

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ9

© 2021

М. Б. Сазонов кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
sazonov.mihail.56@yandex.ru

А. Н. Жидяев старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
a.n.zhidyayev@gmail.com

Рассматривается принцип работы виброизмерительного устройства, позволяющего проводить измерения вибрации при фрезеровании концевым инструментом. Основными измерительными элементами устройства являются два токовихревых датчика, позволяющих измерять виброперемещения фрезы в двух направлениях – перпендикулярном и параллельном движению продольной подачи. В устройстве имеется компенсационный датчик, который учитывает влияние сопутствующих факторов, и датчик для фиксирования мгновенной частоты вращения шпинделя станка. В качестве упругого элемента колебательной системы использовалась сама фреза, закреплённая в цанговом патроне. Приведены данные измерения амплитуды колебаний при фрезеровании четырёхзубой и шестизубой концевой фрезой титанового сплава ВТ9. Исследование вибраций концевых фрез включало два этапа. На первом этапе было исследовано влияние на частоту и амплитуду параметров и режимов фрезерования, а также схем фрезерования (встречного и попутного). На втором этапе отрабатывались мероприятия по снижению интенсивности вибраций и повышению надёжности и долговечности фрез. Результаты исследований показали более низкие значения амплитуды при работе шестизубой фрезой.

Вибрация; фрезерование; фреза концевая; сплав титановый; амплитуда

Цитирование: Сазонов М.Б., Жидяев А.Н. Исследование вибраций концевых фрез при обработке титанового сплава ВТ9 // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 4. С. 89-99. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-89-99

Современные авиационные двигатели характеризуются высоким процентом использования труднообрабатываемых материалов. Значительный объём имеют детали, изготовленные из титановых сплавов. При этом обработка резанием деталей из титановых сплавов является затруднительной даже с использованием современного оборудования и инструментов [1].

При изготовлении таких деталей, как лопатки, моноколёса, при черновой обработке межлопаточного канала и последующей чистовой обработке пера зачастую применяется фрезерование концевыми фрезами [2]. Для выбора режимов резания может применяться моделирование для обеспечения геометрической точности обработки [3] и для поиска устойчивых (безвибрационных) режимов [4]. Большое значение также имеет экспериментальное исследование вибраций при концевом фрезеровании [5]. Поиск устойчивых режимов обработки имеет особенно важное значение при разработке и внедрении специализированных технологических шаблонов процессов пятиосевой фрезерной обработки сложных деталей, например, лопаточного венца моноколеса [6] или пера лопатки (рис. 1, а).

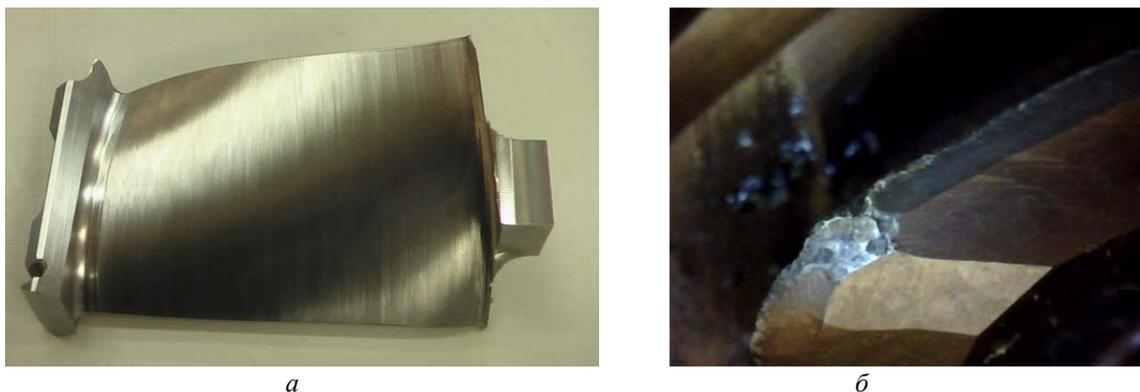


Рис. 1. Разрушение режущих кромок фрезы после обработки радиусной частью кромки при обработке пера лопатки:
а – рабочая лопатка компрессора с пером, обработанным концевой фрезой;
б – износ фрезы после обработки

Как правило, основным фактором, определяющим выход твёрдосплавной концевой фрезы из строя, является не истирание режущих поверхностей зубьев, а выкрашивание режущих кромок, главным образом в местах перехода от радиусных кромок к винтовым кромкам на цилиндрической части фрезы. На рис. 1, б показан износ фрезы, спроектированной и изготовленной в Самарском университете [7].

Причиной усталостного разрушения и выкрашивания режущих кромок, наряду с недостаточной прочностью режущих зубьев, могут быть вибрации фрез, тем более что концевое фрезерование характеризуется прерывистостью процесса резания и непостоянством сил, действующих на фрезу.

В связи с этим исследование вибраций фрез и разработка методов снижения их интенсивности и гашения представляются весьма актуальными.

Для проведения такого исследования была разработана универсальная система для виброизмерений при обработке материалов резанием. Элементы данной измерительной системы, адаптированной к исследованию вибраций при концевом фрезеровании (механическая часть системы), представлены на рис. 2, а общий вид системы для виброизмерений – на рис. 3.

