



Разработка математической модели оптимизации процесса фрезерования для повышения предела выносливости изделий и минимизации напряжённости процесса резания

- | | |
|------------------------|--|
| Д. В. Евдокимов | доцент кафедры технологий производства двигателей летательных аппаратов;
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва;
email: dmitry.evd.ssau@gmail.com |
| В. Г. Павлов | студент института двигателей и энергетических установок;
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва;
email: homkov34@yandex.ru |
| А. Е. Штырлов | студент института двигателей и энергетических установок;
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва;
email: shtyrlov_03@mai.ru |

В представленной статье демонстрируется работа по постановке натурального и численного экспериментов, посвящённых процессу фрезерования сплавов Д16 и Л63. Результатами натуральных экспериментов стали зависимости, связывающие параметры шероховатости с параметрами режима фрезерования применительно для сплавов Д16 и Л63. Данные зависимости могут быть использованы при оптимизации технологических процессов, когда требуется назначить такие режимы обработки, которые обеспечат заданную конструктором шероховатость поверхности. Кроме этого, данные зависимости были использованы авторами для модернизации формул по определению эффективного коэффициента концентрации напряжений, что имеет практическую пользу на этапах конструкторско-технологической подготовки производства. Результатом численного эксперимента стали зависимости, позволяющие определять максимальные эквивалентные напряжения, возникающие по режущему участку фрез в процессе обработки исследуемых в данной работе сплавов. Комплексное применение результатов настоящего исследования способно оказать положительный эффект на производстве как при достижении максимального качества продукции, так и при обеспечении экономического развития предприятия, подбирая щадящие обрабатывающий инструмент режимы обработки.

Ключевые слова: фрезерование; шероховатость поверхности; качество поверхностного слоя; концентрация напряжений; напряжённо-деформированное состояние; латунный сплав; алюминиевый сплав; профилометр

Цитирование: Евдокимов, Д. В. Разработка математической модели оптимизации процесса фрезерования для повышения предела выносливости изделий и минимизации напряжённости процесса резания / Д. В. Евдокимов, В. Г. Павлов, А. Е. Штырлов, // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, №2. – С. 7–18. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-2-7-18

В настоящее время на производственных предприятиях особое внимание уделяется качеству поверхностного слоя изделий, поскольку его параметры существенно влияют на

прочность и долговечность изделий. Стремление повысить эффективность узлов и агрегатов делает этот вопрос ещё более актуальным, так как чаще всего оно приводит к увеличению интенсивности нагрузок, действующих на детали. Как правило, усложнение конструкции деталей является закономерным результатом работы конструктора, обеспечивающего надёжность высоконагруженного изделия. Детали, входящие в сборку таких изделий, имеют сложную схему нагружения, где с большой вероятностью будут присутствовать и наиболее опасные с позиции надёжности переменные нагрузки [1-2]. Как известно, в условиях переменного нагружения поверхностный слой детали накапливает микроскопические пластические деформации и трещины [3].

Исходя из этого, объяснимо, что с увеличением шероховатости поверхности процесс образования деформаций и трещин в поверхностном слое при переменном нагружении интенсифицируется [4-7]. В этой связи возникает потребность в разработке таких методик, которые позволяют подбирать наиболее выгодные режимы обработки, при которых будет достигаться максимальный ресурс изделий при соблюдении всех требований к параметрам качества поверхностного слоя, при этом учитывая технологические возможности инструмента в плане его стойкости и долговечности. В работах [8-11] представлены примеры методик, позволяющих проводить подобную оптимизацию технологических процессов для достижения наилучшего отдельного параметра качества продукции.

В данной работе представлен результат проведённого испытания, посвящённого исследованию влияния режимов механической обработки при фрезеровании сплавов Д16 и Л63 на шероховатость поверхности изделия. Известно, что сплав Л63 и его аналоги широко используются в производстве муфт, при изготовлении деталей криогенной техники, узлов запорной арматуры. К примерам наиболее ответственных изделий возможно отнести центробежные рабочие колёса водяных насосов, синхронизаторы коробок передач автомобилей, корпуса клапанов охлаждения поршневых двигателей самолётов, шестерни трансмиссии автомобилей и так далее. При этом немалая часть таких деталей изготавливается при активном применении фрезерных операций. С реальными примерами возможно ознакомиться из рисунка 1.

