

Д.Н. Шабалин¹, Юань Чжэньюэ², Ши Шуаньюань³

СНИЖЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ "КРЫЛЬЧАТКА ТУРБИНЫ" ЗА СЧЕТ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



¹Шабалин Дмитрий Николаевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (911)038-2374, E-mail: shadmit@yandex.ru.



²Юань Чжэньюэ,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(911)729-0785, E-mail: yuan5.ch@edu.spbstu.ru.



³Ши Шуаньюань,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(911)995-2622, E-mail: bravoshi@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы повышения производительности детали «Интегральная крыльчатка» (далее Крыльчатка). Деталь широко используется в области турбостроения, компрессоростроения, авиа- и двигателестроения. Она является частью системы трансмиссии, включает тонкие лопасти и обеспечивает большую частоту вращения. Крыльчатка является сложной криволинейной поверхностью. Качество обработки напрямую влияет на аэродинамические характеристики и эффективность работы. При этом Крыльчатка является типичной тонкостенной деталью, При механической обработке возникают проблемы: несовпадение размера, неравномерная толщина и деформация лопатки во время обработки за счет

различных факторов резания. В данной статье рассмотрены способы повышения эффективности обработки, точности и эффективности изготовления крыльчатки, исключения столкновения инструментов с заготовкой, что существенно влияет на трудоёмкость изготовления крыльчатки, а, следовательно, и на её технологическую себестоимость. Для этого используется цифровое оборудования, проводится моделирование процесса, проверяется траектории режущего инструмента.

Ключевые слова: Интегральная крыльчатка, цифровое оборудование, моделирование, механическая обработка, технологическая себестоимость.

Введение

Крыльчатка турбины представляет собой деталь, в которой газ или жидкость под высоким давлением течёт в осевом направлении, она обычно обрабатывается с использованием заготовок ковочного типа из титанового или алюминиевого сплава. Так как крыльчатка имеет криволинейную поверхность, то процесс её проектирования и изготовление представляет сложную задачу. Аналогичные детали сложно обрабатывать с высокой эффективностью и высокой точностью [1].

Традиционный производственный процесс изготовления крыльчатки основан на полировке отливок, электроэрозионной обработке и профильном фрезеровании. Изделия имеют невысокую точность, низкую прочность и качество [2]. В последние годы при применения современного цифрового оборудования, оснащенного числовым программным управлением (ЧПУ) на станках с многоосевой обработкой, возможно промоделировать изготовление детали «Интегральная крыльчатка».

Применяя технологию многоосевой обработки с ЧПУ, в данной статье сделано моделирование траектории движения инструмента, постобработка и оптимизация топологии крыльчатки. Оптимизированная крыльчатка имеет более высокую производительность, эффективность работы, точность и меньшую трудоёмкость изготовления.

Методы

CAD/CAM система автоматизированного проектирования NX10 используется для 3D-моделирования Крыльчатки турбины, а затем модуль обработки применяется для моделирования траектории движения инструмента, выбора станка и постпроцессора. После этого получаем управляющую программу (УП) для оборудования с ЧПУ для любого станка, имеющегося в постпроцессоре.

Далее используется ANSYS для анализа модального анализа, анализа вибрации, оптимизации топологии и анализа поля потока крыльчатки,

завершения оптимизации крыльчатки, оптимизации с точки зрения структуры, и материалов, и снижения затрат [3].

План обработки для детали «Крыльчатка»

Деталь - рабочее колесо турбины, материал - алюминиевый сплав, допуск на размер $\pm 0,02$ мм. Тип заготовки - горячая ковка. Чтобы сократить трудоёмкость черновой обработки на станке с ЧПУ, необходимо на токарном станке удалить материал при черновой обработке, а затем выполнить фрезерование на многокоординатном станке с ЧПУ (рис 1).

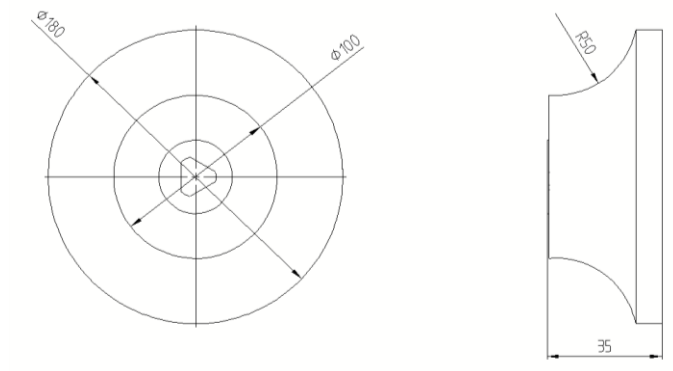


Рис. 1. Эскиз заготовки

Традиционный производственный процесс крыльчатки отличается низкой точностью, низкой прочностью, низким качеством и существенной трудоёмкостью.

Возможно изготовление Крыльчатки с применением многоосевой обработки на станке с ЧПУ, что обеспечивает сокращение количества повторных зажимов, мониторинг скорости подачи, оптимизацию траектории инструмента, повышение точности размеров детали за счет использования оборудования с ЧПУ.

Используя современные CAD/CAM системы, возможно просчитать выгоду от использования современного оборудования [4].

