УДК 621.91.01

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЧИСТОВОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Косян М.М.

ведущий инженер-технолог-программист,

ПАО «Калужский Турбинный Завод»,

Калуга, Россия.

Яшкин К.В.

инженер-технолог-программист 1 категории,

ПАО «Калужский Турбинный Завод»,

Калуга, Россия.

Аннотация

Работа посвящена анализу методов обработки открытых и полузакрытых плоскостей корпусов турбин из труднообрабатываемых материалов таких как: титановые сплавы. В работе предложена оптимальная последовательность обработки и подобраны наилучшие режимы резания для чистовых операций в условиях производства. Так же был просчитана эффективность данного метода. Суммарное сокращение времени на рассматриваемой детали, с использованием оптимизированного метода обработки составило 33% от изначальной.

Целью данной работы является поиск оптимальных стратегий обработки корпусных деталей на станках с ЧПУ, а также сокращение цикла их изготовления за счёт подбора повышенных режимов резания.

Актуальность представленной работы обосновывается большим объёмом механической обработки корпусных деталей и стремлением добиться повышения производительности механической обработки.

Ключевые слова: чистовое фрезерование, wiper пластины, оптимизация, режимы резания, стратегии обработки, сокращение времени, станки с ЧПУ, обработка полузакрытых плоскостей, обработка открытых плоскостей, обработка труднообрабатываемых материалов.

IMPROVING THE PERFORMANCE OF THE FINISHING METHOD OF MACHINING HOUSING COMPONENTS MADE OF DIFFICULT-TO-MACHINE MATERIALS

Kosyan M.M.
Lead engineer-technologist-programmer,
Kaluga Turbine Works PJSC,
Kaluga, Russia.

Yashkin K.V.
Engineer-technologist-programmer of the 1st category,
Kaluga Turbine Works PJSC,
Kaluga, Russia.

Abstract

This work focuses on analyzing machining methods for open and semi-enclosed surfaces of turbine housings made from difficult-to-machine materials, such as titanium alloys. The paper proposes an optimal processing sequence and selects the best cutting parameters for finishing operations under production conditions. The efficiency of this method was also calculated. The efficiency of this method was also calculated. The total reduction in processing time for the part in question, using the optimized machining method, amounted to 33% of the original time.

The objective of this work is to find optimal machining strategies for housing components on CNC machine tools and to shorten their production cycle by implementing more higher-performance cutting parameters.

The relevance of the presented work is justified by the large volume of mechanical machining of housing parts and the desire to achieve higher productivity in mechanical machining.

Keywords: finish milling, wiper inserts, optimization, cutting parameters, machining strategies, time reduction, CNC machine tools, machining of semi-enclosed surfaces, machining of open surfaces, machining of difficult-to-cut materials.

Введение

Разработка новых стратегий, подбор оптимальных режимов резания, создание и оптимизация новых способов обработки деталей резанием - это междисциплинарная проблема, требующая знаний теории механической обработки, математики и CAD/CAM систем. Важной областью также является оценка и сравнение уже существующих стратегий и режимов, поскольку правильный выбор может значительно сократить машинное время обработки и износ инструмента [1-4].

Стратегии фрезерования в системах CAD/CAM представляют собой заранее определенные траектории движения фрезерного инструмента, предназначенные для обработки различных типов поверхностей. Используя подходящие стратегии обработки, можно сократить время обработки, улучшить качество поверхности, увеличить срок службы инструмента и повысить точность обработки размеров. Методы фрезерования, как правило, делятся на черновую, получистовую и чистовую обработку. Методы черновой обработки используются Черновое фрезерование – максимальный съём материала. для удаления максимального объема материала, используя максимальные режимы резания, согласно каталогу поставщика режущего инструмента и непосредственно жесткостью технологической системы. Применяются два подхода: силовое фрезерование с большой глубиной реза и умеренной подачей,

либо фрезерование с большой подачей и малой глубиной (использование фрез для высоких подач). Получистовое фрезерование – промежуточный переход, снимающий остаточный припуск после черновой обработки и подготавливающий поверхность под чистовой проход. Принцип стратегии чистовой обработки заключается, прежде всего, в достижении максимально возможного качества поверхности и геометрической точности, используя подбор оптимальных режимов резания [10].

В нашей работе мы рассмотрим обработку открытых и полузакрытых плоскостей корпусных деталей из труднообрабатываемых материалов, таких как титановые сплавы, жаропрочные сплавы и предложим оптимальную последовательность обработки и наилучшие режимы резания в условиях современного производства.

Целью данной работы является поиск оптимальных стратегий обработки корпусных деталей на станках с ЧПУ, а также сокращение цикла их изготовления за счёт подбора повышенных режимов резания и оптимизации метода обработки.