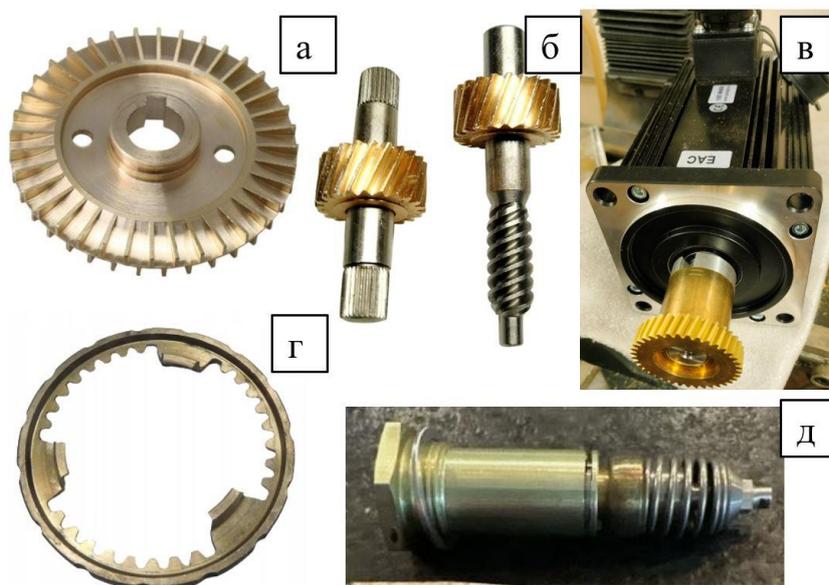


Рисунок 1 – Детали, выполненные из сплава Л63 и его аналогов: рабочее колесо водяного насоса (а), шестерня трансмиссии автомобиля «BMW 3 Series (E46)» (б), зубчатое колесо привода шпинделя модернизированного станка «ОPTIMUM BF20 Vario» (в), синхронизатор коробки передач автомобиля «Audi A4» (г), корпус клапана системы охлаждения двигателя самолёта «Cessna 172» в сборе (д)

Среди наиболее часто применяемых сплавов при производстве высоконагруженных изделий выделяется дюралюминиевый сплав Д16. Он отличается высокими прочностными характеристиками при небольшой плотности, благодаря чему он успешно используется для изготовления ответственных деталей, таких как корпусные элементы узлов силовых установок, входящих в сборку силовых конструкций машин или статических конструкций. При этом большое количество таких деталей изготавливается при самом активном применении фрезерования, с большим объёмом снимаемого материала. В этой связи исследование влияния процесса фрезерования на параметры качества поверхностного слоя, в частности шероховатости, становится особенно актуальным, например, для элементов обеспечения поперечной жёсткости центроплана гражданского самолёта (рисунок 2) [12, 13].

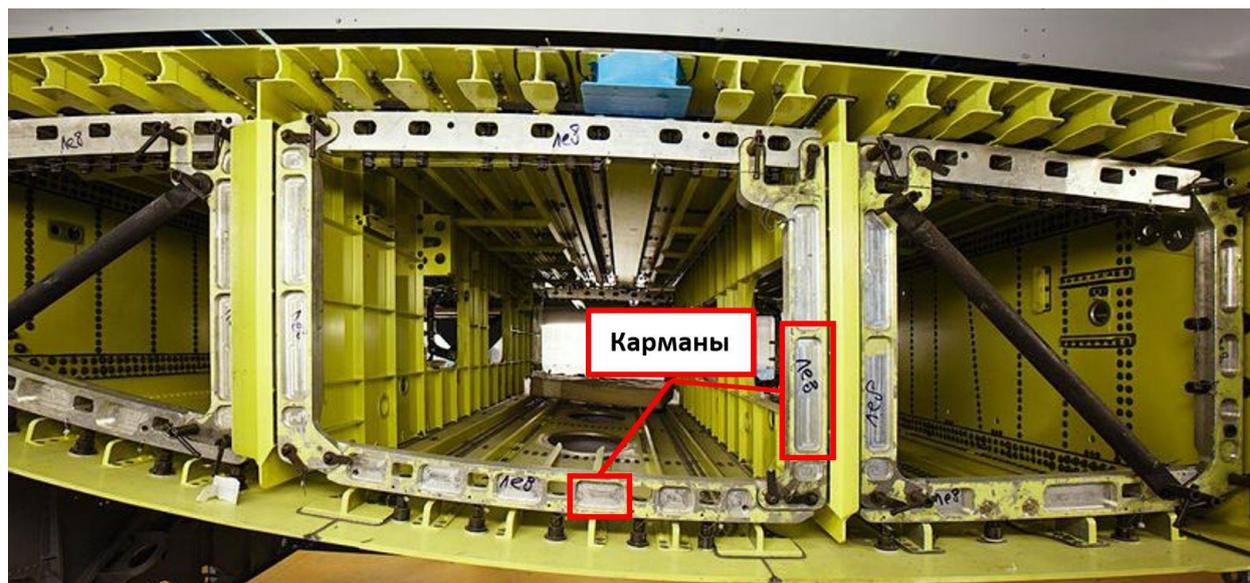


Рисунок 2 – Вид элементов обеспечения поперечной жёсткости центроплана гражданского самолёта (на элементах заметны многочисленные глубокие карманы, получаемые фрезерованием)

Для разработки математической модели, позволяющей учитывать условия фрезерной обработки при оценке напряжённно-деформированного состояния изделия были использованы зависимости по оценке коэффициентов снижения K предела выносливости при растяжении-сжатии или изгибе (1) и при кручении (2) [14-16]:

$$K = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v \cdot K_A}, \quad (1)$$

$$K = \left(\frac{K_{\tau}}{K_{d\tau}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v \cdot K_A}, \quad (2)$$

где K_{τ} , K_{σ} – эффективные коэффициенты концентрации напряжений при нормальных и касательных напряжениях, $K_{F\sigma}$, $K_{F\tau}$ – коэффициенты влияния шероховатости поверхности, K_v – коэффициент влияния упрочнения поверхностного слоя, K_d – коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения, K_A – коэффициент анизотропии.

При этом для определения коэффициентов влияния шероховатости поверхности используются следующие зависимости [16]:

при растяжении-сжатии или изгибе:

$$K_{F\sigma} = 1 - 0,22 \cdot \log R_z \cdot \left(\log \frac{\sigma_B}{20} - 1 \right), \quad (3)$$

при кручении:

$$K_{F\tau} = 0,575 \cdot K_{F\sigma} + 0,425, \quad (4)$$

где R_z – высота неровностей по 10 точкам, мкм; σ_B – предел прочности материала, МПа.

