. Метод позволяет избежать уступов на поверхности детали и обеспечивает равномерный съем материала по высоте.

Использование плунжерного фрезерования для черновой обработки ЦБК является более производительным, поскольку основное усилие резания направлено вдоль оси инструмента, а рабочая подача может достигать максимально возможного для станка значения и, как следствие, значительно сокращать время обработки. По сравнению со строчным фрезерованием, повышенная жесткость при движении по оси  $Z$  позволяет инструменту срезать больше материала при той же подаче, что увеличивает скорость снятия металла. Небольшое радиальное усилие позволяет использовать тонкие и длинные инструменты, сохраняя при этом высокую скорость удаления материала.

Для сравнения этих методов в САМ-системах были заданы строчное и плунжерное фрезерование, с нахождением общего времени обработки ЦБК для последующего расчета экономического эффекта (табл. 7).

*Строчное фрезерование* является многоуровневой, многоосевой обработкой. Метод наиболее распространенный в обработке деталей типа импеллер, поскольку обеспечивает равномерный съем металла по всей поверхности заготовки.

В системе Unigraphics NX7.5 была задана строчная обработка ступицы моноколеса. Исходные данные: тип операции – mill multi blade rough (черновая обработка импеллеров), припуск на деталь 1 мм, глубина резания 1 мм.

В условиях нежесткой системы и больших вылетов инструмента *плунжерное фрезерование* является весьма эффективным. Суть метода заключается в том, что инструмент движется в плос-

костях перпендикулярных ступице моноколеса по двум направляющим кривым с плавным отходом и переходом на следующий сегмент. Величина следующего прохода рассчитывается автоматически исходя из параметров инструмента и заданной величины шага. При обработке деталь поворачивается на определенный угол, чтобы обеспечить доступ инструмента в зону обработки. Метод наиболее эффективен при больших вылетах инструмента или для маломощного оборудования. По сравнению со строчным фрезерованием, повышенная жесткость при движении по оси  $Z$  позволяет инструменту срезать больше материала при той же подаче, что увеличивает скорость снятия металла.

В системе GeMMA-3D была задана плунжерная обработка моноколеса. Исходные данные: тип операции – 5D обработка по двум направляющим плунжер, шаг вдоль кривых: для 1 и 2 прохода – 1 мм, 3 прохода – 0,25 мм; припуск на деталь 1 мм.

На универсальном обрабатывающем центре Starrag ZS-500/130 было получено межлопаточное пространство из цельной заготовки двумя методами (рис. 9), с использованием концевых твердосплавных фрез (рис. 10).

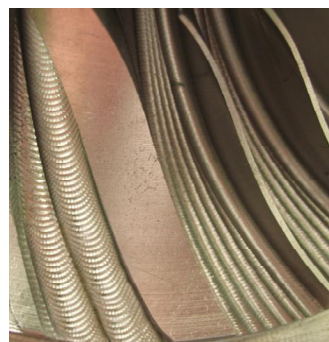
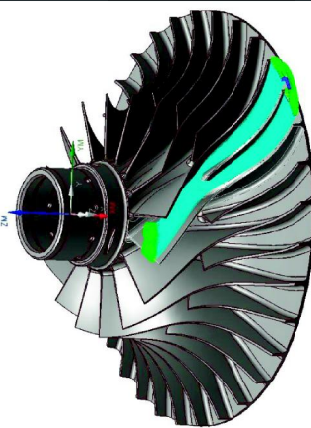
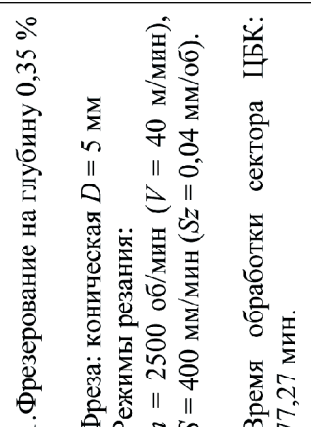
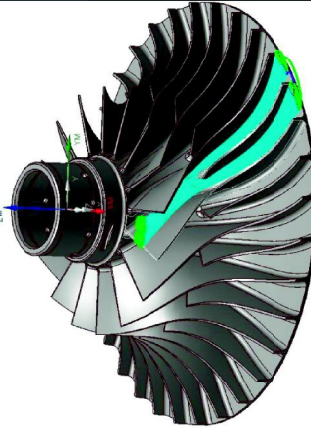
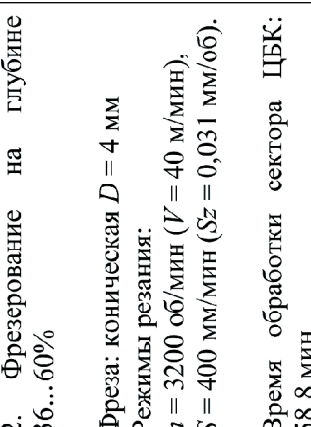
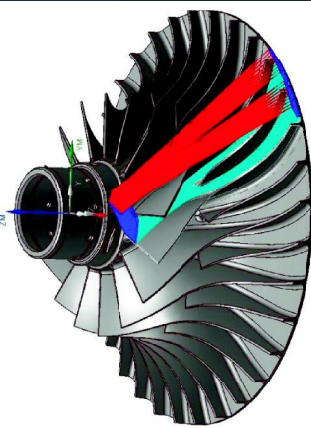
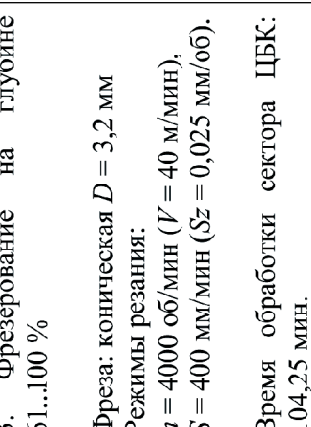