Таблица 1. Параметры процесса

Процесс	Режущий инструмент	Частота вращения шпинделя (r/min)	Скорость резания (m/min)	Подача на зуб (mm/r)	Время обработки крыльчатки (min)
Черновая обработка «Крыльчатки»	концевая сферическая фреза	13000	81	0.0096	20:07:52
Точная обработка «Ступица крыльчатки»		12000	75	0.0104	08:42:39
Чистовая обработка «Крыльчатки»		14500	91	0.0086	1:10:14:23
Обработка "бегунков" «Крыльчатки»		15000	94	0.0083	01:52:52

Инструмент: концевая сферическая фреза

Материал: быстрорежущая сталь

Общая длина: 75 мм/Длина резки: 50 мм

Для проведения трехмерного моделирования предлагается использовать программное обеспечение NX (рис 3). Траектория лопатки Крыльчатки рисует внешний контур через сплайн-кривую. Для выполнения сложного моделирования поверхности необходимо получить координатные точки в сплайне, как показано на рис. 2 [5].

13.58787387	17.93408887	63	27.33314917	39.45768952	63
9.764031018	21.49632495	54.61	19.56802822	43.85165147	56.7
8.015560771	24.47029701	46.42	14.20043902	46.44750706	50.44
7.40730168	27.93521358	38.56	10.32394411	48.82043252	44.29
7.360607117	32.1689255	31.16	7.383088759	51.47274053	38.36
7.42049187	37.26793901	24.33	4.961400371	54.60531061	32.74
7.172952352	43.22893299	18.18	2.730103449	58.27572463	27.51
6.212080801	49.97520743	12.8	0.424302689	62.46850746	22.71
4.130537216	57.36139686	8.28	-2.184025996	67.1345163	18.59
0.503965548	65.17761097	4.7	-5.258298529	72.16829861	15.03
-4.992635129	73.06961762	2.1	-8.873576843	77.44336446	12.15
-12.55201255	80.57861369	0.52	-12.99732157	82.85661103	10
-22.21802104	87.21496177	0	-17.41547637	88.29931442	8.6
10.94888787	19.6556913	63	25.12194737	40.90071399	63
6.835166048	22.59884161	54.61	17.12829329	44.8615517	56.7
5.015343925	25.25693725	46.42	11.66475343	47.14845184	50.44
4.388737853	28.564894	38.56	7.76003705	49.29247656	44.29
4.324812365	32.71540078	31.16	4.82671622	51.77607111	38.36
4.360658799	37.74960018	24.33	2.435085103	54.77591004	32.74
4.093442204	43.628269	18.18	0.249721752	58.33953404	27.51
3.13984292	50.25749168	12.8	-1.992867131	62.43838999	22.71
1.115204641	57.49945287	8.28	-4.517233309	67.01804897	18.59
-2.364705731	65.13732331	4.7	-7.48434655	71.97163848	15.03
-7.603213623	72.84435127	2.1	-10.96662574	77.17440473	12.15
-14.78316859	80.19850355	0.52	-14.93139423	82.53052374	10
-23.95777982	86.75318324	0	-19.17844335	87.93276917	8.6

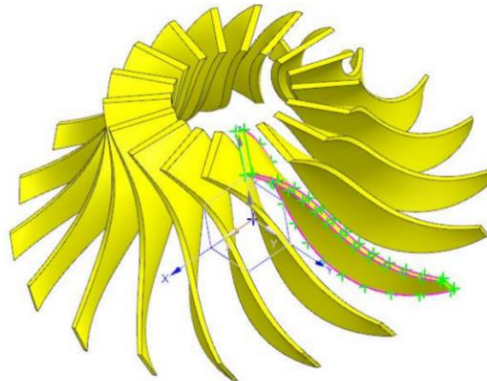


Рис. 2. Координаты точки в сплайне

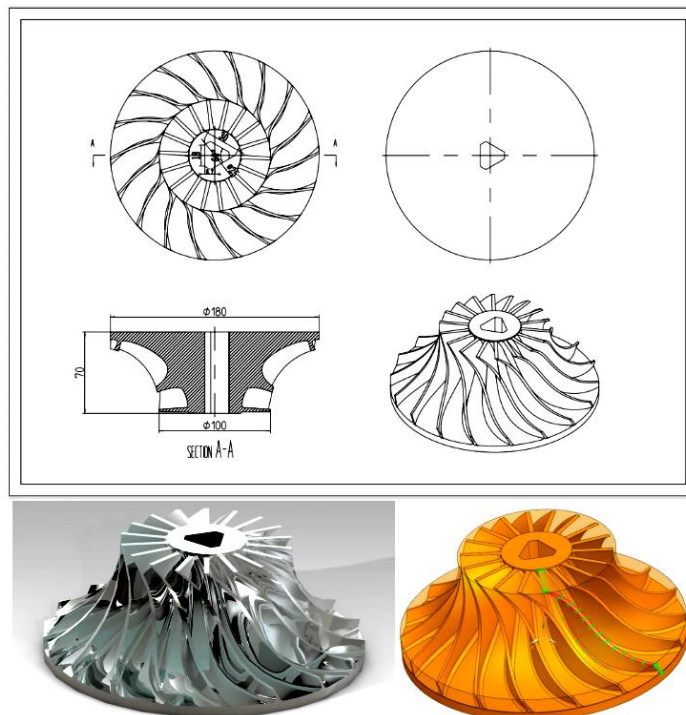


Рис. 3. Эскиз «Крыльчатки»

В предложенном варианте сферическая фреза используется для завершения обработки внешнего контура крыльчатки.

