

УДК 621.910.71:669.295

Е.К. Березовский

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЧИСТОВОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

*В работе установлено влияние режимов чистового высокоскоростного фрезерования на параметры качества поверхностного слоя и силу резания при обработке образцов из титанового сплава ВТ6.*

*Представлены математические модели уравнениями линейной регрессии зависимостей параметров качества поверхностного слоя и силы резания от величины подачи на зуб фрезы и скорости резания.*

*Показано распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя образцов.*

**Ключевые слова:** чистовое высокоскоростное фрезерование, параметры качества, поверхностный слой, остаточные напряжения, шероховатость поверхности, степень наклепа, средний шаг неровностей, сила резания, подача на зуб, скорость резания, математическая модель.

### Введение

В настоящее время в авиадвигателестроении значение высокоскоростного фрезерования значительно возросло, что связано с появлением сложнопрофильных деталей в конструкции авиадвигателей из труднообрабатываемых титановых и никелевых сплавов [1, 2].

Учитывая влияние поверхностного слоя деталей газотурбинных двигателей (ГТД), работающих в условиях циклического нагружения, особенно актуальным является обеспечение при высокоскоростном фрезеровании не только параметров точности, но и параметров качества поверхностного слоя.

Поэтому важным является исследование влияния режимов чистового высокоскоростного фрезерования на параметры качества по-

верхностного слоя деталей ГТД из титановых сплавов.

**Цель работы** – оценка влияния режимов чистового высокоскоростного фрезерования на параметры качества поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТ6.

**Объект исследования** – образцы из титанового сплава ВТ6 после чистового высокоскоростного фрезерования.

### Методы и методика проведения исследований

Исследование проводилось на стандартных образцах, применяемых для оценки параметров качества поверхностного слоя деталей ГТД в серийном производстве.

Образцы изготавливались из титанового деформируемого сплава ВТ6, химический состав которого представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав ВТ6, %

| Fe     | C      | Si      | V         | N       | Ti            | Al        | Zr     | O      | H        | Примесей   |
|--------|--------|---------|-----------|---------|---------------|-----------|--------|--------|----------|------------|
| до 0,3 | до 0,1 | до 0,15 | 3,5...5,3 | до 0,05 | 86,485...91,2 | 5,3...6,8 | до 0,3 | до 0,2 | до 0,015 | прочих 0,3 |

Микроструктура титанового сплава ВТ6 образцов проверена на макротемплетах, изготовленных по сечению штамповок в продольном направлении. Микроструктура соответствует 2а типу, при норме 1 – 6а тип шкалы №1 ОСТ 1 90002-86 (рис. 1).

Для чистового попутного высокоскоростного фрезерования применялись концевые фрезы из материала ВК10ХОМ с геометрическими параметрами: радиус фрезы,  $r = 4$  мм; число зубьев – 4; передний угол,  $\gamma = 20^\circ$ ; задний угол,  $2...6^\circ$ ; угол подъема винтовой канавки,  $\omega = 36^\circ$ ;

глубина фрезерования,  $h = 0,5$  мм; ширина строки –  $0,5$  мм; угол наклона оси инструмента –  $6^\circ$ .

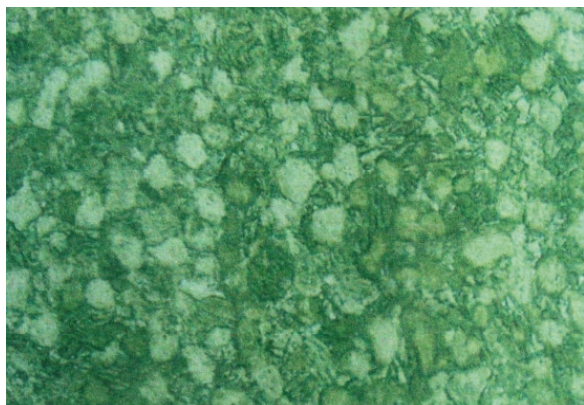


Рис. 1. Микроструктура титанового сплава ВТ6 образцов перед высокоскоростным фрезерованием

Диапазоны изменения режимных параметров:

- скорость резания,  $V = 35...95$  м/мин;
- подача на зуб,  $S_z = 0,02...0,09$  мм/зуб.