Рис. 9. Черновое фрезерование межлопаточного пространства ЦБК двумя методами



Рис. 10. Инструмент для плунжерного (а) и строчного (б) фрезерования

Таблица 7 – Задание строчной и плунжерной обработки в системах Unigraphics NX7.5 и GeMMa-3D

| Строчное фрезерование   | Плунжерное фрезерование   |
|---|---|
|  <p>1. Фрезерование на глубину 0,35 %</p> <p>Фреза: коническая <math>D = 5</math> мм<br/> Режимы резания:<br/> <math>n = 2500</math> об/мин (<math>V = 40</math> м/мин),<br/> <math>S = 400</math> мм/мин (<math>Sz = 0,04</math> мм/об).</p> <p>Время обработки сектора ЦБК:<br/> 77,27 мин.</p>          |  <p>1. Выборка металла в верхней части</p> <p>Фреза: плунжерная <math>D = 8</math> мм<br/> Режимы резания:<br/> <math>n = 2000</math> об/мин (<math>V = 75</math> м/мин),<br/> <math>S = 400</math> мм/мин (<math>Sz = 0,1</math> мм/об).</p> <p>Время обработки сектора ЦБК:<br/> 3,47 мин.</p>           |
|  <p>2. Фрезерование на глубине 36...60%</p> <p>Фреза: коническая <math>D = 4</math> мм<br/> Режимы резания:<br/> <math>n = 3200</math> об/мин (<math>V = 40</math> м/мин),<br/> <math>S = 400</math> мм/мин (<math>Sz = 0,031</math> мм/об).</p> <p>Время обработки сектора ЦБК:<br/> 58,8 мин.</p>        |  <p>2. Выборка металла в нижней части</p> <p>Фреза: плунжерная <math>D = 8</math> мм<br/> Режимы резания:<br/> <math>n = 2000</math> об/мин (<math>V = 75</math> м/мин),<br/> <math>S = 400</math> мм/мин (<math>Sz = 0,1</math> мм/об).</p> <p>Время обработки сектора ЦБК:<br/> 10,42 мин.</p>           |
|  <p>3. Фрезерование на глубине 61...100 %</p> <p>Фреза: коническая <math>D = 3,2</math> мм<br/> Режимы резания:<br/> <math>n = 4000</math> об/мин (<math>V = 40</math> м/мин),<br/> <math>S = 400</math> мм/мин (<math>Sz = 0,025</math> мм/об).</p> <p>Время обработки сектора ЦБК:<br/> 104,25 мин.</p> |  <p>3. Доработка межлопаточного пространства</p> <p>Фреза: плунжерная <math>D = 4</math> мм<br/> Режимы резания:<br/> <math>n = 4000</math> об/мин (<math>V = 50</math> м/мин),<br/> <math>S = 400</math> мм/мин (<math>Sz = 0,05</math> мм/об).</p> <p>Время обработки сектора ЦБК:<br/> 51,517 мин.</p> |
| <p>Общее время обработки сектора ЦБК: 240,92 мин (4 ч).<br/> Общее время обработки всего ЦБК (16 секторов): 3854,67 мин (64,25ч)</p>  | <p>Общее время обработки сектора ЦБК: 66 мин (1,1 ч).<br/> Общее время обработки всего ЦБК (16 секторов): 1056 мин (17,6ч).</p>   |

Для определения экономической эффективности плунжерного фрезерования ЦБК было рассчитано штучное время обработки по методике [8] и составило:

для строчной обработки:  $T_{шт1} = 4557,32$  мин;  
для плунжерной обработки:  $T_{шт2} = 1254,89$  мин.  
Общие затраты рассчитывались по формуле:

$$C = Z + H + I + A + P + E, грн, \quad (8)$$

где  $Z$  – заработная плата оператора, грн.;

$H$  – начисления на заработанную плату, грн.;

$I$  – амортизация оборудования на одну деталь, грн.;

$A$  – стоимость инструмента для обработки одной детали в зависимости от необходимого количества фрез, грн.;

$P$  – расходы на настройку станка, грн.;

$E$  – стоимость электроэнергии для обработки одной детали, грн.