Представленная математическая зависимость позволяет определять коэффициент влияния шероховатости исходя из значений параметра шероховатости R_z и предела прочности материала σ_B . В данных параметрах состоит её потенциал к модификации за счёт замены параметра шероховатости R_z на параметры режима фрезерования. Данная мера позволяет связывать зависимости (3) и (4) с режимами фрезерования, назначаемыми на этапах разработки технологического процесса производства.

Практическая значимость заключена в том, что на этапах конструкторской подготовки производится оценка напряжённо-деформированного состояния изделия, где конструктором берётся в учёт состояние шероховатости поверхности, в то время как при разработке технологии производства изделия требуется назначить такие режимы обработки, при которых будет обеспечена заданная конструктором шероховатость. Также, подобные зависимости будут полезны при решении задач реверс-инжиниринга, когда требуется произвести оценку надёжности и ресурса уже готового изделия.

Для реализации этой цели был произведён натуральный полный факторный эксперимент, который позволяет получать степенные зависимости следующего вида:

$$R_z = C S_z^m \vartheta^n B^p,$$

где C – постоянный коэффициент; m , n и p – показатели степеней; S_z – подача на зуб при фрезеровании, мм/зуб; ϑ – скорость резания, м/мин; B – ширина фрезерования, мм.

Для обработки результатов эксперимента использовался метод планирования многофакторного эксперимента [17]. С видом выбранных для эксперимента заготовок из сплавов Д16 и Л63 возможно ознакомиться из рисунка 3, а и б соответственно.

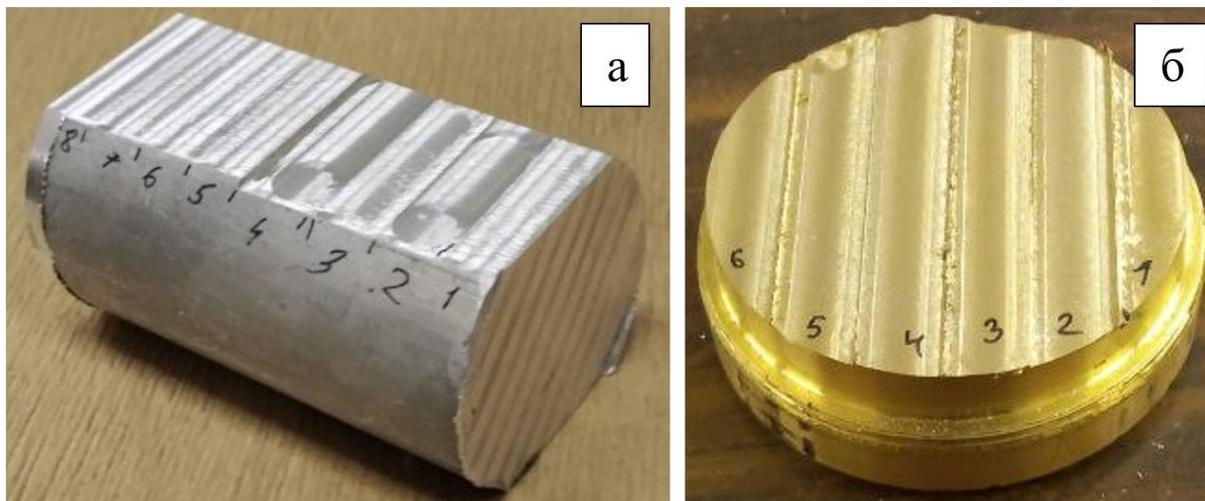


Рисунок 3 – Общий вид обработанных в ходе эксперимента заготовок, выполненных из сплавов Д16 (а) и Л63 (б)

Обработку было принято решение производить в тисках на фрезерном станке OPTIMUM BF20 Vario с модулем числового программного управления. Управление происходило с помощью блока управления Reiner CNC57 и программного пакета PUMOTIX. В качестве варьируемых в процессе эксперимента величин параметров режима фрезерования были выбраны: скорость резания v , глубина фрезерования t и подача на зуб S_z .

Таким образом, из составленной матрицы полного факторного эксперимента было получено 9 различных комбинаций режимов фрезерования. С учётом двух исследуемых материалов общее число исследуемых режимов составило 18, а с диапазоном режимов фрезерования можно ознакомиться из данных таблицы 1.

Таблица 1 – Диапазон параметров режимов фрезерования

Материал	Д-16			Л-63		
Величина	Ширина фрезерования B , мм	Скорость резания v , м/мин	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Ширина фрезерования B , мм	Скорость резания v , м/мин	Подача на зуб S_z , мм/зуб
max	2	94,248	0,05	1	113,135	0,01
min	1	31,416	0,02	0,3	22,619	0,0067
Инструмент	Фреза концевая, диаметр $d = 10$ мм, число зубьев $z = 4$			Фреза концевая, диаметр $d = 12$ мм, число зубьев $z = 5$		

Для проведения эксперимента были выбраны две фрезы, выполненные из быстрорежущей стали, с износостойким покрытием из нитрида титана. Фреза, которая использовалась при обработке сплава Д16, имела 4 зуба, передний угол $\gamma = 10^\circ$, задний угол $\alpha = 14^\circ$, угол наклона зубьев $\omega = 30^\circ$. Другая фреза, использованная при обработке сплава Л63, имела 5 зубьев, передний угол $\gamma = 12^\circ$, задний угол $\alpha = 15^\circ$, угол наклона зубьев $\omega = 30^\circ$.