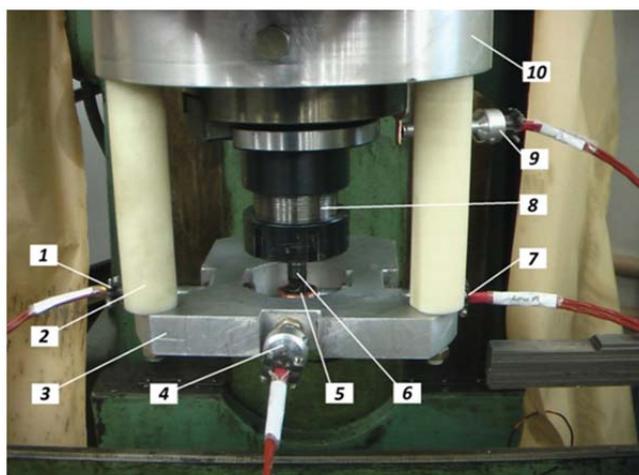


Рис. 2. Механическая часть виброизмерительной системы, адаптированной к процессу концевой фрезерования:
1 – компенсационный датчик; 2 – колонка; 3 – платформа; 4, 7 – токовихревые датчики;
5 – медное кольцо; 6 – фреза; 8 – цанговый патрон; 9 – датчик мгновенной частоты вращения шпинделя; 10 – кольцо для закрепления на пиноли станка



Рис. 3. Общий вид системы для виброизмерений

Как видно из рис. 2, основными измерительными элементами системы являлись два токовихревых датчика 4 и 7, установленные в платформе 3. При этом датчик 4 позволял измерять виброперемещения фрезы в направлении, перпендикулярном движению продольной подачи, а датчик 7 – в направлении, параллельном движению продольной подачи. Помимо датчиков 4 и 7 в платформе устанавливался компенсационный датчик 1. Его назначение – компенсировать влияние сопутствующих факторов, в частности температуры окружающей среды, на показания датчиков 4 и 7. Ещё один датчик – 9 устанавливался в кронштейне, закреплённом на пиноли станка. Его показания позволяли фиксировать мгновенную частоту вращения шпинделя.

В качестве упругого элемента колебательной системы использовалась сама фреза 6, закреплённая в цанговом патроне 8. На режущей части фрезы на расстоянии 10 мм от торцевых зубьев устанавливалось с небольшим натягом медное кольцо 5, против которого располагались датчики 4 и 7. Схема расположения токовихревых датчиков показана на рис. 4.

Перед проведением эксперимента кольцо 5 (рис. 2) после установки фрезы в цанговом патроне протачивалось непосредственно на станке резцом, закреплённым с помощью тисков на столе фрезерного станка. Данная операция позволяет устранить биение кольца относительно оси вращения фрезы и исключить его влияние на изменение зазоров S между кольцом и датчиками (рис. 4).

Как видно из рис. 2, платформа 3 с токовихревыми датчиками посредством трёх колонок 2 соединялась с кольцом 10, которое, в свою очередь, закреплялось на пиноли станка.

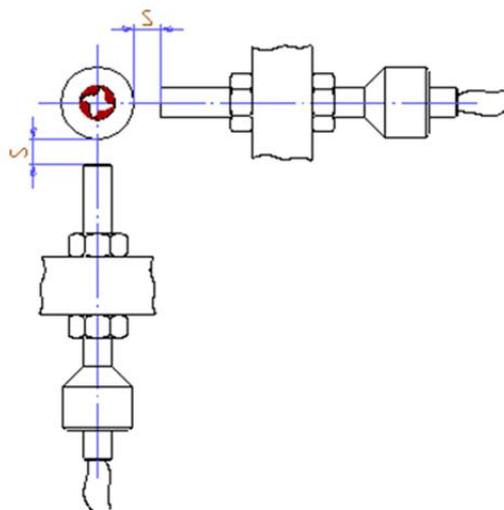


Рис. 4. Схема расположения токовихревых датчиков

Для того, чтобы устранить влияние на показания датчиков возмущений, вызванных работой электропривода станка и вентилятора («шумов»), колонки были изготовлены из капролона, который характеризуется высокой демпфирующей способностью (логарифмический декремент затухания равен 0,380).

Кроме того, при обработке резанием в технологических системах наблюдаются также автоколебания, что связано с регенеративным влиянием следа, оставляемого на поверхности резания режущими зубьями инструмента. Эти колебания также будут вызывать изменение зазоров между токовихревыми датчиками и кольцом и могут быть измерены.

Исследование вибраций концевых фрез включало два этапа. На первом этапе было исследовано влияние на частоту и амплитуду вибраций параметров и режимов фрезерования: скорости резания v (частоты вращения фрезы n); минутной подачи $S_{мин}$; ширины B и глубины резания t . Проведено также сравнение двух схем фрезерования: встречного и попутного. Режимы фрезерования при проведении исследований представлены в таблице. При этом в качестве инструмента использовалась четырёхзубая концевая фреза, а в качестве обрабатываемого материала – титановый сплав ВТ9.