Форма лезвия шаровой фрезы аналогична сфере, и она собирается на фрезерном станке для фрезерования различных криволинейных поверхностей и дуговых пазов, как показано на рис. 4 [6].

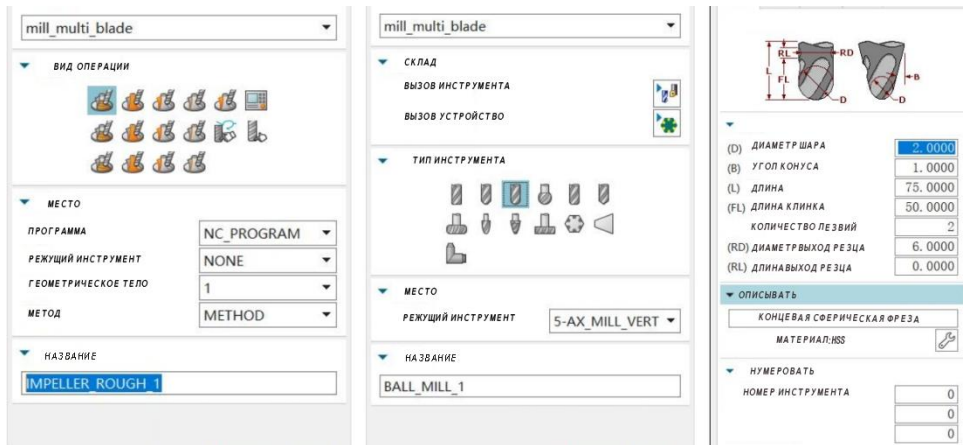


Рис. 4. Концевая сферическая фреза

При этом путем регулирования скорости подачи и скорости резания завершается оптимизация кода, повышается эффективность производства крыльчатки и выполняется моделирование обработки на станке (рис. 5).

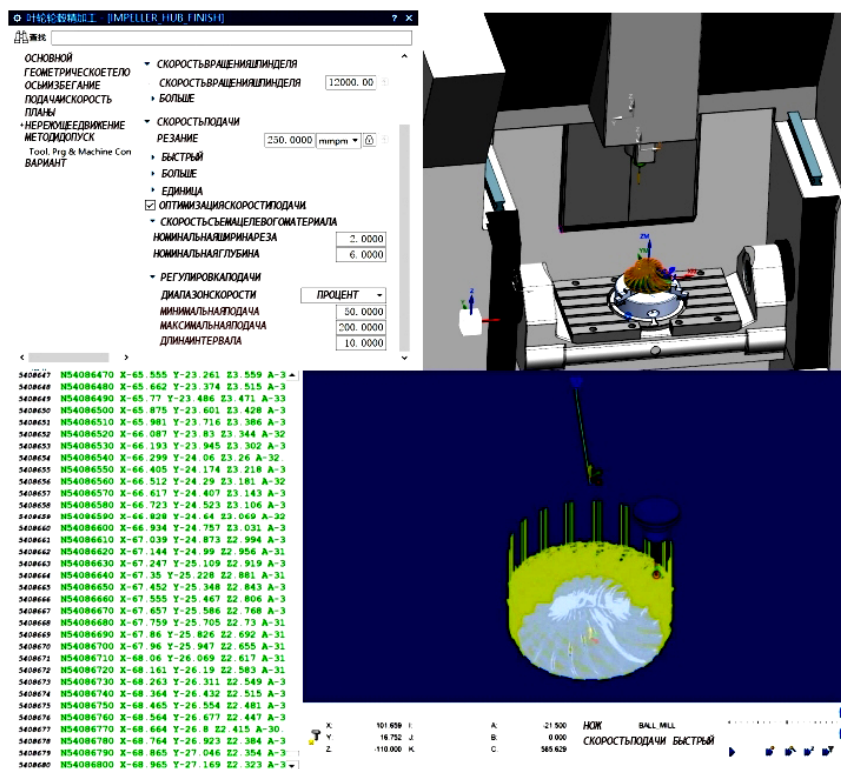


Рис. 5. Моделирование станка и визуализация кода УП

В результате время обработки сокращено, а УП оптимизирована за счет увеличения подачи и минимизации холостых движений инструмента, что в целом снижает трудоёмкость изготовления крыльчатки. Получены следующие результаты:

NC_PROGRAM					2:16:57:45
未用项					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
IMPELLER_RO...		✓	BALL_MILL	0	09:57:08
IMPELLER_RO...		↺	BALL_MILL	0	00:34:08
IMPELLER_RO...		↺	BALL_MILL	0	00:33:58
IMPELLER_RO...		↺	BALL_MILL	0	00:33:59

(a)

NC_PROGRAM					2:03:10:11
未用项					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
IMPELLER_RO...		✓	BALL_MILL	0	04:58:54
IMPELLER_RO...		↺	BALL_MILL	0	00:18:36
IMPELLER_RO...		↺	BALL_MILL	0	00:18:26
IMPELLER_RO...		↺	BALL_MILL	0	00:18:27

(b)

Рис. 6. Сравнительная таблица времени обработки: (a) до оптимизации, (b) после оптимизации

Время до оптимизации: 2:16:57:45, после: 2:03:10:11.