С целью достижения равномерного припуска и чёткого соблюдения заданных величин параметров режима фрезерования перед сериями экспериментальных проходов на черновом режиме подготавливалась технологическая база. После каждой серии экспериментальных проходов заготовка вынималась из тисков и устанавливалась на профилометр БВ-7669, где проводились соответствующие замеры параметров шероховатости [18, 19]. Для каждой поверхности, сформированной в результате прохода на исследуемом режиме, было выполнено по 3 замера таких величин, как среднее арифметическое отклонение профиля R_a , высота микронеровностей по 10 точкам R_z и средний шаг неровностей S_m . Результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Величины параметров шероховатости, полученные в результате проведения эксперимента

Материал	Д-16			Л-63		
Режим	R_a , мкм	R_z , мкм	S_m , мкм	R_a , мкм	R_z , мкм	S_m , мкм
1	5,08	31,3	234	2,62	18,3	130
2	5,02	26,2	274	1,58	18,1	67,1
3	2,98	17,4	148	1,72	14,6	102
4	3,4	21,7	163	2,09	21,4	122
5	5,17	36,3	280	2,6	16,5	125
6	4,45	29,3	225	1,66	12,2	80,77
7	6,44	37,6	386	2,36	16,9	86,3
8	4,42	27,4	198	1,98	18	100
9	3,17	19,1	214	2,21	16,4	96,7

В результате обработки данных экспериментов методом планирования многофакторного эксперимента были получены следующие степенные зависимости:

Д16	Л63
$R_z = 23,678 \frac{9^{0,184} S_z^{0,133}}{B^{0,456}},$	$R_z = 14,889 \frac{B^{0,109}}{9^{0,083} S_z^{0,0551}},$
$R_a = 3,689 \frac{9^{0,162} S_z^{0,111}}{B^{0,335}},$	$R_a = 28,678 \frac{9^{0,0096} S_z^{0,584}}{B^{0,063}},$
$S_m = 218,842 \frac{9^{0,172} S_z^{0,178}}{B^{0,41}}.$	$S_m = 1056,042 \frac{B^{0,046} S_z^{0,482}}{9^{0,0308}}.$

Таким образом, зависимость для определения эффективного коэффициента концентрации напряжений возможно представить в виде:

$$K_F^{Д16} = 1 - 0,22 \cdot \log\left(23,678 \frac{9^{0,184} S_z^{0,133}}{B^{0,456}}\right) \cdot \left(\log \frac{\sigma_B}{20} - 1\right),$$

$$K_F^{Л63} = 1 - 0,22 \cdot \log\left(14,889 \frac{B^{0,109}}{9^{0,083} S_z^{0,0551}}\right) \cdot \left(\log \frac{\sigma_B}{20} - 1\right),$$

где зависимость $K_F^{Д16}$ применима для сплава Д16, а $K_F^{Л63}$ – для латуни Л63.

Заключительным этапом представленных в данной работе исследований был проведен численный эксперимент, в процессе которого оценивались максимальные напряжения, действующие на режущих кромках инструмента при таких условиях обработки, при которых проводился натурный эксперимент по определению шероховатости поверхности. Несмотря на изначальное понимание, что напряжения на режущих кромках не превысят критических значений, результаты данного эксперимента могут послужить в качестве референтных данных при экстраполяции поведения инструмента в экстремальных режимах. Это может быть актуальным при разработке более производительного технологического процесса или при наличии более сложных условий обработки. Кроме того, зависимости, позволяющие определять величину максимальных напряжений на кромке инструмента от параметров режима, могут быть полезными при решении многокритериальной оптимизации. Такой подход позволяет выбирать режимы обработки не только с точки зрения минимизации коэффициента снижения предела выносливости, но и минимальной нагрузки на режущие элементы инструмента. Выбор таких режимов обработки способствует снижению общей нагрузки на технологическую систему и продлевает срок службы инструмента, тем самым снижая затраты на его замену, что особенно важно при использовании дорогостоящего инструмента. К примеру, в работе [20] демонстрируется диаграмма распределения эквивалентных напряжений и амплитуды их изменения по передней поверхности режущего клина, где расположение пиковых значений напряжений коррелируется с расположением лунки износа. Это показывает непосредственную связь между локальными напряжениями и механизмами износа инструмента.

Для этого в программном комплексе T-Flex были разработаны конечно-элементные модели, состоящие из виртуальных тел рабочих участков фрез. С видом виртуальных геометрических участков фрез можно ознакомиться из рисунка 4.