Таблица. Режимы фрезерования при проведении исследований

Номер опыта	Обороты шпинделя n , об/мин	Подача $S_{мин}$, мм/мин	Ширина фрезерования B , мм	Глубина резания t , мм	
1	500	100	3,0	3	
2		160			
3		200			
4		250			
5	400	160	2,0		
6	315				
7	500				1,0
8			0,5		
9			3,0		5
10					7
11					

На втором этапе проверялись и отрабатывались мероприятия по снижению интенсивности вибраций и повышению надёжности и долговечности фрез.

На рис. 5 – 7 представлены наиболее характерные виброграммы колебаний фрезы в направлениях параллельном и перпендикулярном движению подачи (соответственно рис. 5, 6). При этом фрезерование осуществлялось по схеме встречного фрезерования. Режимы фрезерования: ширина фрезерования $B = 3$ мм, глубина резания $t = 3$ мм, частота вращения фрезы $n = 500$ об/мин, минутная подача $S_{мин} = 100$ мм/мин. При заданной глубине резания $t = 3$ мм угол контакта зуба фрезы диаметром $D = 12$ мм с заготовкой составил $\psi = \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot t}{D}\right) = \left(1 - \frac{2 \cdot 3}{12}\right) = 60^\circ$. При угле между зубьями фрезы $\varepsilon = 90^\circ$ в резании одновременно участвует только один зуб. Более того, при угле пово-

рота фрезы φ в пределах от 60° до 90° резание вообще не происходит, т.е. процесс резания оказывается прерывистым.

Из представленных виброграмм видно, что в процессе концевой фрезерования доминирующую роль играют вынужденные колебания фрезы с периодом, соответствующим времени работы каждого режущего зуба.

Так, на виброграмме рис. 5 точка 1 соответствует началу работы одного зуба фрезы (предположим зуб №1). По мере поворота фрезы с увеличением угла φ толщина среза, снимаемая этим зубом, будет увеличиваться ($a_z = S_z \cdot \sin \varphi$), следовательно, будут увеличиваться силы резания и величина отжима фрезы от заготовки. При угле поворота φ , равном углу контакта ψ , отжим фрезы достигает максимального значения (точка 2), зуб выходит из контакта с заготовкой, процесс резания прекращается, а фреза начинает колебаться с частотой, соответствующей частоте её собственных колебаний.

