



ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Научная статья

УДК 681.2.088

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188835>

EDN: <https://www.elibrary.ru/SLZOLB>

Повышение информативности результатов измерений усилий резания при отработке технологии изготовления образцов из металлических и полимерно-композиционных материалов для прочностных испытаний

Сергей Анатольевич Болсуновский¹, Владимир Андреевич Пупчин^{2✉}, Сергей Анатольевич Титов³

^{1, 2, 3} Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),
Московская область, Жуковский, Российская Федерация

¹ sergey.bolsunovskiy@tsagi.ru

² vladimir.pupchin@tsagi.ru ✉

Аннотация. Изготовление образцов для прочностных испытаний в обеспечение сертификации авиационных конструкций, в том числе из полимерно-композиционных материалов, требует разработки технологии фрезерования на оборудовании с ЧПУ, обеспечивающей необходимые размерную точность и качество поверхности, а также отсутствие в образцах повреждений, которые могут оказать влияние на результаты проводимых экспериментов. В научно-производственном комплексе ЦАГИ для разработки технологии фрезерования применяется инструментальный программно-аппаратный комплекс на базе динамометрической платформы фирмы Kistler (Швейцария).

В статье предлагается алгоритм специальной обработки результатов измерений усилий резания с использованием динамометрической платформы, обеспечивающий повышение информативности технологического эксперимента за счет увеличения частоты дискретизации получаемого сигнала. Применение алгоритма позволило исключить влияние посторонних эффектов, возникающих при оцифровке сигнала, и повысить точность измерения силы резания, по сравнению с алгоритмами, применяемыми в составе программного комплекса Kistler Dynoware, поставляемого вместе с динамометрической платформой. Алгоритм реализован в виде отдельного модуля специализированного программного комплекса для обработки результатов измерений усилий резания.

Ключевые слова: образцы для прочностных испытаний, высокоскоростное фрезерование, механическая обработка полимерно-композиционных материалов, измерение силы резания при фрезеровании, динамометрическая платформа, обработка результатов измерений сил резания

Для цитирования: Болсуновский С.А., Пупчин В.А., Титов С.А. Повышение информативности результатов измерений усилий резания при отработке технологии изготовления образцов из металлических и полимерно-композиционных материалов для прочностных испытаний // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 3. С. 187–195. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188835>

TESTING OF THE FLYING VEHICLES COMPOSITE STRUCTURES ELEMENTS

Original article

Informativity Enhancing of the Cutting Force Measuring Results while Manufacturing Technology Try-Out of the Samples from Metal and Polymer-Composite Materials for the Strength Testing

Sergey A. Bolsunovskiy¹, Vladimir A. Pupchin^{2✉}, Sergey A. Titov³

^{1, 2, 3} Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI), Moscow Region, Zhukovsky, Russian Federation

¹ sergey.bolsunovskiy@tsagi.ru

² vladimir.pupchin@tsagi.ru ✉

Abstract

Samples manufacturing for the strength test to ensure aviation structures certification, including those from polymer-composite materials, requires milling technology development employing numerical program control equipment, which ensures the required accuracy in size and surface quality, as well as zero damages in the samples, which may affect the results of the experiments being conducted. TsAGI scientific and production complex applies the instrumental software-hardware complex based dynamometric platform from Kistler (Switzerland) to develop milling technology. The authors consider specifics of the measurements performed with piezoelectric dynamometers with limited data acquisition frequency and susceptible to the signal amplification of the high-frequency Fourier harmonics, associated with the platform resonant frequency of ~2 kHz. The article presents the results of such amplification impact on the signal. These signal specifics limit the possibilities for the measurements direct analysis, and require special methods application of the signal processing to increase the sampling frequency, retaining at the same time all high-frequency components of the high-order harmonics.

The authors consider development of an algorithm for special processing of the results of milling force measurements with the dynamometric platform by sampling frequency increasing of the received signal, which increases informativity of the technological experiment.