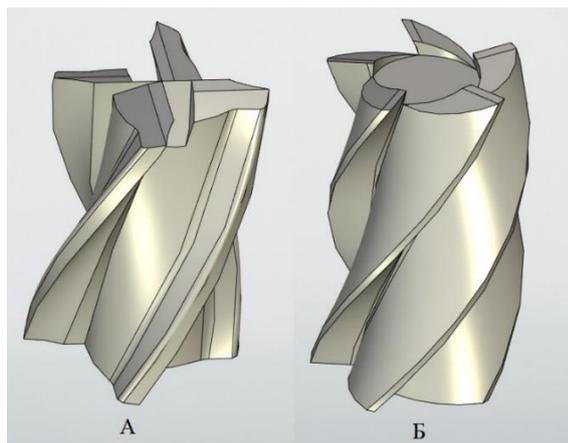


Рисунок 4 – Виртуальные геометрии режущих участков фрез для обработки сплава Д16(А) и сплава Л63(Б)

Для виртуальных тел конечно-элементных моделей были заданы исходные данные, необходимые для определения напряжённо-деформируемого состояния рабочих участков исследуемых фрез: физико-механические характеристики материалов, коэффициенты уравнений, описывающих пластическое поведение и разрушение материала. Кроме того, в соответствии с режимами обработки, применёнными в процессе натурального эксперимента, были определены компоненты силы резания, которые и являлись прикладываемыми к контактным поверхностям зубьев фрез в качестве нагрузки.

Зависимости, использованные для определения компонентов силы резания, представлены далее [21]:

$$P_z = \frac{10C_p t^x B^u S_z^y z}{D^q n^w},$$

$$P_x = 0,4P_z \tan \omega,$$

$$P_y = 0,6P_z,$$

где ω – угол наклона винтового зуба фрезы; C_p, x, u, y, q, w – коэффициент и показатели степени, зависящие от материала и способа фрезерования; n – число оборотов фрезы, об/мин; z – число зубьев фрезы; D – диаметр фрезы, мм; B – ширина фрезерования, мм.

В таблице 3 представлены результаты определения компонентов силы резания, соответствующей режимам фрезерования в процессе проведения натурального эксперимента по определению параметров шероховатости.

Таблица 3 – Результаты определения компонентов силы резания при фрезеровании

Глубина резания t , мм	Подача на зуб S_z , мм	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н
Сплав Д16				
2	0,05	197,6	118,6	45,6
2	0,02	102,2	61,3	23,6
1	0,05	108,9	65,3	25,5
1	0,02	56,3	33,78	13
1,5	0,035	119,4	71,6	27,5
Сплав Л63				
1	0,01	58,1	34,9	13,4
1	0,0067	43,5	26,1	10
0,3	0,01	20,6	12,4	4,7
0,3	0,0067	15,5	9,2	3,5
0,65	0,00835	35,2	21,2	8,1

В процессе определения напряжённно-деформируемого состояния рабочих участков фрез максимальные значения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ IV}}$ заносились в таблицу 4.

Таблица 4 – Значения максимальных эквивалентных напряжений, действующих по режущим зубьям фрез

Глубина, мм	Подача на зуб, мм	$\sigma_{\text{ЭКВ IV(max)}}$, МПа
Сплав Д-16		
2	0,05	380,4
2	0,02	197,6
1	0,05	209
1	0,02	108,4
1,5	0,035	230
Сплав Л-63		
1	0,01	201
1	0,0067	150,5
0,3	0,01	71
0,3	0,0067	53
0,65	0,00835	122

В таблицах 3 и 4, а также в полученных степенных зависимостях по определению максимальной величины эквивалентных напряжений, действующих на режущем участке фрезы, среди параметров режимов фрезерования нет скорости резания. Этот параметр был исключён на этапе проверки значимости коэффициентов регрессии.

На рисунке 5 представлен пример распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ IV}}$ по виртуальным конечно-элементным телам режущих участков фрез, полученных в результате проведённого численного эксперимента.

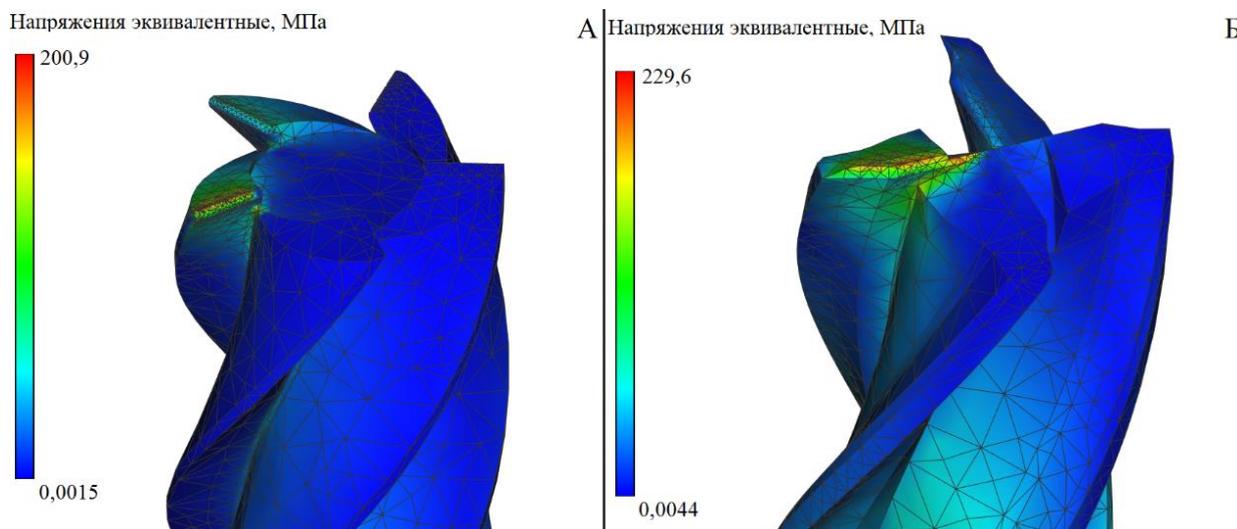


Рисунок 5 – Эквивалентные напряжения во фрезе (по 4 теории прочности) при первом режиме резания сплава Л63 (А) и девятом режиме резания сплава Д16 (Б) (см. табл. 2)

Таким образом, по результатам проведённого численного эксперимента были получены следующие степенные зависимости:

для сплава Д16:

$$\sigma_{\text{ЭКВ IV(max)}}^{\text{Д16}} = 951,6S_Z^{0,716} B^{0,865},$$

для сплава Л63:

$$\sigma_{\text{ЭКВ IV(max)}}^{\text{Л63}} = 2928,6S_Z^{0,726} B^{0,866}.$$

Для наглядности данные зависимости представлены в графической форме на рисунке 6.