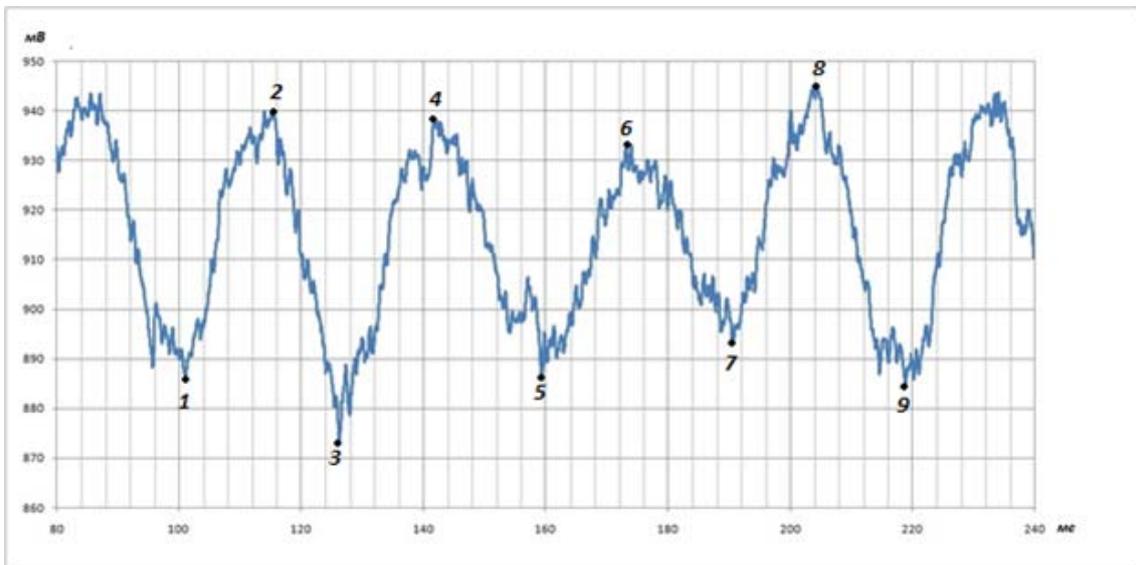


Рис. 5. Виброграмма колебаний фрезы в направлении, параллельном движению подачи

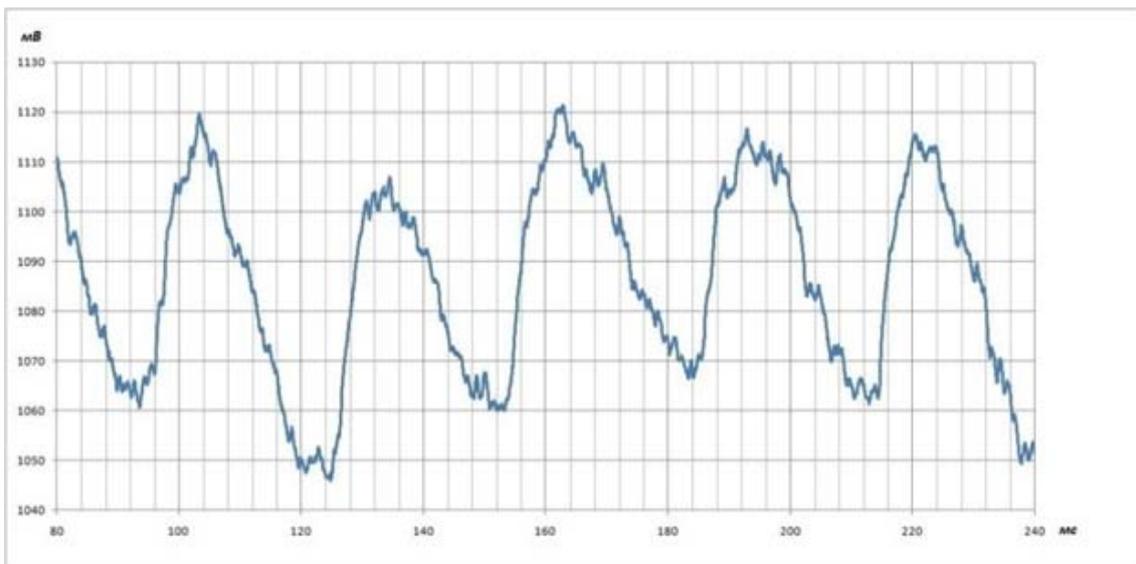


Рис. 6. Виброграмма колебаний фрезы в направлении, перпендикулярном движению подачи

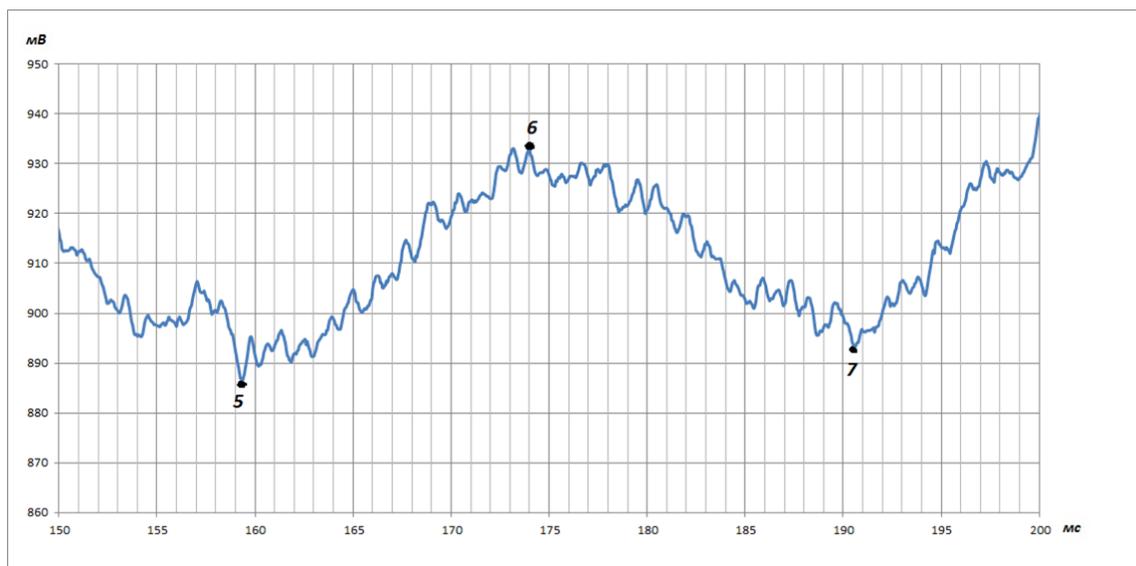


Рис. 7. Участок виброграммы, соответствующий работе одного зуба

Точка 3 на виброграмме соответствует началу работы следующего зуба фрезы (зуб №2), а точки 5 и 7 – началу работы соответственно третьего и четвертого зубьев. Временной промежуток между точками 1 и 9 соответствует времени одного оборота фрезы $T_{фр}$, которое при частоте вращения $n = 508$ об/мин (что зафиксировал оборотный датчик) было равно $T_{фр} = 0,118$ с. Частота врезания зубьев фрезы, определяющая частоту вынужденных колебаний, составила 34 Гц, а двойная амплитуда вынужденных колебаний – в среднем $2A_{вын} = 28$ мкм.

Как видно из представленных виброграмм, процесс концевое фрезерования, помимо вынужденных колебаний, сопровождается также интенсивными автоколебаниями фрезы. Возникновение и поддержание автоколебаний на определенном уровне обуславливается регенеративным влиянием вибрационного следа, оставленного на поверхности резания предыдущим режущим зубом, что приводит к изменению толщины среза $a_{z\varphi}$, а следовательно к изменению силы резания и отжима фрезы (рис. 8).