The article demonstrates the possibility of obtaining more accurate representation of the actual cutting force by the sampling frequency increasing of a single period using data from the other periods in a certain time range. The sampling frequency of the resulting signal is much higher (up to the several tenfold), but the signal is blurred due to the spindle rotation frequency determining error during technological experiment.

To overcome this problem, the authors proposed a method for the spindle speed refining based on the available experimental data. This method involves the spindle speed refining by optimizing the length of the curve that describes the cutting force cyclogram.

This algorithm application enables elimination of the extraneous effects occurring during the signal digitizing and accuracy increase of the cutting force measuring, compared with the algorithms used as part of the Kistler Dynoware software package supplied with the dynamometric platform. The algorithm was implemented as a separate module of the specialized software package for the cutting force measuring results processing.

Keywords: samples for strength tests, high-speed milling, polymer composite materials mechanical processing, cutting force measuring during milling, dynamometric platform, processing results of cutting force measuring

For citation: Bolsunovskiy S.A., Pupchin V.A., Titov S.A. Informativity Enhancing of the Cutting Force Measuring Results while Manufacturing Technology Try-Out of the Samples from Metal and Polymer-Composite Materials for the Strength Testing. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(3):187-195. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188835>

List of Figures

Fig. 1. The force measurement system: *a* – dynamometer platform, *b* – charge amplifier

Fig. 2. Long-period amplitude oscillations of the signal from the dynamometer platform

Fig. 3. Signal obtained by the signal sampling frequency increasing by the spindle speed set in the processing program

Fig. 4. Length dependence of the curves plotted by the points of the signal with increased sampling frequency on the spindle rotation frequency

Fig. 5. The result of the signal sampling frequency increasing with the selected spindle rotation frequency

List of Tables

Table. Main features of the cutting force measurement system

1. Введение

Развитие технологии механической фрезерной обработки металлических и полимерно-композиционных материалов (ПКМ) в значительной степени обеспечивают технологические лаборатории и соответствующие подразделения авиационных предприятий, с последующим переносом результатов их работ в производственные цеха [1–5]. Для отработки технологии применяются различные инструментальные технические средства, включающие, наряду с другими, средства регистрации усилий резания [6, 7]. Регистрация усилий резания в технологическом эксперименте позволяет проводить исследования и сравнительный анализ режущего инструмента, инструментальных сборок, выбирать рациональные траектории движения фрезы и сочетания технологических параметров для повышения производительности и качества механической фрезерной обработки [8, 9].

Данная задача решается в научно-производственном комплексе ЦАГИ применительно к разработке технологии изготовления на оборудовании с ЧПУ образцов для прочностных испытаний в обеспечение сертификации авиационных конструкций, в том числе из полимерно-композиционных материалов.

2. Постановка задачи

В технологических лабораториях для регистрации усилий резания традиционно используются динамометры различной конструкции, основанные на применении пьезоэлектрических датчиков. Токарная обработка, являющаяся непрерывным процессом, довольно легко может быть исследована такими динамометрами, устанавливаемыми в основание крепления резца. Фрезерование, применяемое при изготовлении образцов для прочностных испытаний, является прерывистым импульсным процессом. Частота прохода зуба фрезы при обработке ПКМ 4-перой фрезой составляет ~300 Гц, что усложняет исследование этого процесса с использованием динамометра. Наиболее распространенным является применение при фрезеровании динамометрической платформы, в основание которой устанавливаются датчики, фиксирующие силы, действующие на обрабатываемую заготовку со стороны фрезы. Платформа имеет достаточно

высокую жесткость (~10⁶ Н/мм) по ортогональным осям и в большинстве случаев не вносит искажений в систему СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь), образуемую станком и заготовкой, что позволяет обеспечить корректность измерений относительно реального технологического процесса в производстве. Соотношение жесткости и массы платформы определяет собственную частоту колебаний измерительной системы

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}},$$

что обуславливает необходимость частотной фильтрации сигнала (C – жесткость в направлении перемещения подвижной части динамометра; m – приведенная масса перемещающейся в этом же направлении части динамометра) [10].