Оптимизация топологии крыльчатки

Алюминиевый сплав 2014 по составу является как твердым алюминиевым сплавом, так и деформируемым алюминиевым сплавом. По сравнению с 2A50, из-за более высокого содержания меди, он имеет более высокую прочность и лучшую термостойкость, но его пластичность в горячем состоянии не такая хорошая как 2A50. Алюминиевый сплав 2014 отличается хорошей обрабатываемостью, имеет хорошие характеристики контактной и точечной сварки, сварки вальцами, но плохие характеристики дуговой и газовой сварки, может быть закален термической обработкой и обладает эффектом экструзии [7]. Данный сплав используется в случаях, когда требуется высокая прочность и твердость (включая высокую температуру). Так, например, в конструкции тяжелых самолетов, поковках, в толстых листах и прессованных материалах, в колесах и элементах конструкции, в топливных баках первых ступеней многоступенчатых ракет и в деталях космических аппаратов, в рамных конструкциях грузовиков и деталях подвески.

Турбокомпрессор использует инерционный импульс выхлопных газов, выбрасываемых из двигателя, для привода турбины в камере турбины, а турбина приводит в движение коаксиальную крыльчатку, которая нагнетает воздух, подаваемый через трубку воздушного фильтра, для нагнетания его в цилиндр.

Когда скорость двигателя увеличивается, скорость выброса выхлопных газов и скорость турбины также увеличиваются синхронно, а

крыльчатка сжимает больше воздуха в цилиндр. Давление и плотность воздуха увеличиваются, чтобы сжечь больше топлива, и соответствующее увеличение количества топлива позволяет увеличить мощность двигателя, и, соответственно, выходную мощность [8].

Таблица 2. Алюминиевый сплав - 2014

Наименование	Значение	Единица измерения
Модуль упругости	7.3e+10	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0.33	-
Модуль сдвига	2.8e+10	Н/м ²
Массовая плотность	2800	Кг/м ³
Предел прочности	165445000	Н/м ²
Предел текучести	96509800	Н/м ²
Коэффициент теплового расширения	2.3e-05	°С ⁻¹
Коэффициент теплопроводности	160	Вт/(м·К)
Удельная теплоёмкость	960	Дж/(кг·к)

В данной статье в качестве примера взят автомобильный турбокомпрессор с рабочим объемом 1,4 тонна и крутящим моментом 250 Н/м. Структурную оптимизацию конструкции крыльчатки предлагается осуществлять путём ограничения перемещения, веса и напряжения. Наиболее рациональный вариант конструкции крыльчатки выбирается на основе анализа результатов моделирования поля течения жидкости (рис 7).

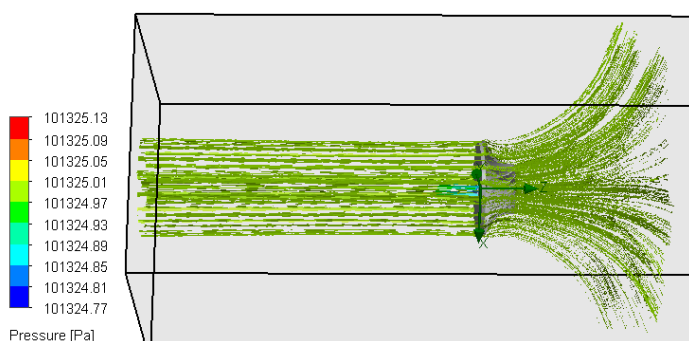


Рис. 7. Анализ поля течения «крыльчатки»