Стратегии обработки корпусных деталей

Корпусные детали – это крупногабаритные отливки, поковки, сварные конструкции (корпуса редукторов, коробок передач, насосов) с системами плоских баз, отверстий, пазов, карманов и уступов. Их обработка на станках с ЧПУ обычно ведётся за несколько установов и требует грамотного выбора стратегии для каждого элемента.

1) Классификация фрезерной обработки

Черновое фрезерование – максимальный съём материала. Применяются два подхода: силовое фрезерование с большой глубиной реза и умеренной подачей, либо фрезерование с большой подачей и малой глубиной (использование фрез для высоких подач).

Получистовое фрезерование – промежуточный переход, снимающий остаточный припуск после черновой обработки и подготавливающий поверхность под чистовой проход.

Чистовое фрезерование – обеспечение точности и шероховатости. Глубина и подача минимальны, обороты шпинделя повышены. Ключевые факторы – это контроль геометрии, стабильность температуры и минимальная вибрация [11].

Для повышения качества чистового фрезерования используют специальные пластины с увеличенной зачистной фаской по сравнению со стандартными режущими пластинами, называемые Wiper пластины (рис. 1).

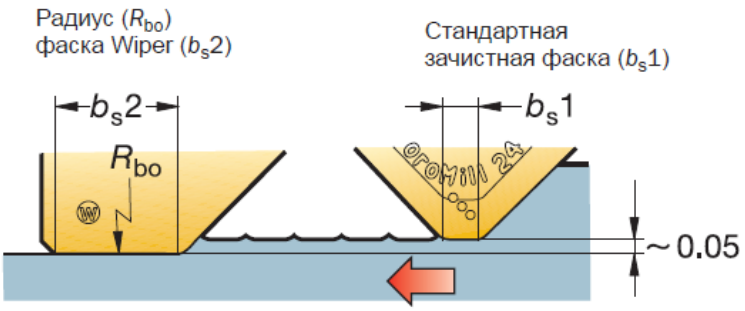


Рис. 1 – Отличительная особенность Wiper пластин в Sandvik Coromant

Источник: [11]

Режимы резания для данных пластин ограничиваются максимальной подачей на оборот fu, которая согласно каталогу, должна быть как минимум на 1,5 – 2 мм меньше, чем длина Wiper – пластины. Подача на оборот для используемых пластин не должна превышать 10 мм/об (рис. 2) [9].

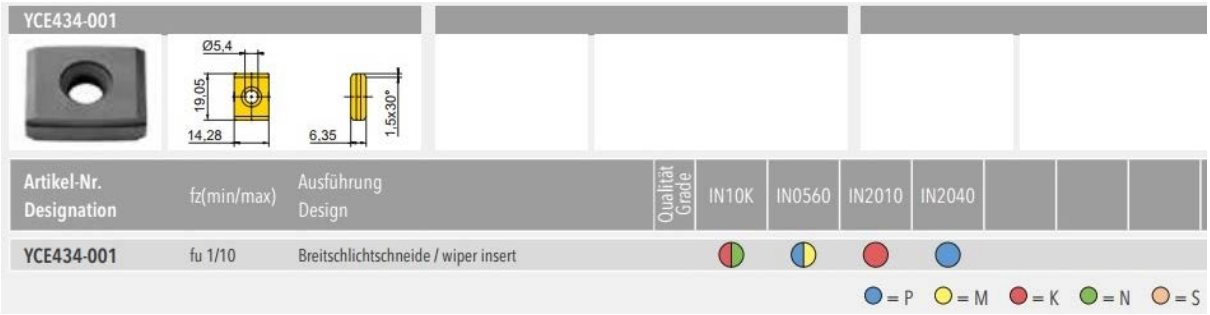


Рис.2 – Wiper пластина и её подача на оборот из каталога

Источник: [9]

2) Направление фрезерования

Попутное фрезерование – направление подачи совпадает с направлением вращения фрезы. Толщина стружки максимальна в момент врезания и убывает к выходу. Обеспечивает равномерный износ и высокое качество поверхности, но чувствительно к жёсткости системы – не подходит для грубых и неоднородных заготовок (рис.3).

Встречное фрезерование – направление подачи противоположно вращению фрезы. Толщина стружки нарастает от нуля к максимуму. Снижает вибрации, подходит для заготовок с литейной коркой, но даёт неравномерный износ и большее тепловыделение (рис.4) [11].