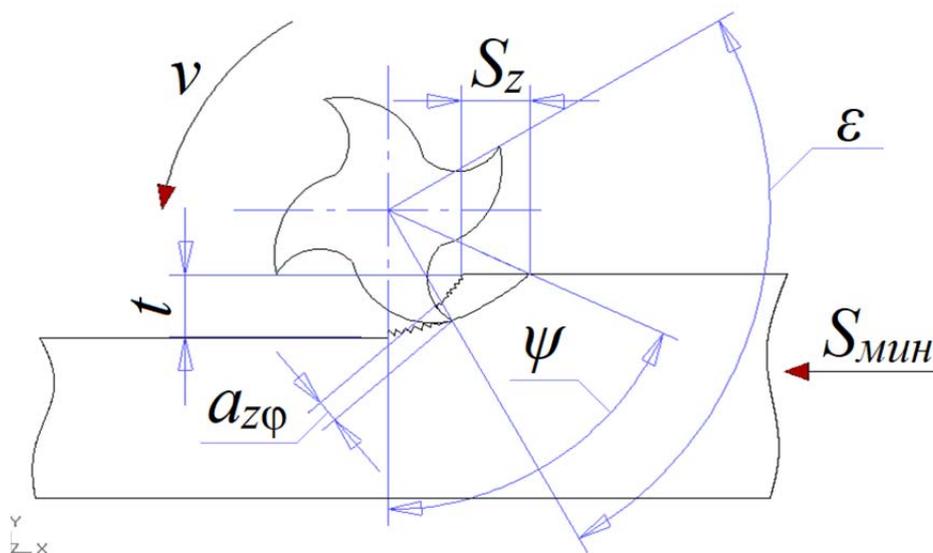


Рис. 8. Влияние вибрационного следа на изменение толщины среза

Для того, чтобы определить частоту и амплитуду автоколебаний, на рис. 7 представлен участок виброграммы, соответствующий работе одного зуба фрезы. Проведя соответствующие измерения и используя цифровую информацию, получили следующие данные: частота автоколебаний $f = 1000 \dots 1200$ Гц, что соответствует собственной частоте фрезы, а максимальное значение двойной амплитуды $2A_{авт} = 4 \dots 6$ мкм.

На основе опытов по измерению вибраций, выполненных в соответствии с таблицей, построены графики зависимостей амплитуды и частоты колебаний от параметров режима фрезерования: минутной подачи $S_{мин}$, частоты вращения фрезы n (скорости резания v) и ширины фрезерования B (рис. 9 – 11).