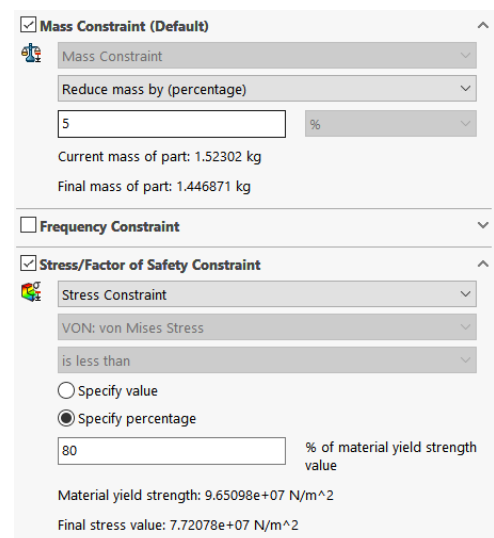


Рис. 8. Настройка параметров оптимизации

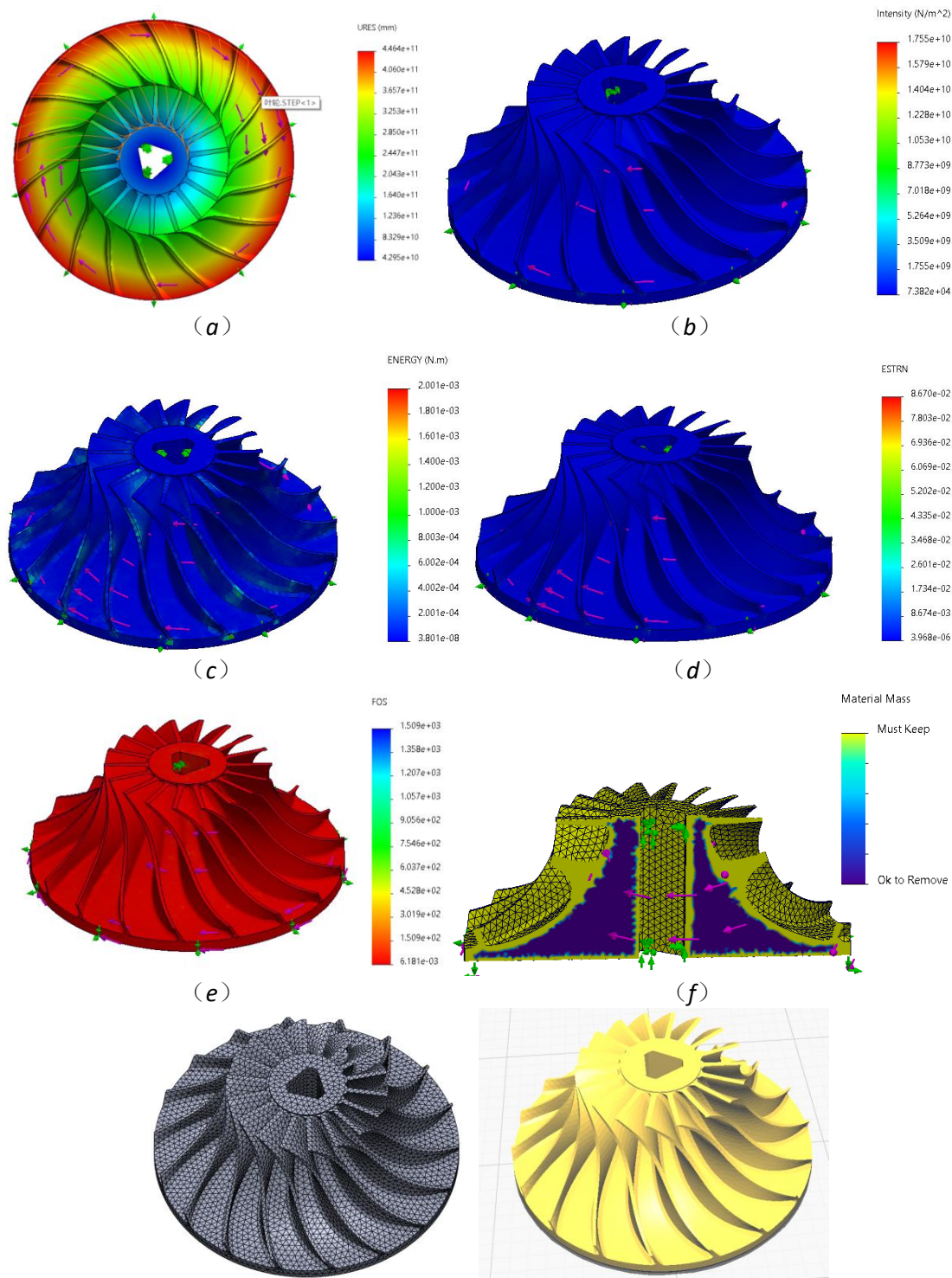


Рис. 9. Результаты оптимизации топологии (гладкая сетка)

При выборе рационального варианта конструкции крыльчатки учитывались следующие факторы:

- (a) Топологически переменное смещение (составное смещение)
- (b) Топологически изменчивое напряжение (сила)

- (с) Топологически переменная деформация (энергия)
- (d) Топологически переменная деформация (эквивалент)
- (e) Распределение запаса прочности (f), качество материала

Оптимизация топологии осуществлялась путём сравнения при соблюдении следующих условий:

- Начальная масса детали: 1,523 кг, конечная масса детали: 1,447 кг.
- Усилие текучести материала: $9,651e+07 \text{ Н/м}^2$,
Конечное значение напряжения: $7,7201e+07 \text{ Н/м}^2$.
- Начальный коэффициент деформации: $1,641e-11$,
Конечный коэффициент деформации: $4,033e-11$.
- Начальный минимальный коэффициент безопасности: $2,4e-0,8$,
окончательный минимальный коэффициент безопасности: $0,0062$.