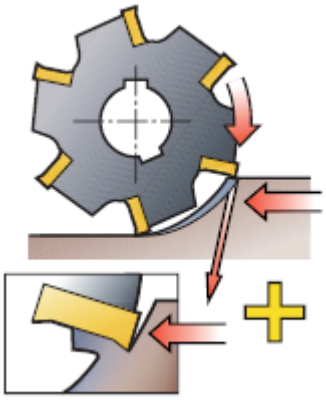


Рис.3 – Попутное фрезерование

Источник: [11]

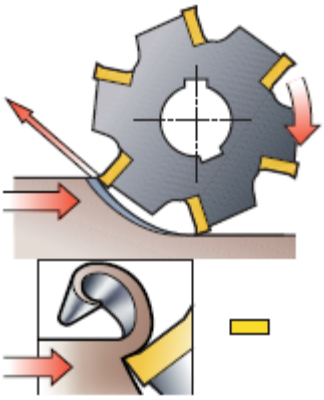


Рис.4 – Встречное фрезерование

Источник: [11]

3) Современные адаптивные стратегии

Адаптивное фрезерование – стратегия черновой обработки, при которой CAM-система поддерживает постоянный угол контакта инструмента с заготовкой, постоянно «ныряя» в материал и выходя из него. Позволяет использовать всю длину режущей кромки и вести обработку на высоких подачах. Поддержка постоянной толщины стружки через динамическую регулировку параметров снижает колебания нагрузки и продлевает срок службы оборудования (рис.3). [5, 6]

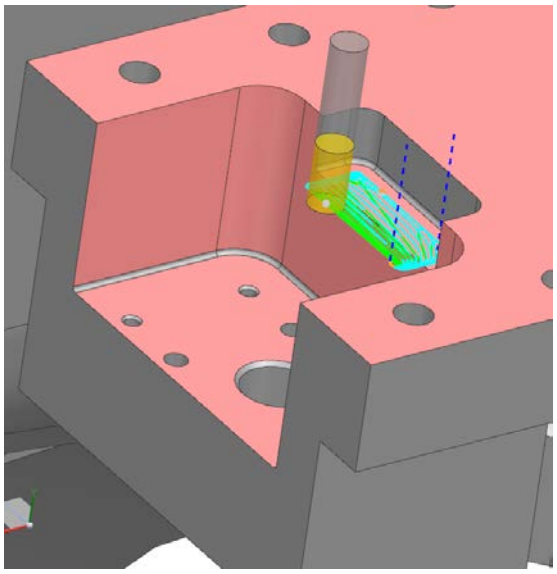


Рис.5 – Адаптивное фрезерование

Источник: составлено авторами при помощи программы Siemens NX

Высокоскоростная обработка (HSM/HSC) – система стратегий, основанная на поддержании постоянной толщины стружки: малая глубина реза a_p + высокая подача на зуб f_z + высокие обороты n. До 90% тепла уносится со стружкой, что позволяет работать без обильного охлаждения и бережёт инструмент и станок. Такая обработка производится специальными фрезами для высоких подач. Их особенность заключается в угле установки пластин в плане, этот угол составляет порядка 10°–19° градусов (рис.6). [7, 8]

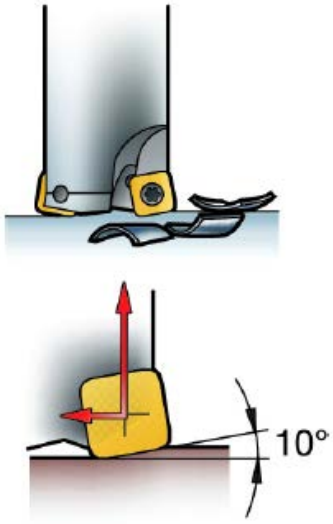


Рис.6 – Фреза для высоких подач

Источник: [11]

Спиральное интерполяционное фрезерование – инструмент движется по спирали, формируя отверстия и полости с плоским дном. Распространено для изготовления корпусных деталей и пресс-форм (рис.7) [6].