Учитывая импульсный характер силы резания, для непосредственного анализа технологического процесса наиболее удобно использовать максимальные и средние значения силы резания, определяемые непосредственно по результатам измерений и на основе различных алгоритмов усреднения (скользящая средняя, скользящая медиана и т. д.) [11].

Несмотря на высокую степень достоверности и информативности такого анализа, он не предоставляет возможности для непосредственного измерения циклограммы силы резания, отражающей изменение силы резания при входе в материал и выходе из него последовательных зубьев фрезы из-за искажения формы сигнала, обусловленного недостаточной, по отношению к частоте вращения фрезы, частотой дискретизации измерительной системы [12]. Это может стать существенным ограничением для сравнительного анализа технологических процессов с целью рационального определения параметров фрезерования, обеспечивающих требуемое повышенное качество при фрезерной обработке образцов из металлических материалов и низкоповреждающую обработку образцов из полимерно-композиционных материалов. Благодаря минимизации технологических дефектов, образующихся при механической обработке деталей из ПКМ на обработанных кромках, повышаются статическая прочность и усталостная

долговечность испытуемых образцов и деталей конструкции из полимерно-композиционных материалов. Важность обеспечения низкоповреждающей обработки полимерно-композиционных материалов обоснована в работах [13, 14], где показано, что образцы, изготовленные по данной технологии, отличаются повышенными на 15–17% статическими и не менее чем в два раза усталостными прочностными характеристиками. Также существенно снижается статистический разброс их значений [15].

Стандартные программные средства, предоставляемые изготовителем силоизмерительных платформ Kistler, позволяют получить данные только о средних и, с определенными ограничениями, максимальных значениях регистрируемой силы резания. Корректное измерение циклограммы силы резания и обработка сигнала для устранения результатов резонансных вибраций пьезоэлектрических датчиков требуют специальной обработки сигнала, которую нельзя выполнить стандартными средствами поставляемого программного обеспечения Kistler Dynoware.

3. Силоизмерительная система

В научно-производственном комплексе ЦАГИ для разработки технологии и отработки технологических параметров фрезерования образцов для прочностных испытаний применяется динамометрическая платформа модели 9255B производства фирмы Kistler (рис. 1,а). В конструкции платформы используются четыре 3-компонентных пьезоэлектрических датчика силы с зарядовым выходом. Зарядовый сигнал с датчиков передается на зарядовый усилитель и преобразователь Kistler 5070A (рис. 1,б) для получения сигнала напряжения, который затем оцифровывается РСІ-платой.

Основные характеристики составленной таким образом силоизмерительной системы приведены в таблице.

Видно, что динамометрическая платформа на основе пьезоэлектрических датчиков обладает рядом достоинств по сравнению с динамометрами на тензорезисторах [16]:

- высокой чувствительностью, позволяющей регистрировать и изучать технологические процессы фрезерования мягких материалов типа алюминиевых сплавов и полимерно-композиционных материалов с малыми силами резания;
- низким температурным коэффициентом чувствительности;
- высокой жесткостью.

Частота дискретизации и собственная частота колебаний динамометрической платформы сравнительно невысокие и могут существенно ограничить область применения измерительной системы при исследовании высокочастотных процессов с короткими по времени импульсами силы, характерными для чистового фрезерования мягких металлических и полимерно-композиционных материалов.

4. Искажение сигнала в процессе измерения

Сигнал силы резания имеет периодический характер с основным периодом, равным времени между входом в заготовку следующих друг за другом зубьев фрезы:



Рис. 1. Система измерения усилий:
а – динамометрическая платформа;
б – зарядовый усилитель

Основные характеристики системы измерения силы резания

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Числовое значение
Калиброванный диапазон измеряемых усилий	F_x, F_y, F_z	кН	0 ... 2 0 ... 4
Порог измерений	—	Н	< 0,01
Жесткость	c_x, c_y, c_z	кН/мм	> 2 > 3
Собственная частота (крепление за фланцы)	$f_0(x,y), f_0(z)$	кГц	≈ 1,7 ≈ 2,0
Температурный коэффициент чувствительности	—	%/°C	–0,02
Частота дискретизации	f_d	кГц	5–10
Рабочая зона для установки обрабатываемой заготовки	—	мм	250 × 250

$$T_Z = \frac{60}{n \cdot Z}. \quad (1)$$

Данный периодический сигнал включает в себя также другие частотные составляющие, обусловленные несимметричностью установки режущих пластин (из-за чего толщина стружки разных зубьев несколько различается), вибрациями системы СПИД, а также влиянием резонанса динамометрической платформы на собственной частоте (см. таблицу).