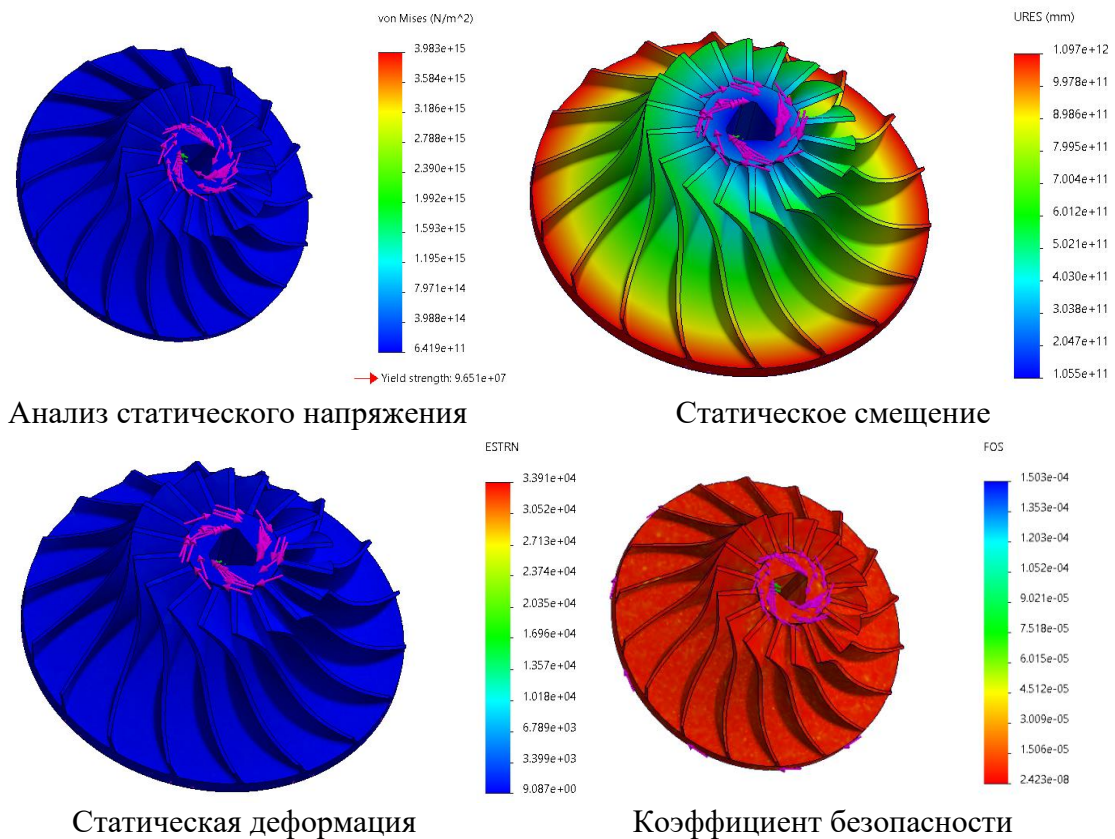


Рис. 10. Начальный модальный анализ

Результаты

С учётом выше изложенного снижение технологической себестоимости возможно осуществить по двум вариантам.

1. За счёт сокращения времени (трудоемкости) путём оптимизации траектории инструмента, скорости подачи и кода ЧПУ [9], использования

станков с ЧПУ для уменьшения производственных затрат и использования моделирования обработки. Учёт данных факторов позволит снизить уровень брака.

NC_PROGRAM					2:16:57:45
未用项					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
IMPELLER_RO...	█	✓	BALL_MILL	0	09:57:08
IMPELLER_RO...		↶	BALL_MILL	0	00:34:08
IMPELLER_RO...		↶	BALL_MILL	0	00:33:58
IMPELLER_RO...		↶	BALL_MILL	0	00:33:59

(a)

NC_PROGRAM					2:03:10:11
未用项					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
IMPELLER_RO...	█	✓	BALL_MILL	0	04:58:54
IMPELLER_RO...		↶	BALL_MILL	0	00:18:36
IMPELLER_RO...		↶	BALL_MILL	0	00:18:26
IMPELLER_RO...		↶	BALL_MILL	0	00:18:27

(b)

Рис. 11. Сравнительная диаграмма «Время обработки»: (a) до оптимизации, (b) после оптимизации

2. За счёт оптимизации топологии крыльчатки, при этом улучшается качество изготовленной детали, снижается технологическая себестоимость изготовления и сохраняется рациональность её конструкции за счет анализа статических напряжений (Рис 9).

Технология многоосевой обработки с ЧПУ может использоваться для обработки различных сложных деталей, повышения эффективности обработки и точности поверхности, снижения трудоёмкости их обработки и повышения эффективности производства. Моделирование может сократить затраты на проведение экспериментов и уменьшить процент брака. Следовательно, оптимизация топологии позволит оптимизировать структуру и материалоемкость [11].

Применение выше изложенного метода приведёт к снижению технологической себестоимости, а, следовательно, к повышению эффективности производства и качества изготовления деталей.

Оптимизация процессов изготовления сложнопрофильных деталей является важным средством рациональной организации производственного процесса продукции, сокращения цикла разработки, снижения затрат и повышения качества продукции и представляет собой сложную проблему цифрового проектирования и производства [12]. Этот метод играет жизненно важную роль в повышении производительности изготовления большой номенклатуры деталей.

При этом примененный метод имеет широкий спектр применений.

Результаты проведенного исследования согласуются с недавними академическими результатами, такими как «Adigital twin study for immediate design / redesign of impellers and blades» / «Ariva zhagan Anbalagan».

В статье представлено исследование цифрового двойника для ускоренного проектирования/реконструкции и изготовления Крыльчаток [13]. Разработан метод автоматизации САПР на основе стандартной программы моделирования, основанной на автоматизации производства многокоординатных фрезерных операций.

В статье «Computer Aided Simulation Machining Programming In 5-Axis Nc Milling Of Impeller Leaf» / «Liu Huran» предложен сложный метод обработки поверхности, который использует 5-осевые станки с ЧПУ для планирования движений инструмента, уменьшения остаточных ошибок и улучшения обработки поверхности, точности и эффективности работы [14].

В статье «Topology optimization of turbine disk considering maximum stress prediction and constraints» / «Cheng YAN» разрабатывается обновленная схема ограничения напряжений при оптимизации топологии с использованием прогнозируемых максимальных напряжений. Подробно подвергаются анализу некоторые ключевые факторы, влияющие на результаты оптимизации. Результаты демонстрируют обоснованность и эффективность предложенного прогноза максимального напряжения и разработанного метода ограничения напряжения [15].