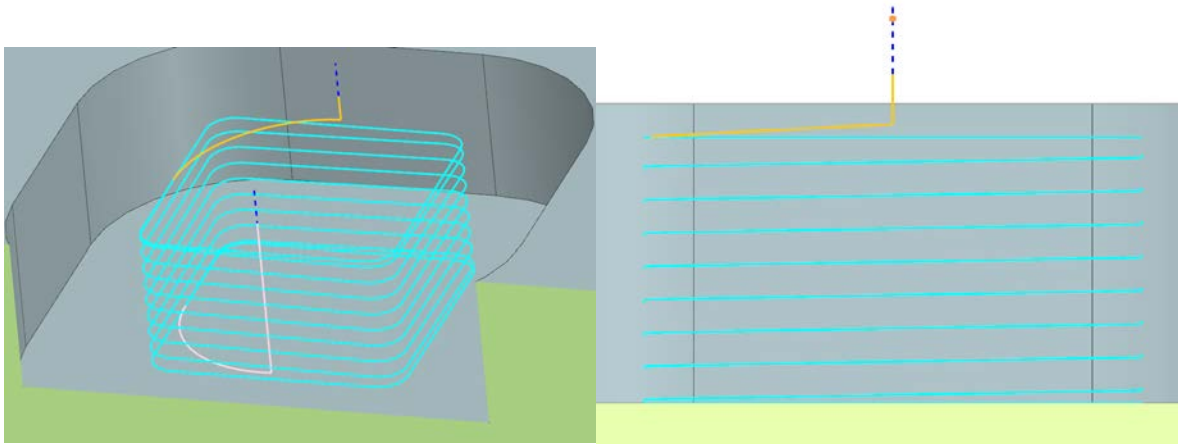


Рис.7 – Спиральное интерполяционное фрезерование

Источник: составлено авторами при помощи программы Siemens NX

Сравнение традиционного метода обработки с оптимизированным

В качестве рассматриваемого примера используем обработку открытых и полузакрытых плоскостей корпусных деталей из труднообрабатываемых материалов. Выделим плоскость, на которой мы рассмотрим обработку (рис. 8).

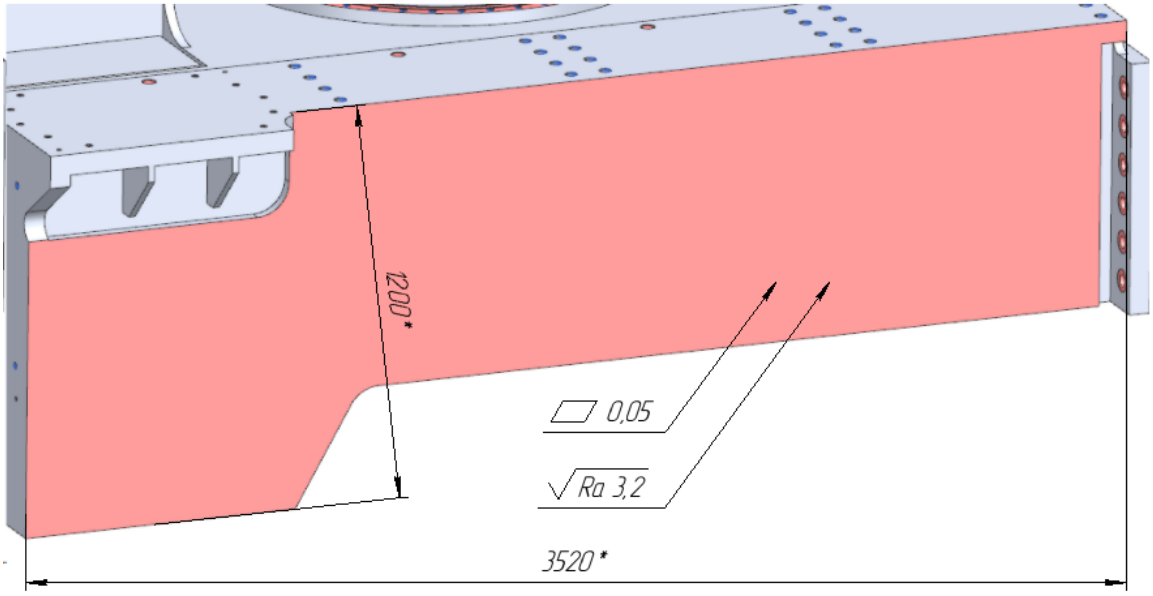


Рис.8 – Обрабатываемая плоскость корпусной детали

Источник: составлено авторами при помощи программы Siemens NX

Опишем стандартный метод обработки, стратегию и режимы резания.

После сварки на подобные корпусные детали закладывается от 15 до 20 мм припуска под механическую обработку. Стандартная стратегия обработки подразумевает разделение этапов обработки на черновой, получистовой и чистовой этапы.

Получение заданных требований по шероховатости поверхности достигается получистовым фрезерованием, но ввиду наличия геометрического допуска формы «плоскостность», значение которой составляет 0,05 мм, необходимо использовать чистовое фрезерование.

Традиционный метод обработки

В качестве режущего инструмента, используемого для черного фрезерования, используется фреза диаметром Ø160 для высоких подач Palbit

160A06815-12-02-U040063 и пластины SOET 160520-MS PH7740 предназначенные для обработки жаропрочных и титановых сплавов. Оставляемый припуск под получистовое фрезерование – 0,5 мм (рис.9). Режимы резания представлены в таблице №1.