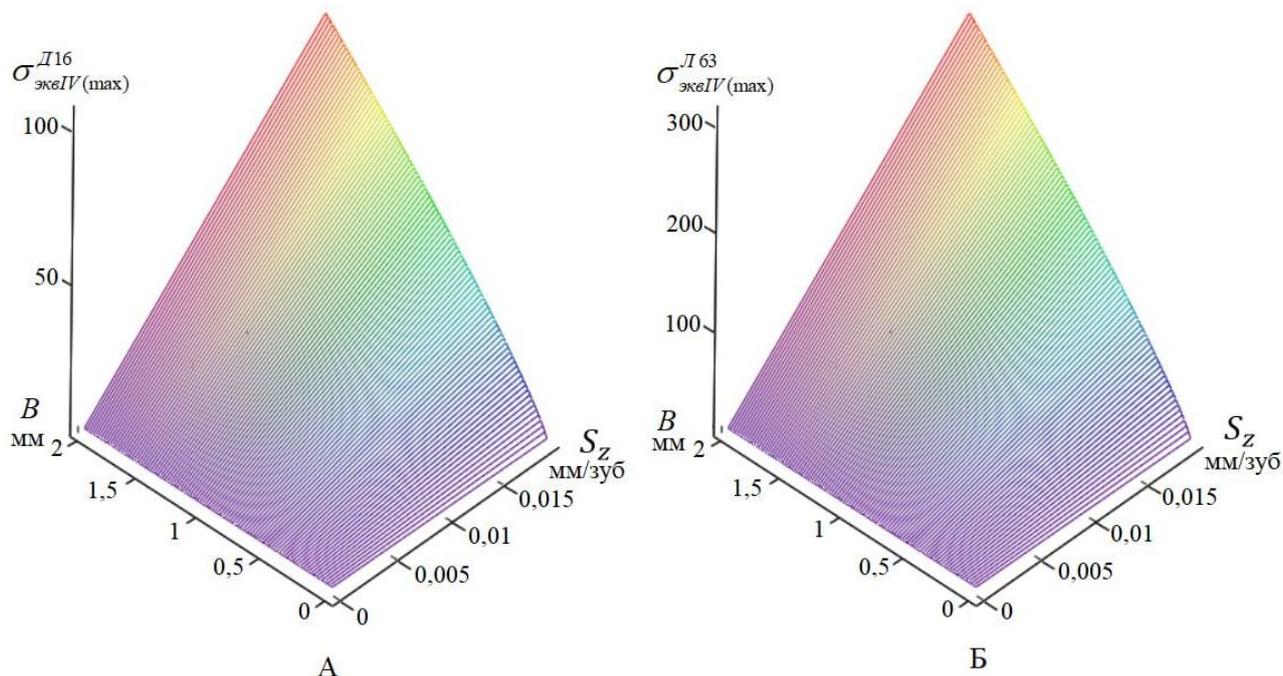


Рисунок 6 – Графическое отображение зависимостей по определению максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}^{IV}$, действующих по режущей части фрез от параметров режима фрезерования сплава Д16 (А) и сплава Л63 (Б)

Вывод: в результате проведённой работы были получены зависимости, связывающие параметры шероховатости поверхности с параметрами режима фрезерования для сплавов Д16 и Л63. Кроме того, были модифицированы зависимости для определения коэффициента снижения предела выносливости при растяжении-сжатии и кручении, что позволило установить их связь с параметрами режимов механической обработки.

Дополнительно проведён численный эксперимент, в ходе которого определены зависимости, связывающие величину максимальных напряжений, действующих на режущих кромках инструмента, с параметрами режима фрезерования. Эти результаты могут быть полезны для дальнейших исследований, направленных на анализ механизма разрушения инструмента и повышения его стойкости.

Предложенные зависимости могут использоваться в задачах многокритериальной оптимизации технологического процесса. Они позволяют задавать режимы фрезерования, обеспечивающие как достижение максимального предела выносливости поверхностного слоя изделия, так и минимизацию напряжённости инструмента. Работа по снижению напряжённости процесса резания может повлиять в лучшую сторону на уровень вибраций, что в свою очередь, в контексте обработки высокоточных изделий может в значительной мере улучшить качество поверхностного слоя.

Совместное использование разработанных зависимостей с методиками определения распределения температурных полей в зоне резания открывает возможности для создания моделей, направленных на снижение интенсивности износа инструмента. Это, в свою очередь, позволит повысить его стойкость, обеспечивая экономическую эффективность технологического процесса.