Для обеспечения корректной оцифровки данных необходимо, чтобы наибольшая частота спектральной компоненты, присутствующей в записываемом сигнале, не превышала половины частоты дискретизации [17–19]. Частота дискретизации для используемого аналого-цифрового преобразователя составляет 7 кГц. Обработка фрезой малого диаметра производится с высокой частотой вращения шпинделя, в результате чего сигнал усилий резания содержит компоненты, намного превышающие половину частоты дискретизации. Как следствие, наблюдаются значительные длиннопериодические колебания амплитуды получаемого сигнала (рис. 2), тогда как реальная сила не изменяется во время всего процесса резания.

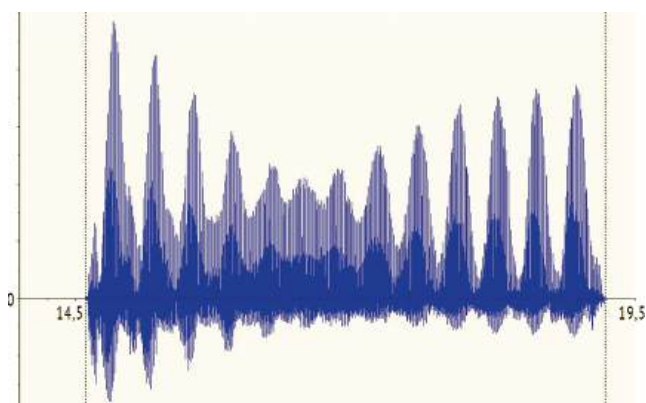


Рис. 2. Длиннопериодические колебания амплитуды сигнала с динамометрической платформы

5. Увеличение частоты дискретизации

Описанные длиннопериодические колебания значительно затрудняют анализ полученного сигнала и при этом не могут быть устранены фильтрацией сигнала после его оцифровки. Тем не менее при стабильном сигнале, хорошо повторяющемся от одного удара зуба к другому, мы имеем возможность получить более точное представление о реальной силе резания, увеличив частоту дискретизации сигнала на одном периоде, используя данные с других периодов в определенном временном диапазоне.

Преобразуем значения времени для точек некоторого фрагмента сигнала:

$$\tau = t - T_Z \left[\frac{t}{T_Z} \right], [x] — \text{целая часть числа } x, \quad (2)$$

где T_Z — период между входом в заготовку следующих друг за другом зубьев фрезы;

t — абсолютное время относительно начала измерения силы резания динамометрической платформы;

τ — время относительно условного начала периода сигнала, для которого увеличивается частота дискретизации.

После преобразования получим сигнал $F(\tau)$ длительностью один период с существенно большей частотой дискретизации, чем исходный сигнал, за счет наложения большого числа периодов. Преобразование (2) позволяет получить сигнал высокой степени детализации и качества при условии, что сила резания в исследуемом фрагменте времени измерения стабильна и повторяется от одного удара зуба к другому. В частности, рассматривается участок траектории движения инструмента и процесс резания с равномерной нагрузкой на инструмент и постоянным припуском без участков врезания в материал и переходов по воздуху.

В выражении (2) период T_Z , используемый в расчете, связан с частотой вращения шпинделя, которая задается в управляющей программе при выполнении обработки заготовки, установленной на динамометрической платформе. Фактическая частота вращения шпинделя немного отличается от заданной в программе. Это расхождение между используемым в расчете значением частоты вращения шпинделя и фактическим ее значением при обработке приводит к тому, что сигнал $F(\tau)$ оказывается «размытым» — накладываются друг на друга периоды немного смещены друг относительно друга. Применение выражения (2) к сигналу силы резания при использовании заданного в управляющей программе значения частоты вращения шпинделя показано на рис. 3.