Таблица № 1 – Режимы резания для чернового фрезерования

Инстру-мент	Режимы резания						
	Кол-во зубьев, z	Глубина резания, a_p, мм	Скорость резания V_c, м/мин	Подача на зуб, f_z, мм/зуб	Кол-во оборотов, n, об/мин	Минутная подача, V_f, мм/мин	Ширина перекрытия a_e, %
Palbit 160A068	12	2	45	0,7	90	756	45

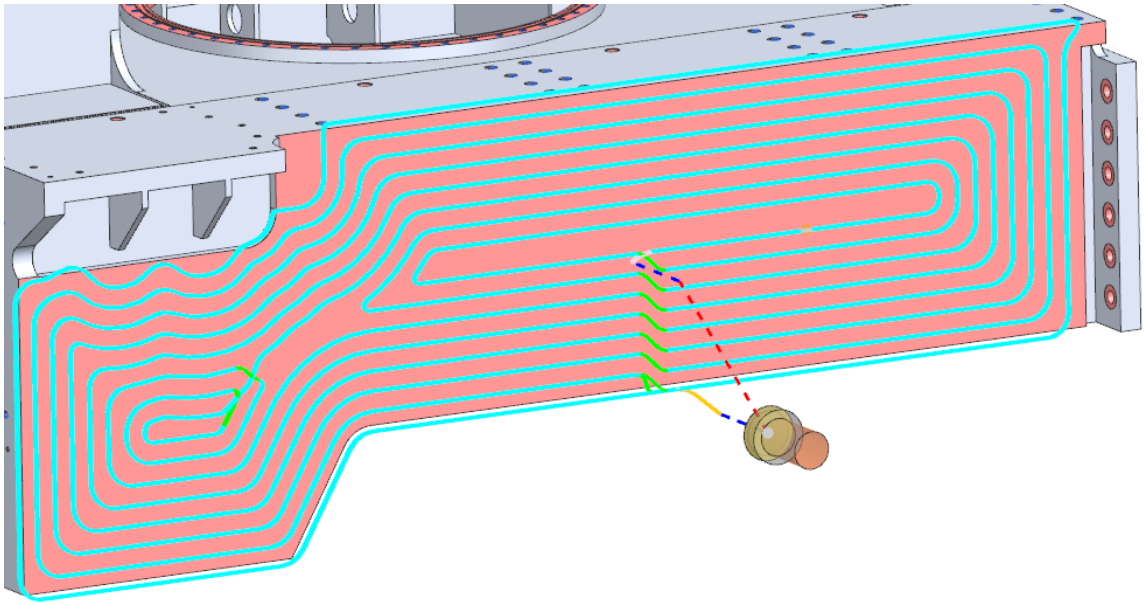


Рис.9 – Черновое фрезерование плоскости

Источник: составлено авторами при помощи программы Siemens NX

Для получистового фрезерования, используется торцевая фреза с углом в плане 45° диаметром Ø200 Ingersoll 5N6R200R00 и пластины SHEH1504AETN-HP предназначенные для обработки жаропрочных и титановых сплавов. Припуск под чистовое фрезерование – 0,1 мм (рис. 10). Режимы резания представлены в таблице № 2.

Таблица № 2 – Режимы резания для получистового фрезерования

Инстру-мент	Режимы резания						
	Кол-во зубьев, z	Глубина резания, a_p, мм	Скорость резания V_c, м/мин	Подача на зуб, f_z, мм/зуб	Кол-во оборотов, n, об/мин	Минутная подача, V_f, мм/мин	Ширина перекрытия a_e, %
5N6R200R00	14	0,4	40	0,2	58	120	60