В ходе проведения экспериментальных исследований определялись значения параметров качества поверхностного слоя и сила резания:

- среднее арифметическое отклонение профиля,  $R_a$ , мкм;
- средний шаг неровностей профиля,  $S_m$ , мкм;

- степень наклепа поверхностного слоя материала образца,  $\delta H$ , %;
- остаточные напряжения на поверхности образца после чистового высокоскоростного фрезерования,  $\sigma_{ост}^{пов}$ , МПа;
- микроструктура поверхностного слоя образцов после высокоскоростного фрезерования;
- сила резания,  $P$ , Н.

Чистовая обработка образцов из титанового сплава ВТ6, высокоскоростным фрезерованием производилась на обрабатывающем центре Turbomill-1200g.

### Результаты исследований и их обсуждение

Установленные зависимости параметров:

$R_a$ ,  $S_m$ ,  $\delta H$ ,  $\sigma_{ост}^{пов}$ ,  $P$  от величины подачи на зуб,  $S_z$  математически представлены уравнениями линейной регрессии вида:

$$\begin{aligned} R_a &= 1,46 + 2,23S_z; \\ S_m &= 0,11 + 13S_z; \\ \delta H &= 2,5 + 195S_z; \\ \sigma_{ост}^{пов} &= -649,3 + 6900S_z; \\ P &= -0,5 + 470S_z. \end{aligned} \quad (1)$$

Геометрическая интерпретация уравнений (1) линейной регрессии показана на рис. 2.

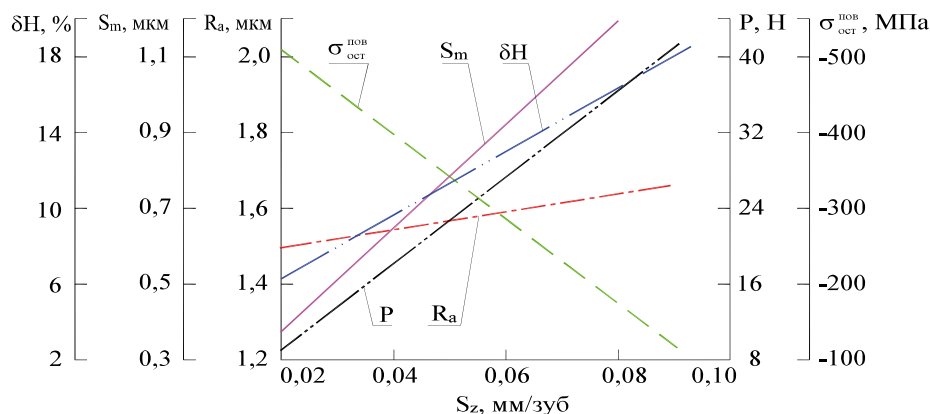


Рис. 2. Влияние подачи на зуб на параметры качества поверхностного слоя образцов и силу резания при чистовом высокоскоростном фрезеровании

С увеличением подачи на зуб,  $S_z$  в диапазоне от  $0,02$  до  $0,09$  мм/зуб,  $R_a$ ,  $S_m$ ,  $\delta H$  и  $P$  прямо пропорционально увеличиваются. При этом  $R_a$  увеличивается от  $1,5$  до  $1,65$  мкм;  $S_m$  – от  $0,37$  до  $1,2$  мкм;  $\delta H$  – от  $6,3$  до  $18$  %;  $P$  – от  $9,0$  до  $40$  Н, что не противоречит [3].

Остаточные напряжения,  $\sigma_{ост}^{пов}$  являются сжимающими и пропорционально снижаются от  $512$  до  $-114$  МПа.

Схема действия сил на режущую кромку фрезы при высокоскоростном фрезеровании образца показана на рис. 3.