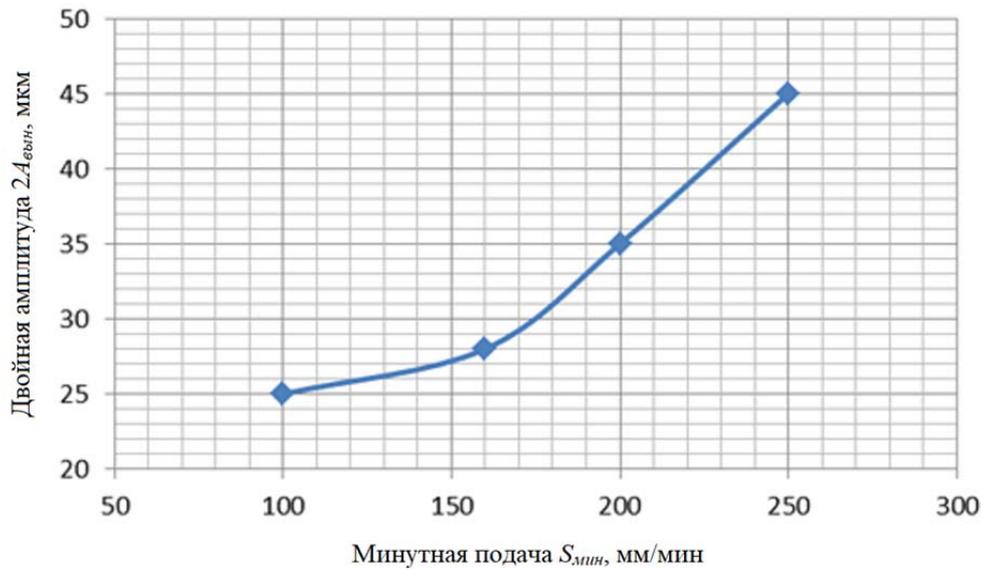


Рис. 9. Зависимость амплитуды колебаний от минутной подачи

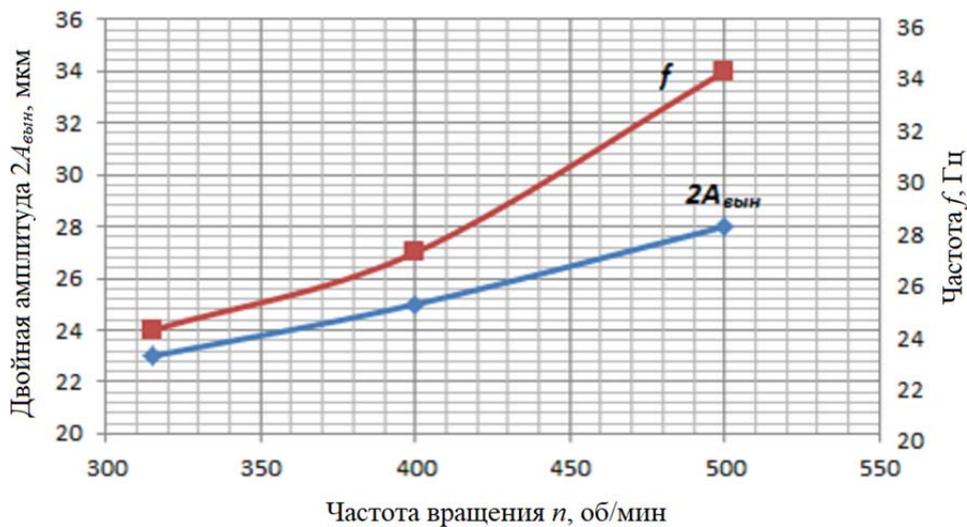


Рис. 10. Зависимости амплитуды и частоты колебаний от частоты вращения фрезы

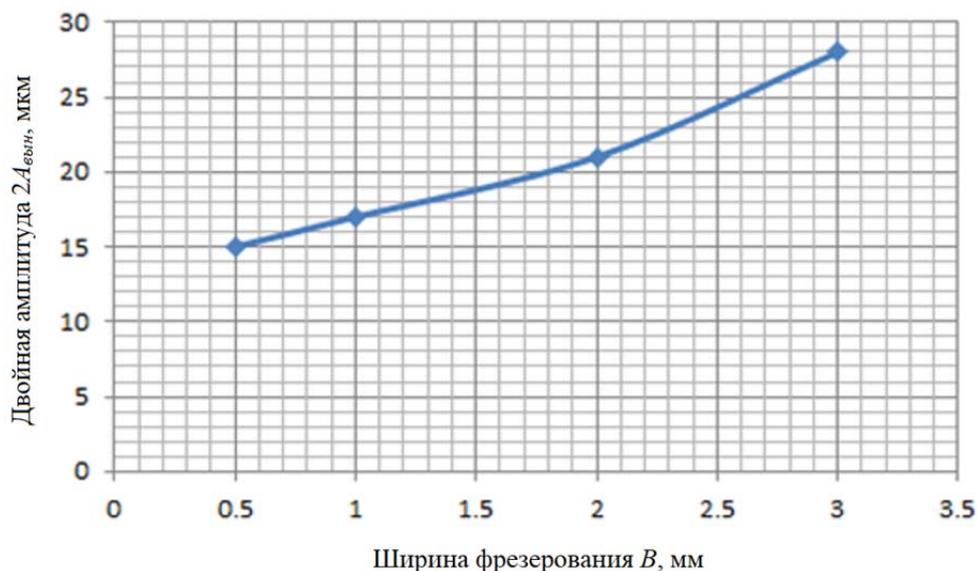


Рис. 11. Зависимость амплитуды колебаний от ширины фрезерования

Для снижения интенсивности вибраций было предложено использовать вместо четырёхзубых шестизубые фрезы. Как видно из представленных на рис. 12, 13 виброграмм, амплитуда вынужденных колебаний при работе шестизубой фрезой более чем в 2 раза меньше, чем при использовании четырёхзубых фрез.

При числе зубьев фрезы $z = 6$ центральный угол между зубьями оказывается равным углу контакта ψ . В результате устраняется прерывистость процесса резания, что приводит к снижению амплитуды колебаний, а это, в свою очередь, определяет более плавное и равномерное протекание процесса фрезерования.