Экономический эффект составляет:

$$\mathcal{E} = (C_1 - C_2) \cdot N, грн, \quad (9)$$

где  $N$  – годовая программа выпуска деталей.

Таким образом, использование плунжерного фрезерования ЦБК является более эффективным, чем строчного фрезерования, поскольку сокращает штучное время в 3,6 раза и тем самым повышает производительность обработки. Наблюдается увеличение стойкости инструмента в 1,5 раза за счет изменения основного усилия резания вдоль оси инструмента и, как следствие, увеличение жесткости и уменьшения вибраций при резании. Экономический эффект на 500 деталей составляет 61,9 млн. грн.

### Выводы

1. Для чистового высокоскоростного фрезерования ЦБК рекомендуется использовать режим резания:  $n = 9500$  об/мин ( $V = 95,5$  м/мин);  $S = 102,7$  мм/мин ( $S_z = 0,026$  мм/зуб) при глубине резания  $t = 0,25$  мм, обеспечивающий благоприятные характеристики поверхностного слоя: шероховатость  $Ra$  0,36 мкм, степень наклепа до  $S_n = 30$  %, величину остаточных напряжений сжатия до 200 МПа. Диаметр конической фрезы 3,2 мм, число зубьев 4, угол конуса  $3^\circ$ .

2. Технологический процесс изготовления ЦБК из титановых сплавов предусматривает высокоскоростное фрезерование: черновая обработка – плунжерным методом, который значительно со-

крашает время обработки, а чистовая – строчным, поскольку обеспечивает равномерный съем материала и получение необходимой геометрии детали.

### Список литературы

1. Кирюшин И. Е. Оптимизация процесса высокоскоростной обработки закаленных сталей с учетом особенностей формообразования в условиях локального термопластического сдвига / Кирюшин И. Е., Кирюшин Д. Е., Насад Т. Г. // Известия Челябинского научного центра. – 2008. – № 2. – г. Челябинск, изд. «ЧНЦ». – 200 с.
2. Повышение эффективности высокоскоростного фрезерования центробежных колес / [Грачев Ю. В., Пухальская Г. В., Критчин С. В., Панченко Т. А.] // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 1. – С. 95–100.
3. ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазным наконечником».
4. Биргер И. А. Остаточные напряжения / Биргер И. А. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
5. Богуслаев В. А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД / [Богуслаев В. А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д.]. – Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2003. – 610 с.
6. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / [Богуслаев В. А., Яценко В. К., Жеманюк П. Д. и др.] – Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.
7. Гавриленко Я. Н. Оптимизация режимов высокоскоростного фрезерования деталей из титановых сплавов. / Гавриленко Я. Н., Мозговой С. В., Павленко Д. В. // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 1. – С. 82–88.
8. Сахнюк Н. В. Определение траектории перемещения заготовки и инструмента для пятикоординатной высокоскоростной обработки поверхностей лопатки компрессора / Сахнюк Н. В., Грачев Ю. В., Качан А. Я. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. – № 2. – С. 71–74.
9. Моисеева Р. Н. Нормативы времени для различных категорий работающих в ГПС (операторов и наладчиков ГПМ и РТК при механообработке) / Моисеева Р. Н., Виноградова Г. А. // Научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства, изд. «НИАТ», 1990. – 146 с.

Поступила в редакцию 30.06.2011

**Кондратюк Е.В., Пухальська Г.В., Жарик В.Г., Панченко Т.О., Критчин С.В. Підвищення ефективності процесу ВШФ відцентрових колес за рахунок оптимізації режимів різання і використання високопродуктивних методів обробки**

*Досліджений вплив режимів різання на параметри якості поверхневого шару при високошвидкісному фрезеруванні відцентрових колес з титанових сплавів, запропонований оптимальний режим для чистового фрезерування. В результаті порівняння двох методів чорнової обробки відцентрових колес показана економічна ефективність використання плунжерного фрезерування.*

**Ключові слова:** відцентрове колесо, високошвидкісне фрезерування, плунжерне фрезерування, якість поверхневого шару.

**Kondratyuk E., Pukhal'skaya G., Zharik V., Panchenko T., Kritchyn S. Increase of efficiency of process of HSM (High Speed Machining) of multi blades for account of optimization of modes of cutting and use of high-performance methods of treatment**

*Influence of the cutting modes is investigational on quality parameters of superficial layer at the high-speed milling of multi blades from titanic alloys, the optimal mode is offered for the finish milling. A comparison of two methods roughing multi blades shown cost-effectiveness of using the plunger milling.*

**Key words:** multi blade, high-speed milling, plunger milling, quality of superficial layer.