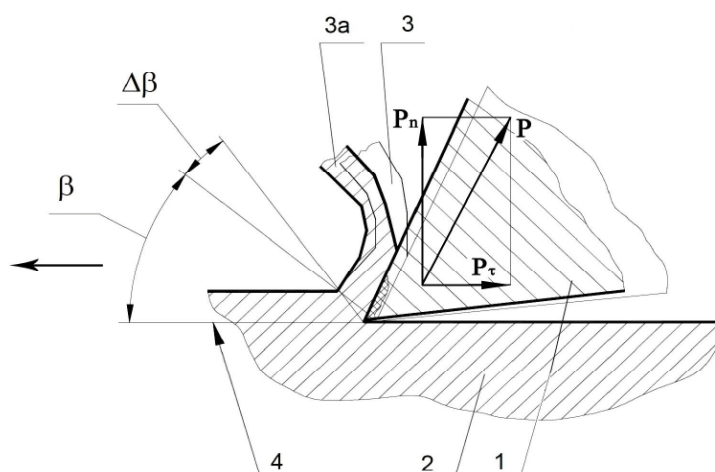


Рис. 3. Схема действия сил на режущую кромку фрезы при высокоскоростном фрезеровании образца

1 – инструмент; 2 – деталь; 3 – стружка; 3а – положение стружки при ВСФ; 4 – плоскость резания;  $\beta$  – угол скальвания;  $\Delta\beta$  – увеличение угла скальвания;  $P_t$  – касательная сила, Н;  $P_n$  – нормальная сила, Н;  $P$  – результирующая сила, Н

Установленные зависимости  $R_a$ ,  $S_m$ ,  $\sigma_{ост}^{пов}$ ,  $P$  от скорости резания  $V$  в принятом в эксперименте диапазоне изменения математически представлены уравнениями линейной регрессии вида:

$$\begin{aligned} R_a &= 1,48 + 0,0069V; \\ S_m &= 0,61; \\ \delta H &= 11,74 + 0,076V; \\ \sigma_{ост}^{пов} &= -636 + 3,93V; \\ P &= 19,0 + 0,018V. \end{aligned} \quad (2)$$

Геометрическая интерпретация уравнений (2) линейной регрессии показана на рис. 4.

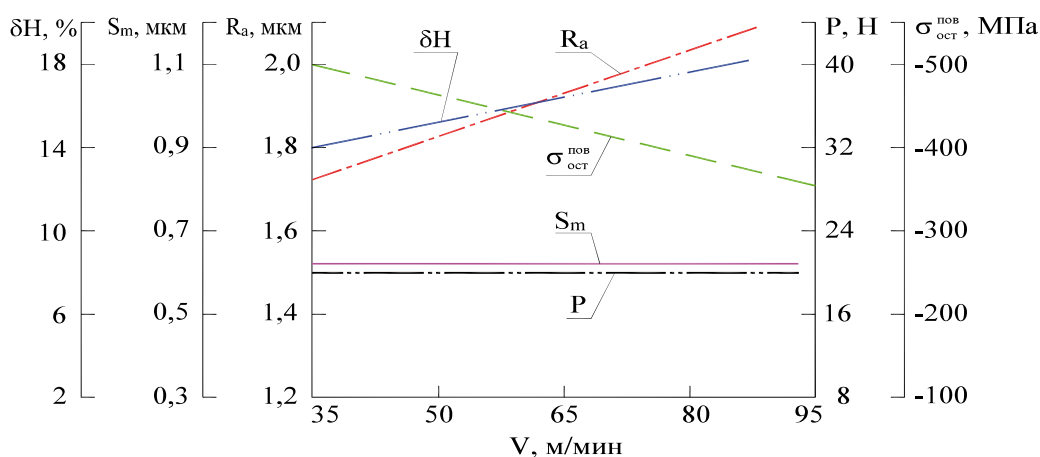


Рис. 4. Влияние скорости резания на параметры качества поверхностного слоя образца и силу резания при чистовом высокоскоростном фрезеровании

С увеличением скорости резания  $V$  в диапазоне от 35 до 95 м/мин,  $R_a$  увеличивается от 1,72 до 2,3 мкм.  $S_m$  и  $P$  практически не изменяются с увеличением скорости резания.

Остаточные напряжения,  $\sigma_{ост}^{пов}$  являются сжимающими и пропорционально снижаются от  $-500$  до  $-350$  МПа.

На рис. 5 показано распределение остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  по глубине поверхност-

ного слоя образцов после чистового высокоскоростного фрезерования.