Заключение

Крыльчатка турбины изготовлена из алюминиевого сплава 2014. Благодаря многоосевой обработке с ЧПУ и оптимизации топологии, с точки зрения оптимизации программы и конструкции сокращается трудоёмкость её изготовления и, как следствие сокращение технологической себестоимости, площадь и материалы.

Перед окончательной обработкой рекомендуется проверить правильность траектории инструмента и кода УП с помощью машинного моделирования, точность полученных поверхностей.

Предложенный метод моделирования может быть применён не только к данной детали, но и к другим сложно профильным изделиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Jarred C. Heigel, Jeff Tessier, Jeff Tapparo, Tyler Roth, Kerry Marusich, Physics-based design for an impeller machining process, Manufacturing Letters, Volume 33, Supplement, 2022, Pages 502-507, ISSN 2213-8463.
- [2] Davide Verdi, Joseph Joju, Aishah Larsen, Guo Yong Chia, Grace Tay, Shan Shan Yang, Environmental performance analysis of hybrid manufacturing of

- closed impellers, *Materials Today: Proceedings*, Volume 70,2022,Pages 289-295,ISSN 2214-7853.
- [3] Дмитриева, М. Э. Топологическая оптимизация оснастки в программе SiemensNX / М. Э. Дмитриева, А. Г. Серебренникова // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 12-14. – EDNBXYMGN.
- [4] Северцов, А. А. К вопросу об оптимизации траектории движения режущего инструмента при токарной обработке деталей ГТД на станках с ЧПУ / А. А. Северцов // Гагаринские чтения 2017 : Тезисы докладов, Москва, 05–19 апреля 2017 года. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017. – С. 488. – EDNZIKAFB.
- [5] Моделирование формообразования сложных поверхностей деталей / А. А. Ляшков, Ю. Н. Вивденко, А. Н. Шутов, С. А. Балановский // Металлообработка. – 2010. – № 4(58). – С. 36-42. – EDNMTXNLB.
- [6] Пайкин, Д. Б. Формирование микрогеометрии поверхности при фрезеровании сложных поверхностей сферическими фрезами / Д. Б. Пайкин // Проблемы механики современных машин : Материалы V международной конференции, Улан-Удэ, 25–30 июня 2012 года / ответственный редактор В. С. Балбаров. Том 3. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2012. – С. 179-182. – EDNWFHWFH.
- [7] D.A. Tanner, J.S. Robinson, Reducing residual stress in 2014 aluminium alloy die forgings, *Materials & Design*, Volume 29, Issue 7,2008,Pages 1489-1496,ISSN 0261-3069.
- [8] Козлов, А. А. Сокращение времени разгона турбокомпрессора дизельных двигателей за счет управления турбокомпрессорами с использованием рекуперативного торможения / А. А. Козлов, Д. В. Шабалин, С. В. Рослов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – № 5(39). – С. 17-21. – EDNTCSKCN.
- [9] Liang Quan, Wang Yongzhang, Fu Hongya, Han Zhenyu, Cutting Path Planning for Ruled Surface Impellers, *Chinese Journal of Aeronautics*, Volume 21, Issue 5,2008,Pages 462-471,ISSN 1000-9361.
- [10] Austin C. Hayes, Erik A. Träff, Christian Vestergaard Sørensen, Sebastian Vedsø Willems, Niels Aage, Ole Sigmund, Gregory L. Whiting, Topology optimization for structural mass reduction of direct drive electric machines,

- Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 57,2023,103254,ISSN 2213-1388.
- [11] Yongmao Xiao, Zhigang Jiang, Quan Gu, Wei Yan, Ruping Wang, A novel approach to CNC machining center processing parameters optimization considering energy-saving and low-cost, Journal of Manufacturing Systems, Volume 59,2021,Pages 535-548,ISSN 0278-6125.
- [12] Дубровский, Н. А. Оптимизация технологии обработки детали / Н. А. Дубровский, Е. С. Жданова, Л. В. Пименова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Д. Экономические и юридические науки. – 2019. – № 5. – С. 44-51. – EDNBERNYA.
- [13] Arivazhagan Anbalagan, Bachu Shivakrishna, Kuthadi Sai Srikanth, A digital twin study for immediate design / redesign of impellers and blades: Part 1: CAD modelling and tool path simulation, Materials Today: Proceedings,Volume 46, Part 17,2021,Pages 8209-8217,ISSN 2214-7853,
- [14] Liu Huran, Computer Aided Simulation Machining Programming In 5-Axis Nc Milling Of Impeller Leaf, Physics Procedia, Volume 25,2012,Pages 1457-1462,ISSN 1875-3892.
- [15] Cheng YAN, Ce LIU, Han DU, Cunfu WANG, Zeyong YIN, Topology optimization of turbine disk considering maximum stress prediction and constraints, Chinese Journal of Aeronautics,2023,ISSN 1000-9361,<https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.03.019>.