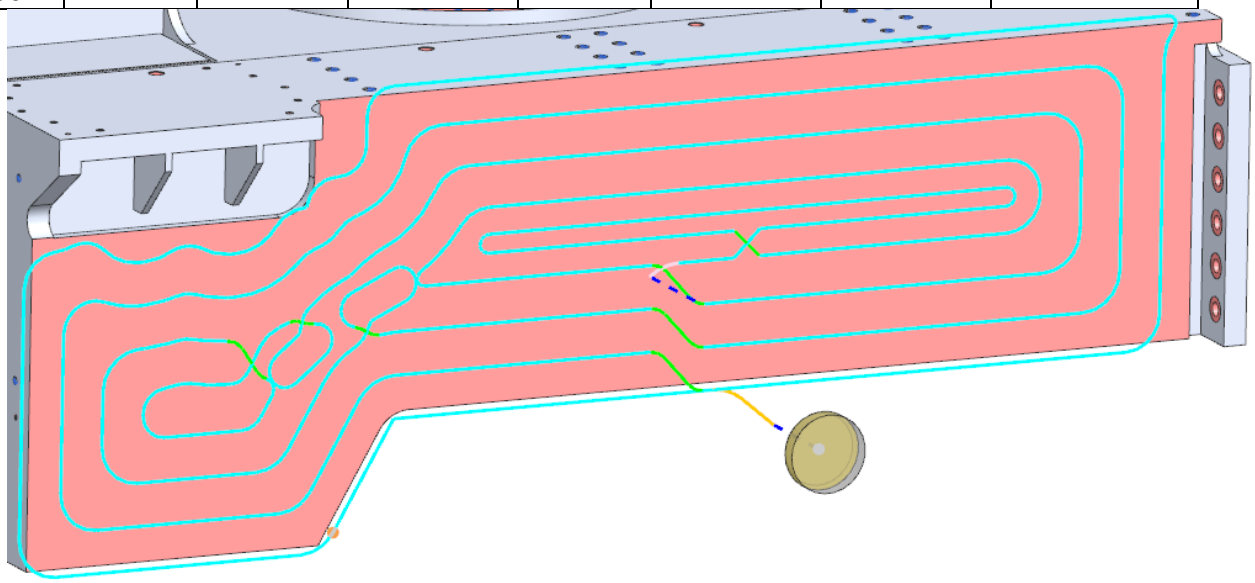


Рис.10 – Получистовое фрезерование плоскости

Источник: составлено авторами при помощи программы Siemens NX

Для чистового фрезерования, используется фреза диаметром Ø315 Ingersoll 7F2K315R00 и wiper пластины YCE434-001 IN2040 предназначенные для обработки стали. Чистовая обработка поверхности выполняется за 2 прохода, глубина резания 0,05 мм (рис. 11).

Были подобраны режимы, которые соответствовали 80% от максимального значения: 8 мм/об (рис. 2) [9]. Режимы резания представлены в таблице № 3.

Таблица № 3 – Режимы резания для чистового фрезерования

Инстру-мент	Режимы резания						
	Кол-во зубьев, z	Глубина резания, a_p, мм	Скорость резания V_c, м/мин	Подача на зуб, f_z, мм/зуб	Кол-во оборотов, n, об/мин	Минутная подача, V_f, мм/мин	Ширина перекрытия a_e, %
7F2K315R00	2	0,05	20	4	20	160	60

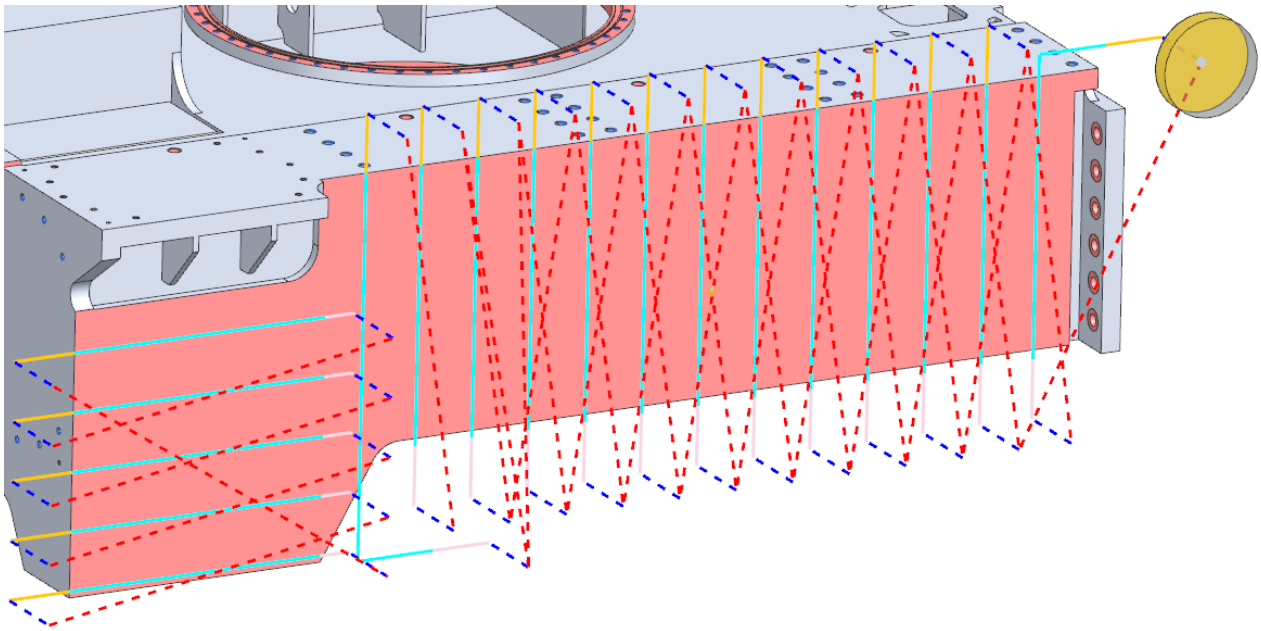


Рис.11 – Чистовое фрезерование плоскости

Источник: составлено авторами при помощи программы Siemens NX

Оптимизированный метод обработки

Оптимизированная стратегия фрезерования реализует двухэтапную схему, состоящую из черновой и чистовой обработки, то есть исключается получистовая обработка. Она перераспределяется между черновым и чистовым фрезерованием. Промежуточный слой припуска снимается с экспериментально достигнутыми повышенными режимами резания и увеличенной шириной фрезерования. Суммарный эффект – сокращение машинного времени, времени переналадки на получистовой инструмент, экономия инструмента и повышение производительности при сохранении заданного качества.