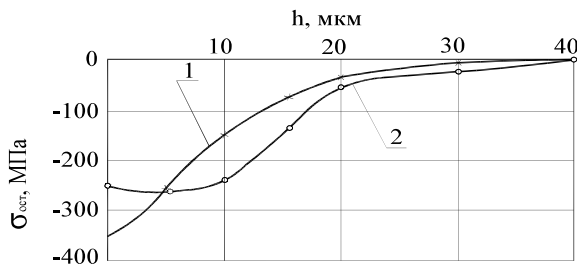


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя  
1 — образцы из титанового сплава ВТ6;  
2 — образцы из титанового сплава ВТ8-1

В поверхностном слое наводятся остаточные напряжения сжатия с глубиной распространения от 30 до 40 мкм.

Микроструктура поверхностного слоя образцов после высокоскоростного фрезерования не изменяется и соответствует микроструктуре, представленной на рис. 1.

#### Выводы

1. Режимы чистового высокоскоростного фрезерования: подача на зуб,  $S_z$  и скорость резания,  $V$  оказывают существенное влияние на параметры качества поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТ6.

2. С увеличением подачи на зуб,  $S_z$  в принятом в эксперименте диапазоне изменения параметры качества  $R_a$ ,  $S_m$ ,  $\delta H$  увеличиваются прямопропорционально увеличению подачи на зуб.

3. С увеличением скорости резания  $V$  в принятом в эксперименте диапазоне изменения, шероховатость обработанной поверхности  $R_a$

пропорционально увеличивается, а параметр  $S_m$  и сила резания  $P$  не изменяются.

4. В поверхностном слое после чистового высокоскоростного фрезерования наводятся остаточные напряжения сжатия с глубиной распределения от 30 до 40 мкм.

5. С увеличением подачи на зуб и скорости резания величина остаточных напряжений на поверхности образцов прямопропорционально снижается.

6. Наклеп поверхностного слоя после чистового высокоскоростного фрезерования с увеличением подачи на зуб прямопропорционально увеличивается от 6,3 до 18%, а с увеличением скорости резания в принятом в эксперименте диапазоне изменения, наклеп поверхностного слоя увеличивается от 14 до 18%.

#### Список литературы

1. Богуслаев В.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. [Текст] / [В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк, А.Я. Качан и др.]. — Ч.І. — Запорожье: АО «Мотор Сич», 2003. — 353 с.

2. Качан А.Я. Технология обработки осевых моноколес высокоскоростным фрезерованием [Текст] / А.Я. Качан, С.А. Петров, В.А. Панасенко [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. — 2006. — № 9(35). — С. 12 — 18.

3. Болсуновский С.А. Расчетная оценка и экспериментальное измерение усилий резания для чистовой высокоскоростной фрезерной обработки компрессорной лопатки ГТД [Текст] / С.А. Болсуновский, В.Д. Вермель, Г.А. Губанов [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. — 2012. — № 10(97). — С. 16 — 19.

Поступила в редакцию 31.05.2016

#### Березовський Є.К. Вплив режимів чистового високошвидкісного фрезерування на параметри якості поверхневого шару зразків з титанового сплаву ВТ6

*У роботі встановлено вплив режимів чистового високошвидкісного фрезерування на параметри якості поверхневого шару і силу різання при обробці зразків з титанового сплаву ВТ6.*

*Представлено математичні моделі рівняннями лінійної регресії залежностей параметрів якості поверхневого шару і сили різання від величини подачі на зуб фрези і швидкості різання.*

*Показано розподіл залишкових напруг по глибині поверхневого шару зразків.*

**Ключові слова:** чистове високошвидкісне фрезерування, параметри якості, поверхневий шар, залишкові напруги, шорсткість поверхні, ступінь наклепу, середній крок нерівностей, сила різання, подача на зуб, швидкість різання, математична модель.

**Y.K.Berezovsky. Influence of high-speed fine mill conditions on qualitative characteristics of BT6 titanium alloy specimens' surface coat**

*This investigation describes the influence of high-speed fine mill conditions on qualitative characteristics of surface coat and tool-workpiece load during BT6 titanium alloy specimens processing.*

*Mathematical models are presented in the form of equations of linear regression showing the function of surface coat qualitative characteristics and tool-workpiece load to the tooth loading and tool-cutting speed.*

*The distribution of residual strain through the specimens surface coat depth is demonstrated.*

**Key words:** *high-speed fine milling, qualitative characteristics, surface coat, residual strain, surface finish, peening degree, average pitch of roughness, tool-workpiece load, tooth loading, tool-cutting speed, mathematical model.*