В этом случае целесообразно уточнить частоту вращения шпинделя по имеющимся экспериментальным данным.

Располагая по возрастанию времени τ исходные точки сигнала при различных значениях периода удара зуба T_Z , полученных вариацией частоты вращения шпинделя в границах возможной погрешности, можно вычислить длину кривых, построенных по имеющимся точкам (рис. 4).

Рассматриваемая длина кривой определяется по циклограмме на рис. 3 в осях «сила—время» и на рис. 4 указана как безразмерная величина.

Фактическое значение периода между двумя последовательными зубьями фрезы определяется из условия минимальной длины, при которой

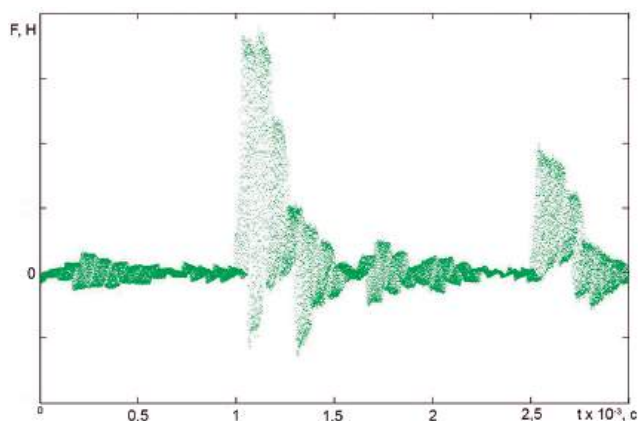


Рис. 3. Сигнал, полученный при увеличении частоты дискретизации сигнала с использованием заданной в программе обработки частоты вращения шпинделя

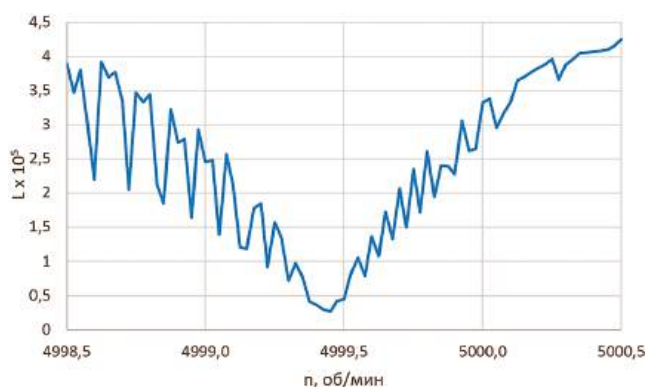


Рис. 4. Зависимость длины кривых, построенных по точкам сигнала с увеличенной частотой дискретизации, от частоты вращения шпинделя

точки сигнала имеют наименьшее отклонение от образовавшейся гладкой линии. В частности, из рис. 4 видно, что при заданной в управляющей программе частоте вращения шпинделя 5000 об/мин ее фактическое значение ниже и составляет 4999,45 об/мин.

Для исходных результатов измерения силы резания, представленных на рис. 3, был применен описанный алгоритм увеличения частоты дискретизации сигнала с учетом фактической частоты вращения шпинделя (рис. 5). Сопоставление циклограммы силы резания для одного периода на рис. 3 и 5 демонстрирует существенное снижение степени «размытости».

6. Применение алгоритма и программная реализация

Предложенный алгоритм дает возможность получить компоненты спектра сигнала на частоте много выше получастоты дискретизации. Таким образом, можно провести более качественную