Режущий инструмент для черновой операции при оптимизированном методе остается тем же, но стратегия обработки подвергается изменениям. При выполнении последнего прохода с помощью CAM системы глубина резания уменьшается до a_p=1 мм, и подача снижается до 75% от максимальной. Припуск

под чистовую обработку – 0,25 мм (рис. 9). Режимы резания представлены в таблице № 4.

Таблица № 4 – Режимы резания для чернового фрезерования

Инструмент	Режимы резания						
	Кол-во зубьев, z	Глубина резания, a_p, мм	Скорость резания V_c, м/мин	Подача на зуб, f_z, мм/зуб	Кол-во оборотов, n, об/мин	Минутная подача, V_f, мм/мин	Ширина перекрытия a_e, %
Palbit 160A068	12	2	45	0,7	90	756	45
Последний проход инструмента	12	1	45	0,53	90	567	45

Режущий инструмент для чистовой операции при оптимизированном методе остается тем же. Стратегия обработки и режимы резания полностью изменяются, за исключением шаблона резания.

Экспериментальным путем было достигнуто значительное повышение режимов резания, а именно подачи на оборот, увеличив данный параметр до 17,5 мм/об, вместо 8 мм/об в традиционной стратегии тем самым выйдя за границы максимально рекомендуемой подачи на оборот на 75%. Так же удалось увеличить параметр ширины фрезерования a_e до 80%, вместо 60% (рис. 12). Режимы резания представлены в таблице № 5.

При выполнении чистовой обработки, количество проходов увеличивается до 3-х проходов: 2 прохода снимается по 0,1 мм припуска; последний проход снимается 0,05 мм припуска. Количество проходов увеличивается по сравнению с традиционной стратегией, но это нивелируется значительным увеличением режимов резания.

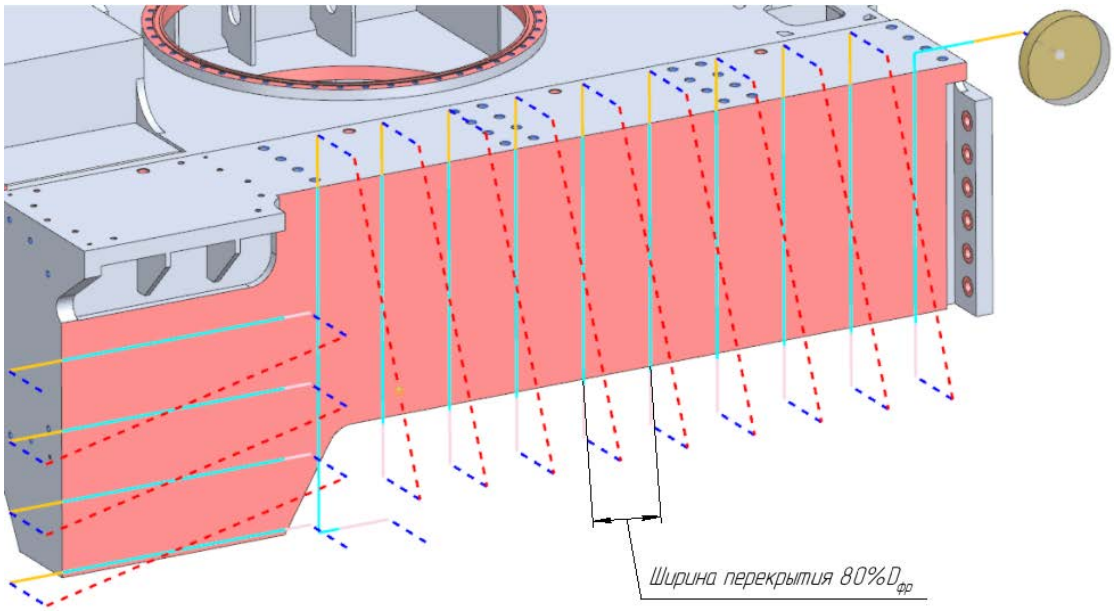


Рис.12 – Оптимизированная стратегия чистового фрезерования

Источник: составлено авторами при помощи программы Siemens NX

Таблица № 5 – Режимы резания для оптимизированного метода чистового фрезерования

Инструмент	Режимы резания						
	Кол-во зубьев, z	Глубина резания, a_p, мм	Скорость резания V_c, м/мин	Подача на зуб, f_z, мм/зуб	Кол-во оборотов, n, об/мин	Минутная подача, V_f, мм/мин	Ширина перекрытия a_e, %
7F2K315 R00	2	0,05	20	8,75	20	350	80