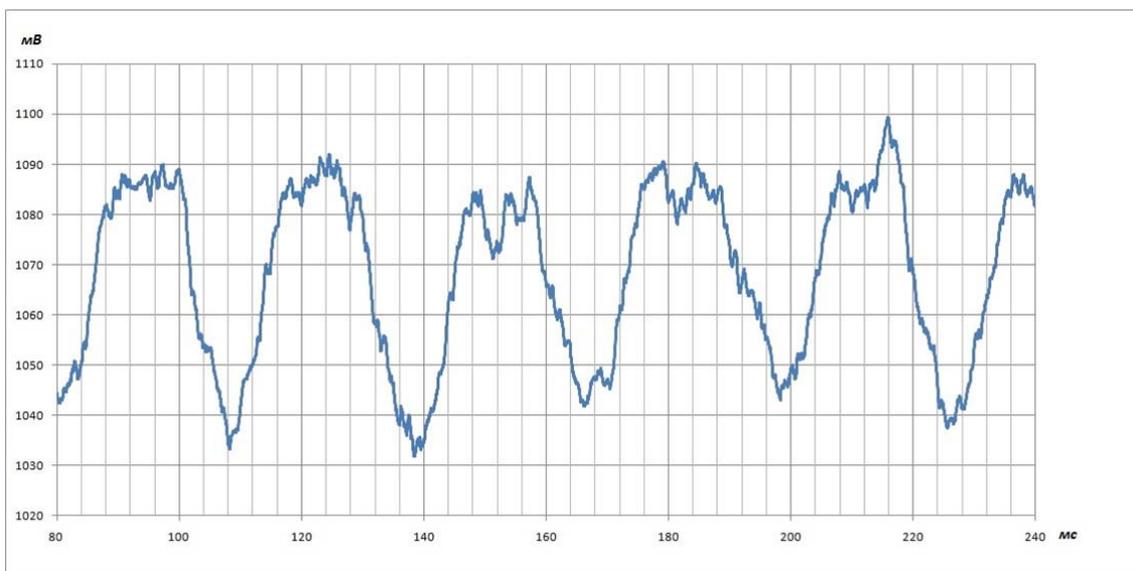


Рис. 12. Виброграмма колебаний при работе четырёхзубой фрезой

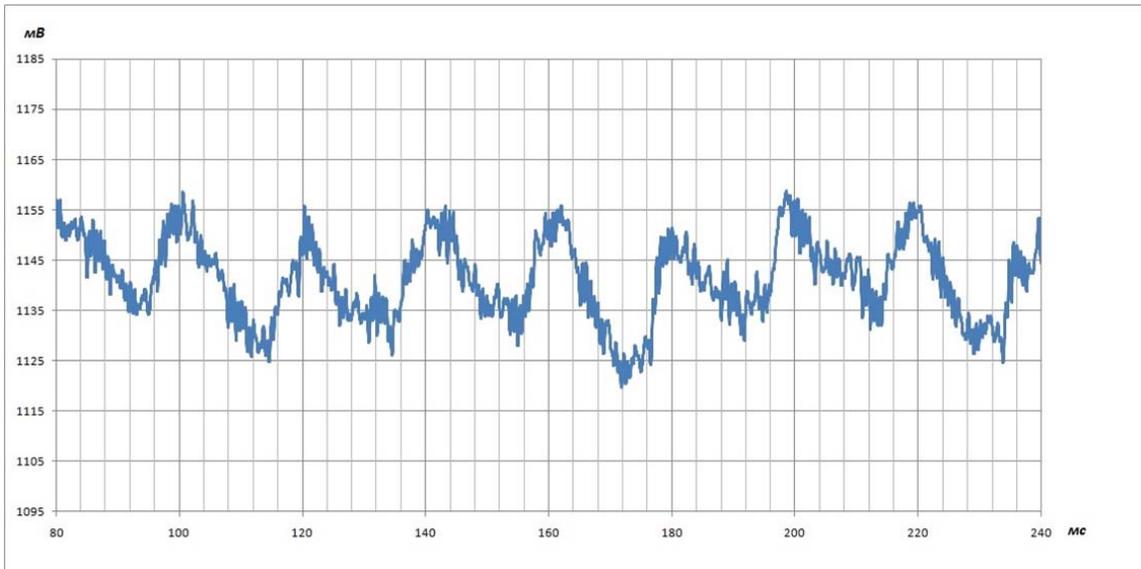
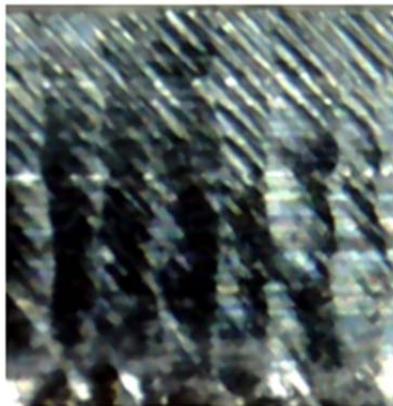
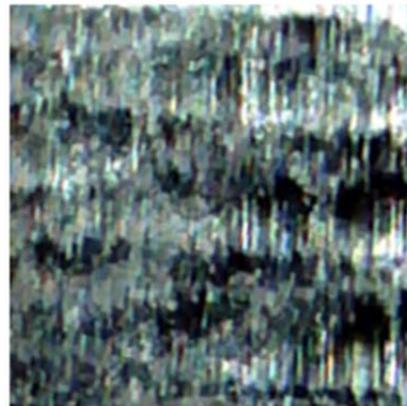


Рис. 13. Виброграмма колебаний при работе шестизубой фрезой

Кроме того, как видно из сопоставления вибрационных следов, оставляемых на поверхности заготовки режущими зубьями четырёхзубой и шестизубой фрезами (рис. 14), использование последних обеспечивает и лучшее качество обработанной поверхности.



а



б

Рис. 14. Вибрационные следы на поверхности детали, обработанной фрезами с различным числом зубьев: а – при работе четырёхзубой фрезой; б – при работе шестизубой фрезой

Исследование вибраций при концевом фрезеровании показало, что амплитуда вынужденных колебаний при работе шестизубыми фрезами в два и более раза меньше, чем при резании четырёхзубыми фрезами. При работе шестизубыми фрезами обеспечивается лучшее качество обработки.

Дополнительно проведённые исследования [7] показали, что шестизубые и четырёхзубые фрезы, изготовленные из твёрдых сплавов, при обработке титанового сплава BT9 обеспечивают период стойкости, равный соответственно десяти и шести часам.