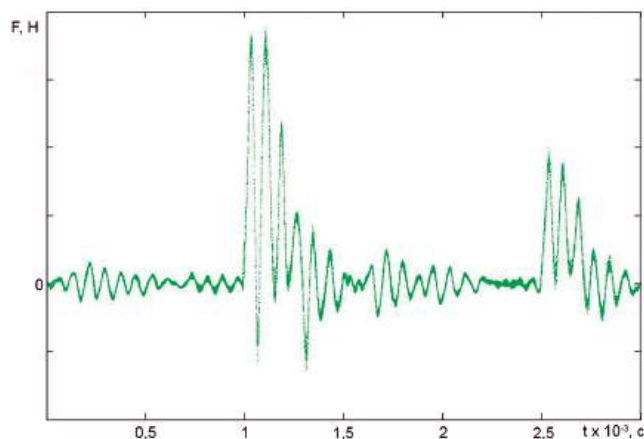


Рис. 5. Результат увеличения частоты дискретизации сигнала с подобранной частотой вращения шпинделя

фильтрацию сигнала с увеличенной частотой дискретизации.

После увеличения частоты дискретизации сигнал восстанавливается с использованием исходного времени, имевшегося в экспериментальных данных до выполненного преобразования (2). Применение данного алгоритма позволяет восстановить сигнал без ярко выраженных длиннопериодических колебаний (см. рис. 2), который может быть валиден при анализе и дальнейшей обработке, в том числе при определении удельных коэффициентов для расчета силы резания [20, 21].

Алгоритм был реализован в виде отдельного модуля специализированного программного комплекса для обработки результатов измерений усилий резания.

Традиционно технология механической обработки ПКМ разрабатывается на основе рекомендаций [5] для усредненного инструмента и обрабатываемого материала. Такие рекомендации в большинстве случаев не подходят для практического применения и приводят к значительному снижению прочностных и усталостных характеристик изготавливаемых деталей и узлов из-за возникающих повреждений. В частности, в справочниках не учитываются характеристики нанокомпонентов, используемых в современных связующих, а также характеристики износостойкого покрытия на режущем инструменте (состав которого является ноу-хау фирмы—производителя инструмента и поэтому неизвестен), существенно снижающего силу резания и микрповреждения за счет уменьшенного коэффициента трения и позволяющего повысить производительность обработки.

Применение предлагаемого алгоритма дает возможность на основе результатов измерения силы резания определить рациональный режим обработки

непосредственно для используемого инструмента и обрабатываемого ПКМ [15].

Важность измерения усилий резания с высокой точностью при разработке технологии механической обработки ПКМ показана также в работе [22] при математическом моделировании процесса резания [23–25] и при разработке новых типов режущего инструмента [26].

Выводы

Возможности циклограммы силы резания, отображающей процесс резания последовательными зубьями, ограничены ввиду импульсного характера

процесса фрезерования и недостаточной частоты съема данных с датчиков динамометрической платформы. Предложенный алгоритм повышения частоты дискретизации сигнала позволил существенно увеличить число точек, описывающих получаемый при измерении сигнал.

Применение предлагаемого алгоритма увеличения частоты дискретизации сигнала дает возможность восстановить действительную форму циклограммы усилий резания и избавиться от ложных осцилляций сигнала, вызванных резонансом силоизмерительного оборудования на высоких частотах.

Конфликт интересов / Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no relevant conflict of interests