Список использованных источников

1. Акимов, В. М. Основы надёжности газотурбинных двигателей / В. М. Акимов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 207 с.
2. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / А. Г. Братухин, Г. К. Язов, Б. Е. Карасёв [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1997. – 416 с.
3. Куркин, С. А. Модели развития разрушения от дефектов типа несплошностей при циклическом нагружении, основанные на методах механики разрушения / С. А. Куркин // Контроль. Диагностика. – 1998. – № 2. – С. 17–20.
4. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – Москва : Машиностроение, 1988. – 240 с.
5. Alajmi M.S. Prediction and Optimization of Surface Roughness in A Turning Process Using the ANFIS-QPSO Method / M. S. Alajmi, A. M. Almehsal // Materials. – 2020. – V. 13, №13. – P. 1.
6. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 4. Анализ основных теоретических исследований теплофизики резания. Часть 2 / А. Л. Воронцов, Н. М. Султан-заде, А. Ю. Албагачиев, А. И. Савкин // Вестник машиностроения. – 2010. – №5. – С. 57-65
7. Жуков, Э. Л. Методы обеспечения заданной шероховатости обрабатываемой поверхности на операциях чистового точения / Э. Л. Жуков, Т. А. Ларионова, С. Л. Плавник // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2016. – №5. – С. 924
8. Li, J. G. Distortion caused by residual stresses in machining aeronautical aluminum alloy parts: recent advances / J. G. Li, S. Q. Wang // Int J Adv Manuf Technol. – 2017. – Vol. 89, no. 1. – P. 997-1012.
9. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов, Москва : Машиностроение. – 2000. – 320 с.
10. Скуратов, Д. Л. Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и режущие инструменты / Д. Л. Скуратов, В. Н. Трусов. – Самара : СГАУ, 2012. – 195 с.
11. Evdokimov, D. V. Development of a Finite Element Models and Method for Determining Residual Stresses in the Workpiece after the End Milling Operation / D. V. Evdokimov, D. L. Skuratov, A. S. Bukatuj // International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). – 2022. – P. 1-7.
12. Евдокимов, Д. В. Расчётное прогнозирование технологических остаточных деформаций лопаток ГТД на этапе концевого фрезерования / Д. В. Евдокимов, Д. Л. Скуратов, А. С. Букатый // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 24, №1. – С. 11-19
13. Овсеенко, А. Н. Технологические основы методов снижения остаточных деформаций и обеспечения качества обработки высоконагруженных деталей энергомаши: автореферат диссертации ... доктора технических наук / А. Н. Овсеенко. – Москва, 2006. – 32 с.
14. Нейбер, Г. Концентрация напряжений / Г. Нейбер. – Москва : Гостехиздат, 1947. – 204 с.
15. Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Р. Петерсон. – Москва : Мир, 1977. – 301 с.
16. ГОСТ 25.504-82. Методы расчёта характеристик сопротивления усталости. – Москва : Стандартинформ, 1983. – 55с.
17. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии. / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – Киев : Вища школа, 1976. – 184 с.
18. Ковалёва, А. А. Оценка шероховатостей поверхностей деталей машин с износостойкими газотермическими покрытиями при токарной обработке / А. А. Ковалёва, А. А. Краско, Н. В. Рогов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2022. – №6. – С. 56–64.
19. Саклакова, А. Е. Экспериментальное исследование шероховатости поверхности детали из теплостойкой стали после точения режущими пластинами из твердого сплава / А. Е. Саклакова, Ю. Н. Селина, М. А. Симаков, Ю. А. Филиппов // Решетневские чтения. – 2016. – Т. 1. – С. 577.
20. Табаков, В. П. Функциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями / В. П. Табаков, А. С. Верещака, С. Н. Григорьев. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 172 с.
21. Козлов, В. Н. Расчёт режимов, сил и мощности резания / В. Н. Козлов. – Томск : изд-во ТПУ, 2014. – 29с.

Development of a mathematical model for optimizing the milling process to increase the fatigue limit of products and minimize the stress of the cutting process

D. V. Evdokimov	Associate Professor of the Department of Aircraft Engine Production; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; email: dmitry.evd.ssau@gmail.com
V. G. Pavlov	Student of Institute of Engines and Power Plants; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; email: homkov34@yandex.ru
A. E. Shtyrlov	Student of Institute of Engines and Power Plants; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; email: shtyrlov_03@mai.ru

The presented article demonstrates the work on setting up full-scale and numerical experiments on the milling process of D16 and L63 alloys. The results of field experiments were dependences linking the roughness parameters with the parameters of the milling mode applied to alloys D16 and L63. These dependencies can be used to optimize technological processes when it is necessary to assign such processing modes that will ensure the surface roughness specified by the designer. In addition, these dependencies were used by the authors to modernize the formulas for determining the effective stress concentration coefficient, which has practical benefits at the stages of design and technological preparation of production. The result of the numerical experiment were dependences that allow us to determine the maximum equivalent stresses that occur along the cutting section of the cutters during processing of the alloys studied in this work. The integrated application of the results of this study can have a positive impact on production both in achieving maximum product quality and in ensuring the economic development of the enterprise by choosing processing modes that spare the processing tool.

Keywords: milling; surface roughness; surface layer quality; stress concentration; stress-strain state; brass alloy; aluminum alloy; profilometer

Citation: Evdokimov, D. V., Pavlov, V. G. and Shtyrlov, A. E. (2025), "Development of a mathematical model for optimizing the milling process to increase the fatigue limit of products and minimize the stress of the cutting process", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 11, no. 2, pp. 7-18. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-2-7-18 (In Russian; abstract in English).