Библиографический список

1. Ezugwu E.O., Bonney J., Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. V. 134, Iss. 2. P. 233-253. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)01042-7
2. Туранов А.В., Моисеева Л.Т., Лунев А.Н. К методике расчёта режимов фрезерования поверхностей лопаток ГТД // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2005. № 2. С. 60-64.
3. Башаров Р.Р., Кудояров Р.Г. Моделирование точности обработки при концевом фрезеровании деталей // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2013. № 1. С. 66-72.
4. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2004. V. 53, Iss. 2. P. 619-642. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60032-8
5. Жарков И.Г., Маркушин Е.М. Теоретическое исследование вибраций при резании металлов // В сб.: «Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов». Вып. 1. Куйбышев, 1973. С. 134-145.
6. Хаймович И.Н., Сурков О.С., Хаймович А.И. Практика применения специализированных технологических шаблонов процесса пятиосевой механической обработки лопаточных венцов моноколёс // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2016. № 1. С. 103-108.
7. Skuratov D.L., Zhidyaev A.N., Sazonov M.B. Solid carbide end mills tool life increase in titanium alloys machining by design development and rational choice of geometrical parameters // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. V. 9, Iss. 11. P. 767-770. DOI:10.3923/rjasci.2014.767.770
8. Бурмистров Е.В. Роль отставания силы резания от изменения толщины среза в возбуждении вибраций при обработке резанием // *Сборник тезисов докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Динамика станков»*. Куйбышев, 1980. С. 9-11.

RESEARCH ON END MILL VIBRATION IN MACHINING OF VT9 TITANIUM ALLOY

© 2021

M. B. Sazonov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor
of the Department of Engine Production Technology;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
sazonov.mihail.56@yandex.ru

A. N. Zhidyaev Senior Lecturer of the Department of Engine Production Technology;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
a.n.zhidyaev@gmail.com

The reason for the failure of carbide end mills is the chipping of the cutting edges at the transition from the radius edges to the helix edges on the cylindrical part of the cutter. One of the reasons for the chipping of the cutting edges are the vibrations of the end mills which arise due to the intermittent cutting process and the variability of forces acting on the end mill. The principle of operation of a vibration measuring device is considered which allows vibration measurements to be carried out when milling with an end mill. The main measuring elements of the device are two eddy current sensors that allow measuring the vibration displacement of the milling cutter in two directions – perpendicular and parallel to the movement of the longitudinal feed. The device has a compensation sensor that takes into account the influence of related factors, and a sensor for fixing the instantaneous rotation speed of the machine spindle. The milling cutter itself, fixed in a collet chuck, was used as an elastic element of the oscillating system. The data of measuring the amplitude of vibrations during milling of titanium alloy VT9 with a four-tooth and six-tooth end mill are presented. The study of vibrations of end mills

included two stages. At the first stage, the influence of milling parameters and modes, as well as milling schemes (up and down milling) on the frequency and amplitude was investigated. At the second stage, measures were worked out to reduce the intensity of vibrations and increase the reliability and durability of the milling cutters. The research results showed lower amplitude values when working with a six-tooth cutter.

Vibration; milling; end mill; titanium alloy; amplitude

Citation: Sazonov M.B., Zhidyaev A.N. Research on end mill vibration in machining of VT9 titanium alloy. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 4. P. 89-99. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-89-99

References

1. Ezugwu E.O., Bonney J., Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. V. 134, Iss. 2. P. 233-253. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)01042-7
2. Turanov A.V., Moiseyeva L.T., Lunyov A.N. On the method of calculating conditions of GTE blade surfaces milling. *Russian Aeronautics*. 2005. V. 48, Iss. 2. P. 91-100.
3. Basharov R.R., Kudoyarov R.G. On simulation of machining accuracy at end milling of parts. *Russian Aeronautics*. 2013. V. 56, Iss. 1. P. 90-98. DOI: 10.3103/S1068799813010133
4. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2004. V. 53, Iss. 2. P. 619-642. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60032-8
5. Zharkov I.G., Markushin E.M. Teoreticheskoe issledovanie vibratsiy pri rezanii metallov. *V sb.: «Issledovanie Obrabatyvaemosti Zharoprochnykh i Titanovykh Splavov»*. Vyp. 1. Kuybyshev, 1973. P. 134-145. (In Russ.)
6. Khaimovich I.N., Surkov O.S., Khaimovich A.I. Practice in the application of specialized technologic process patterns OF 5-axis machining operation of blade rings of blisks. *Russian Aeronautics*. 2016. V. 59, Iss. 1. P. 112-117. DOI: 10.3103/S1068799816010189
7. Skuratov D.L., Zhidyaev A.N., Sazonov M.B. Solid carbide end mills tool life increase in titanium alloys machining by design development and rational choice of geometrical parameters. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. V. 9, Iss. 11. P. 767-770. DOI:10.3923/rjasci.2014.767.770
8. Burmistrov E.V. Rol' otstavaniya sily rezaniya ot izmeneniya tolschiny sreza v vzbuzhdenii vibratsiy pri obrabotke rezaniem. *Sbornik tezisov dokladov Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Dinamika Stankov»*. Kuybyshev, 1980. P. 9-11. (In Russ.)