После обработки на экспериментально-полученных режимах, была выполнена проверка качества обрабатываемой поверхности с помощью профилометра для измерения шероховатости, который показал значения Ra 0,16-0,7 мкм. Геометрическая точность так же выполнена в пределах допуска и составляла менее 0,05 мм.

Сравнение традиционного метода обработки с оптимизированным

Сравнение двух методов на основе обработки рассматриваемой плоскости приведено в таблице №6.

Таблица № 6 – Сравнение времени методов обработки

	Стандартный метод, ч	**Оптимизированный метод, ч**	**Выигрыш по времени, ч**
Черновая обработка	9:55	10:10	-0:15
Получистовая обработка	4:40	-	4:40
Чистовая обработка	5:05	2:45	2:20
Общее время обработки	19:40	12:55	6:45
Прирост производительности	**34%**		

Примененный нами метод позволил увеличить производительность механической обработки открытых и полузакрытых плоскостей на 34% по сравнению со стандартным методом.

Заключение

Выбор оптимальной стратегии обработки корпусных деталей на станках с ЧПУ при фрезеровании требует комплексного подхода, учитывающего взаимосвязь режимов резания, стратегий перемещения инструмента, жесткости технологической системы и износа режущего инструмента. В нашей работе мы выполнили оптимизацию стандартного метода обработки, ключевыми решениями стали: подбор оптимальной стратегии фрезерования, повышения режимов резания на чистовых переходах.

Преимущества нового метода:

1. Снижение общего машинного времени обработки.
2. Снижение вспомогательного времени обработки.
3. Экономия режущего инструмента, благодаря исключению получистовой операции обработки.

Преследуя цель увеличить минутную подачу V_f с сохранением максимально полученной подачи на оборот fu = 17,5 мм/об, мы увеличивали значение скорости резания, но столкнулись с проблемой чрезмерного износа режущих пластин. Это обуславливается материалом режущих пластин, который подразумевает обработку только сталей. Так же увеличение оборотов приводило к повышенной вибрации в зоне резания.

Библиографический список

1. Ловыгин, А. А. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM-система / Ловыгин А. А. , Теверовский Л. В. - Москва : ДМК Пресс, 2015. - 280 с. - ISBN 978-5-97060-123-5. - Текст : электронный // URL : https://www.rosmedlib.ru/book/ISBN9785970601235.html (дата обращения: 10.10.2026).

2. Орлов, А. А. Анализ влияния режима резания на состояние заготовки в процессе обработки / А. А. Орлов, Р. С. Махкамов, Е. Б. Щелкунов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 3-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 10– 14 апреля 2023 года. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 83-86.

3. Панова Е.А. Оптимизация управляющих программ на станки с чпу для деталей из труднообрабатываемых материалов / Панова Е.А., Дятлов К.А. // Материалы VII научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Отв. редактор Р.А. Физулаков. Комсомольск-на-Амуре, 2022 – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 189-200.

4. Щелкунов, Е. Б. Выбор оптимальной стратегии обработки корпусной детали с помощью CAD/CAM-систем / Е. Б. Щелкунов, Р. С. Карпов // Наука,

инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 14–18 ноября 2022 года / Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 192-194.

5. Adrian But, Radu Canarache, «Comparative results of milling strategies implementation», – Materials Today: Proceedings 12 (2019) 219–224 pp.

6. Altintas, Y. «Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics», Machine Tool Vibrations, and CNC Design. – Cambridge University Press, 2012. 366 p.

7. Dodok, T. «Influence of CNC milling strategies on complex surface machining», – Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. 1-6 pp.

8. Ethem Kelekci, Selcuk Kizir «A novel tool path planning and feedrate scheduling algorithm for point to point linear and circular motions of CNC-milling machines», – Journal of Manufacturing Processes 95 (2023) 53–67 pp.

9. Ingersoll Cutting Tools Общий каталог фрезерного инструмента / Коллектив авторов INGERSOLL Werkzeuge GmbH, 2014. – 659 с.

10. Paulo Davim J. «Modern machining technology», – Woodhead publishing in mechanical engineering, 2011. 383 p.

11. Sandvik Coromant. Руководство по металлообработке / Коллектив авторов. – Sandvik Coromant, 2006. – 564 с.