Список источников / References

1. Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Гарифуллин К.А. и др. Повышение эффективности обработки деталей силовой части газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 183–192. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180661>
Migranov MS, Gusev AS, Garifullin KA, et al. Parts Machining Efficiency Upgrading of the Gas Turbine Engines Load-Bearing Part. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(2):183–192. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=180661>
2. Федорова Д.К., Иволга Д.В., Алексеев В.П. и др. Исследование обрабатываемости заготовок из стали 316L, полученных методом селективного лазерного сплавления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4(6). С. 1186–1190.
Fedorova DK, Ivolga DV, Alekseev VP, et al. Research of the milling properties of 316L billet made by SLM. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(4-6):1186–1190. (In Russ.),
3. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш. и др. Эффективность наноструктурированных износостойких покрытий при высокоскоростном фрезеровании титановых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 188–195. DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195
Grigor'ev SN, Volosova MA, Migranov MS, et al. Nano-structured wear-resistant coatings effectiveness at titanium alloys high-speed milling. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(2):188–195. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195
4. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш. и др. Диагностирование температурно-силовых условий лезвийной обработки деталей авиадвигателестроения инструментом с многослойными покрытиями // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 4. С. 231–242. DOI: 10.34759/vst-2022-4-231-242
Grigor'ev SN, Volosova MA, Migranov MS, et al. Temperature-force conditions diagnosing of the aircraft engine parts blade machining by the tools with multilayer coatings. *Aerospace MAI Journal*. 2022;29(4):231–242. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2022-4-231-242
5. Мордвин М.А., Якимов С.В., Баклушин С.М. Рекомендации по механической обработке композиционных материалов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2010. №2(46). С. 26–29.
Mordvin MA, Yakimov SV, Baklushin SM. Recommendations on machining of composite materials. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova*. 2010(2):26–29.
6. *Instruction Manual Quartz 3-Component Dynamometer Type 9255B*. Kistler Group, Winterthur, Switzerland; 2006. 42 p. URL: <https://www.manualslib.com/manual/3108517/Kistler-9255c.html#manual>
7. Лысянников А.В., Желукевич Р.Б., Кайзер Ю.Ф. Прибор для измерения усилий в процессе резания // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 1 (37). С. 91–94.
Lysyannikov AV, Zhelukevich RB, Kaizer YuF. Device for measuring of efforts in the cutting process. *Vestnik of Bryansk State Technical University*. 2013(1):91–94. (In Russ.),

8. Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А. и др. Расчетно-экспериментальная оценка рациональных технологических параметров высокопроизводительной фрезерной обработки в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства аэродинамических моделей самолетов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4(2). С. 374–379.
Bolsunovsky SA, Vermel VD, Gubanov GA, et al. Theoretical and experimental estimation of rational technological parameters for high-performance milling as a part of automated system for aerodynamic aircraft models production tooling. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(4-2):374–379. (In Russ.),
9. Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А. и др. Расчетная оценка и экспериментальное измерение усилий резания при чистовой высокоскоростной фрезерной обработки лопатки ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. 2012. №10/97. С. 16–19.
Bolsunovsky SA, Vermel VD, Gubanov GA, et al. Mathematical evaluation and experimental measurement of cutting forces during high-speed finishing of GTE blade. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2012(10):16–19. (In Russ.),
10. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 184 с.
Zharkov IG. *Vibrations of processing with bladed tool*. Leningrad: Mashinostroenie; 1986. 184 p. (In Russ.),
11. *Instruction Manual Dynoware Type 2825A1-2*. Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzerland; 2006. 70 p. URL: https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Kistler_CNC-DynoWare-How-to-use-it-En.pdf
12. Волков А.В., Устинов И.К. О реальных погрешностях определения сил резания с позиций теории измерений // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 4(9). С. 32–41.
Volkov AV, Ustinov IK. About real errors of definition of forces of cutting from positions of the theory of measurement. *Elektronnyi zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovanie*. 2016(4):32–41. (In Russ.).
13. Вермель В.Д., Евдокимов Ю.Ю., Калинин А.Г. и др. Контроль целостности образцов слоистого композита при исследовании влияния механической обработки на усталостную долговечность // Неразрушающий контроль композиционных материалов: Сборник трудов 4-й Международной научно-технической конференции НККМ-2020 «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов» (25–27 ноября 2020; Санкт-Петербург). Санкт-Петербург: СБЕН, 2021. С. 67–72.
Vermel VD, Evdokimov YuYu, Kalinin AG, et al. Monitoring the integrity of layered composite samples when studying the effect of mechanical processing on fatigue life. *Nerazrushayushchii kontrol' kompozitsionnykh materialov: sbornik trudov IV Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii NKKM-2020 "Pribory i metody nerazrushayushchego kontrolya kachestva izdelii i konstruksii iz kompozitsionnykh i neodnorodnykh materialov" (November 25–27, 2020; St. Petersburg)*. St. Petersburg: SVEN; 2021. p. 67–72. (In Russ.),
14. Болсуновский С.А., Зиняев В.В., Калинин А.Г. и др. Обеспечение низкоповреждающей механической обработки при изготовлении образцов для квалификации композиционных материалов в деталях авиационных конструкций // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2022): Материалы VI всероссийской научно-практической конференции с международным участием (10–14 октября 2022; Пермь). Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2022. С. 93–98.
Bolsunovsky SA, Zinyaev VV, Kalinin AG, et al. Ensuring low-damage machining during specimen fabrication for qualification of composite materials in aircraft structural components. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Innovatsionnye tekhnologii v materialovedenii i mashinostroenii" (October 10–14, 2022; Perm)*. Perm: PNIPU; 2022. p. 93–98. (In Russ.).
15. Барышников О.Е., Захаржевский П.А., Корнилов Г.А. и др. Способ определения оптимальных режимов резания полимерного композиционного материала. Патент RU 2847504 C1. Бюл. №28, 06.10.2025.
Baryshnikov OE, Zakharzhevskii PA, Kornilov GA, et al. *Polymer composite material optimum cutting modes determining method*. Patent RU 2847504 C1. Bull. 28, 06.10.2025. (In Russ.).
16. Реутов В.Н., Дорогов Н.В., Казаков В.А. и др. Трехкомпонентный динамометр для измерения составляющих усилия резания. Авторское свидетельство СССР SU 1543262 A1. Бюл. №6, 15.02.1990.
Reutov VN, Dorogov NV, Kazakov VA, et al. *Three-component dynamometer for cutting force components measuring*. Copyright certificate of the USSR SU 1543262 A1. Bull. 6, 15.02.1990. (In Russ.).
17. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход / Пер. с англ. И.Ю. Дорошенко, А.В. Назаренко. 2-е изд. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
Ifeachor EC, Jervis BW. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. 2nd ed. Prentice Hall; 2001. 933 p.
18. Солонина А.И., Клионский Д.М., Меркучева Т.В. и др. Цифровая обработка сигналов и MATLAB. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 512 с.
Solonina AI, Klionskii DM, Merkucheva TV, et al. *Digital signal processing and MATLAB*. St. Petersburg: BHV; 2013. 512 p. (In Russ.).
19. Vaseghi SV. *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*. 4th ed. John Wiley & Sons Limited; 2008. 546 p.