References

1. Akimov, V. M. (1981), *Osnovy nadezhnosti gazoturbinykh dvigateley* [Fundamentals of reliability of gas turbine engines], Mashinostroenie Publ., Moscow, 207p. (In Russian).
2. Bratuhin, A. G., Yazov, G. K., Karasev, B. E., Eliseev, Y. S., Krymov, E. E. and Nezhurin, E. P. (1997), *Sovremennye tehnologii v proizvodstve gazoturbinykh dvigateley* [Modern technologies in the production of gas turbine engines], Mashinostroenie Publ., Moscow, 416p. (In Russian).
3. Kurkin, S. A. (1998), "Models of the development of fracture from defects such as discontinuities under cyclic loading, based on methods of fracture mechanics", *Control' i diagnostika*, no. 2, pp. 17-20. (In Russian).
4. Sulima, A. M., Shulov, V. A. and Yagodkin, Y. D. (1988), *Poverhostnyy sloy i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin* [Surface layer and performance properties of machine parts], Mashinostroenie Publ., Moscow, 240p. (In Russian).
5. Alajmi, M. S. and Almeshal, A. M. (2020), "Prediction and Optimization of Surface Roughness in A Turning Process Using the ANFIS-QPSO Method", *Materials*, vol. 13, no. 13, pp. 1.
6. Vorontsov, A. L., Sultan-zade, N. M. and Albagachiev, A. Y. (2010), "Development of a new theory of thermal cutting processes. 4. Analysis of the main theoretical studies of thermal physics of cutting. Part 2", *Vestnik mashinostroeniya*, no. 5, pp. 57-65. (In Russian).

7. Zhulov, E. L., Larionova, T. V. and Plavnik, S. L. (2016), "Methods for ensuring a given roughness of the treated surface during finishing turning operations", *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, no. 5, pp. 924. (In Russian).
8. Li, J. G. and Wang, S. Q. (2017), "Distortion caused by residual stresses in machining aeronautical aluminum alloy parts: recent advances", *Int J Adv Manuf Technol.*, vol. 89, no. 1, pp. 997-1012.
9. Suslov, A. G. (2000), *Kachestvo poverhnostnogo sloya detaley mashin* [The quality of the surface layer of machine parts], Mashinostroenie Publ., Moscow, 320 p. (In Russian).
10. Skuratov, D. L. and Trusov, V. N. (2012), *Obrabotka konstruktsionnykh materialov. Protsessy rezaniya i rezhushchie instrumenty* [Processing of structural materials. Cutting processes and cutting tools], SSAU Publ., Samara, 195 p. (In Russian).
11. Evdokimov, D. V., Skuratov, D. L. and Bukatyj, A. S. (2022), "Development of a Finite Element Models and Method for Determining Residual Stresses in the Workpiece after the End Milling Operation", *International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM)*, pp. 1-7. (In Russian).
12. Evdokimov, D. V., Skuratov, D. L. and Bukatyj, A. S. (2021), "Technological residual deformations prediction of GTE blades by numerical method after end milling", *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 24, no. 1, pp. 11-19. (In Russian).
13. Ovseenko, A. N. (2006), *Tehnologicheskie osnovy snizheniya ostatozhnykh deformatsiy i obespecheniya kachestva obrabotki vysoko nagruzhennykh detaley energomashin* [Technological bases of methods for reducing residual deformations and ensuring the quality of processing of highly loaded parts of power engineering], Ph.D. Thesis, Moscow, 32 p. (In Russian).
14. Nayber, G. (1947), *Kontsentratsiya napryazheniy* [Stress concentration], Gostehizdast Publ., Moscow, 204 p. (In Russian).
15. Peterson, P. (1977), *Koeffitsienty kontsentratsii napryazheniy* [Stress concentration coefficients], Mir Publ., Moscow, 301p. (In Russian).
16. GOST 25.504-82 (1977), *Mobil'nyy spekl-interferometr dlya issledovaniya form kolebaniy vibriruyushchikh ob'ektov vo vnestendovykh usloviyakh* [Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behaviour calculation], Standartinform, Moscow, 55 p. (In Russian).
17. Bondar', A. G. and Statyuha, G. A. (1976), *Planirovanie eksperimrnta v himicheskoy tohnologii* [Planning an experiment in chemical technology], Vishcha shkola Publ., Kiev, 184 p. (In Russian).
18. Kovaleva, A. A., Krasko, A. A. and Rogov, N. V. (2022), "Assessment of surface roughness of machine parts with wear-resistant gas-thermal coatings during turning", *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, no. 6, pp. 56-64. (In Russian).
19. Salakova, A. E., Selina, Y. N., Simakov, M. A. and Filippov, Y. A. (2016), "Experimental study of the surface roughness of a heat-resistant steel part after turning with hard alloy cutting plates", *Reshetnevskye chteniya*, vol. 1, p. 577. (In Russian).
20. Tabakov, V. P., Vereshchaka, A. S. and Grigoriev, S. N. (2012), *Funktsional'nye parametry protsessa rezaniya rezhushchim instrumentom s iznosostoykimi pokrytiyami* [Functional parameters of the cutting process with wear-resistant coatings], UISTU Publ., Ulyanovsk, 172 p. (In Russian).
21. Kozlov, V. N. (2014), *Raschet rezhimiv, sil i moshchnosti rezaniya* [Calculation of cutting modes, forces and power], TPU Publ., Tomsk, 29p. (In Russian).