D.N. Shabalin, Yuan Zhenyue, Shi Shuangyuan

REDUCING THE COST OF MANUFACTURING THE PART "TURBINE IMPELLER" DUE TO COMPUTER SIMULATION

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This paper considers the problem of improving the performance of "integral impeller" (hereinafter referred to as impeller) parts. The parts are widely used in the fields of turbine manufacturing, compressor manufacturing, aircraft and engine manufacturing. It is part of the transfer system, includes thin blades and provides high speed. The impeller is a complex curved surface. The quality of processing directly affects the aerodynamic characteristics and work efficiency. At the same time, the impeller is a typical thin-walled part. During the processing, due to various cutting factors, there will be problems such as size mismatch, uneven thickness, and blade deformation during processing. This paper discusses ways to improve machining efficiency, impeller manufacturing accuracy and efficiency, and avoid tool-workpiece collisions. For this purpose, digital

equipment was used, the process was simulated, and the trajectory of the cutting tool was checked.

Key words: integral impeller, digital equipment, modeling, machining.

REFERENCES

- [1] Jarred C. Heigel, Jeff Tessier, Jeff Tapparo, Tyler Roth, Kerry Marusich, Physics-based design for an impeller machining process, *Manufacturing Letters*, Volume 33, Supplement, 2022, Pages 502-507, ISSN 2213-8463.
- [2] Davide Verdi, Joseph Joju, Aishah Larsen, Guo Yong Chia, Grace Tay, Shan Shan Yang, Environmental performance analysis of hybrid manufacturing of closed impellers, *Materials Today: Proceedings*, Volume 70, 2022, Pages 289-295, ISSN 2214-7853.
- [3] Dmitrieva M. E. Topological optimization of tooling in siemenceNX program / M. E. Dmitrieva, A. G. Serebrennikova // *Youth and Science: current problems of fundamental and applied research : Proceedings of V All-Russian National Scientific Conference of Young Scientists, Komsomolsk-on-Amur, April 11-15, 2022. Vol. Part 2. - Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University, 2022. - C. 12-14. - EDNBXYMGN.*
- [4] Severtsov, A. A. To the question of optimizing the trajectory of the cutting tool during the turning of GTE parts on CNC machines / A. A. Severtsov // *Gagarin readings 2017 : Abstracts of reports, Moscow, April 05-19, 2017. - Moscow: Moscow Aviation Institute (National Research University), 2017. - C. 488. - EDNZIKAFB.*
- [5] Modeling the shaping of complex part surfaces / A. A. Lyashkov, Y. N. Vivdenko, A. N. Shutov, S. A. Balanovsky // *Metalworking. - 2010. - № 4(58). - C. 36-42. - EDNMTXNLB.*
- [6] Paikin D. B. Formirovanie microgeometrii poverkhnosti v milling complex surfaces spherical cutters / D. B. Paikin // *Problems of mechanics of modern machines: Proceedings of the V International Conference, Ulan-Ude, 25-30 June 2012 / responsible editor V. S. Balbarov. Vol. 3 - Ulan-Ude: East Siberian State University of Technology and Management, 2012. - C. 179-182.*
- [7] D.A. Tanner, J.S. Robinson, Reducing residual stress in 2014 aluminium alloy die forgings, *Materials & Design*, Volume 29, Issue 7, 2008, Pages 1489-1496, ISSN 0261-3069.
- [8] Kozlov A. A. Reducing the acceleration time of diesel engine turbochargers by controlling turbochargers using regenerative braking / A. A. Kozlov, D. V. Shabalin, S. V. Roslov // *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy. - 2014. - № 5(39). - C. 17-21.*

- [9] Liang Quan, Wang Yongzhang, Fu Hongya, Han Zhenyu, Cutting Path Planning for Ruled Surface Impellers, Chinese Journal of Aeronautics, Volume 21, Issue 5,2008,Pages 462-471,ISSN 1000-9361.
- [10] Austin C. Hayes, Erik A. Träff, Christian Vestergaard Sørensen, Sebastian Vedsø Willems, Niels Aage, Ole Sigmund, Gregory L. Whiting, Topology optimization for structural mass reduction of direct drive electric machines, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 57,2023,103254,ISSN 2213-1388.
- [11] Yongmao Xiao, Zhigang Jiang, Quan Gu, Wei Yan, Ruping Wang,A novel approach to CNC machining center processing parameters optimization considering energy-saving and low-cost,Journal of Manufacturing Systems, Volume 59,2021,Pages 535-548,ISSN 0278-6125.
- [12] Dubrovsky, N. A. Optimization of part processing technology / N. A. Dubrovsky, E. S. Zhdanova, L. V. Pimenova // Bulletin of Polotsk State University. Series D. Economic and legal sciences. - 2019. - № 5. - C. 44-51.
- [13] Arivazhagan Anbalagan, Bachu Shivakrishna, Kuthadi Sai Srikanth, A digital twin study for immediate design / redesign of impellers and blades: Part 1: CAD modelling and tool path simulation, Materials Today: Proceedings, Volume 46, Part 17,2021,Pages 8209-8217,ISSN 2214-7853,
- [14] Liu Huran, Computer Aided Simulation Machining Programming In 5-Axis Nc Milling Of Impeller Leaf, Physics Procedia, Volume 25,2012,Pages 1457-1462,ISSN 1875-3892.
- [15] Cheng YAN, Ce LIU, Han DU, Cunfu WANG, Zeyong YIN, Topology optimization of turbine disk considering maximum stress prediction and constraints, Chinese Journal of Aeronautics,2023,ISSN 1000-9361,<https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.03.019>.