20. Анисимов В.В., Анисимов В.Н., Чуприна А.Л. Перспективные направления исследований в области измерения усилия резания при точении // Технические науки и технологии. 2016. № 1(3). С. 37–43.
Anisimov VV, Anisimov VN, Chuprina AL. Progressive research directions in the sphere of cutting forces measurement in turning. *Tekhnicheskie nauki i tekhnologii*. 2016(1):37–43. (In Russ.).
21. Bolsunovskiy S, Vermel V, Gubanov G. Cutting Forces Calculation and Experimental Measurement for 5-axis Ball End Milling. *Procedia CIRP. 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO; June 13–14, 2013; Turin, Italy)*. 2013;8:235–239. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.095
22. Ge J, Catalanotti G, Falzon BG, et al. Process characteristics, damage mechanisms and challenges in machining of fibre reinforced thermoplastic polymer (FRTP) composites: A review. *Composites part B: Engineering*. 2024;273:111247, DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111247
23. Song Y, Qu D, Wu B, et al. Composite light ropes model-based dynamics force prediction model of high speed dry milling UD-CF/PEEK considering size effect. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;76(3):210–222. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.069
24. Karpát Y, Bahtiyar O, Değer B. Milling force modelling of multidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates. *Procedia CIRP*. 2012;1(1):460–465. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.082
25. Cao H, Song Y, Wu B, et al. A force model of high-speed dry milling CF/PEEK considering fiber distribution characteristics. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;68:602–615. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.066
26. Duboust N, Pinna C, Ghadbeigi H, et al. FE modelling of CFRP machining- prediction of the effects of cutting edge rounding. *Procedia CIRP*. 2019;82:59–64. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.037

Статья поступила в редакцию / Received 29.06.2026
Одобрена после рецензирования / Revised 22.07.2026
Принята к публикации / Accepted 28.07.2026