

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЛЯ РЕЗАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

© 2017

М.В. Вилкина, аспирант, инженер кафедры «Технология и производство артиллерийского вооружения»
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург (Россия)

Ключевые слова: резание металлов; высокоскоростное фрезерование; высокопроизводительное фрезерование; повышение производительности.

Аннотация: Внедрение высокоскоростного фрезерования (ВСФ) позволяет сократить машинное время, повысить удельную объемную производительность резания, а также достичь ряда преимуществ, в конечном итоге положительно влияющих на экономическую эффективность данного метода. Однако для реализации этой технологии на практике требуется соблюдение целого комплекса мер и требований к технологической системе. В частности, широкое применение этой технологии останавливает необходимость наличия дорогостоящего оборудования – специализированных станков с ЧПУ (числовым программным управлением).

Исследование ВСФ на практике привело к появлению разновидности этого вида обработки – высокопроизводительного фрезерования (ВПФ). Отличительными особенностями ВПФ являются уменьшенные (по сравнению с ВСФ) частоты вращения шпинделя (скорости резания) и увеличенные объемы снимаемого при резании материала (глубина и ширина резания). Целью исследований являлось изучение возможности применения ВПФ для обработки стали на неспециализированном оборудовании с ЧПУ, широко применяемом для традиционного фрезерования. При подготовке и проведении работы учитывались: механические свойства обрабатываемого материала; жесткость системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь); характеристики станка; материал, покрытие и геометрия инструмента. Фиксировалась температура в зоне резания, температура заготовки и инструмента.

Выявлены следующие обязательные параметры процесса: гладкие, касательно сопряженные траектории движения инструмента; угол спирали фрезы; угол контакта фрезы с материалом. Расчет машинного времени и объемной производительности резания выявил преимущество использования ВПФ по сравнению с традиционным фрезерованием. Выявлены показатели процесса, благоприятно влияющие на износ инструмента. Также рассмотрены ограничители процесса внедрения ВПФ на практике.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря активному наращиванию программного функционала и технических возможностей обрабатывающих центров с ЧПУ (числовым программным управлением), а также развитию инструментального производства и программного обеспечения для расчета управляющей информации для оборудования с ЧПУ (САМ – Computer Aided Machining) стала возможной реализация на практике теоретических прогнозов, сделанных в области резания металлов еще в начале XX века. Одной из таких практически освоенных идей сегодня считают явление скоростного резания металлов, первые упоминания о котором в литературных источниках относят к 40-м годам XX века [1; 2]. Суть предположения сводилась к тому, что при повышении скорости резания силы резания понижаются, так же как и теплопередача от стружки к инструменту.

Сегодня исследователи выделяют следующие преимущества высокоскоростного фрезерования (ВСФ) [3]: 1) значительное сокращение основного машинного времени; 2) повышение удельной объемной производительности резания на 30 %; 3) увеличение скорости подачи в 5–10 раз; 4) возможное уменьшение силы резания более чем на 30 %; 5) возможность обработки в условиях отсутствия вибраций геометрически сложных деталей; 6) возможность чистовой обработки резанием (качество поверхности почти соответствует качеству шлифования, непрерывная обработка за счет отвода технологического тепла преимущественно через стружку).

Эффект ВСФ обуславливается структурными изменениями материала (из-за пластических деформаций,

осуществляемых с большой скоростью) в месте отрыва стружки. При повышении скорости деформаций силы резания первоначально растут, а потом, с достижением определенной температуры в зоне образования стружки, начинают существенно снижаться. Время контакта режущей кромки с заготовкой и стружкой так мало, а скорость отрыва стружки столь высока, что большая часть тепла, образующегося в зоне резания, удаляется вместе со стружкой, а заготовка и инструмент просто не успевают нагреваться [4]. Поэтому считается, что ВСФ базируется на определенном сокращении количества тепла, возникающего при обработке резанием, и резком перераспределении этого тепла между элементами СПИД – станком, приспособлением, инструментом, деталью – и удаляемой стружкой [5].

Для успешного достижения вышеописанного эффекта немаловажен процесс контроля стружкообразования. Помимо скорости деформации важна и геометрия стружки, а именно ее толщина [6]. При традиционном фрезеровании выделяют глубину и ширину реза, величина их при расчете траектории принимается постоянной и измеряется, как правило, относительно диаметра фрезы. Например, для конструктивных сталей, резание которых осуществлялось в рассматриваемом исследовании, ширина реза варьируется в зависимости от глубины прохода от 20 до 60 % от диаметра фрезы, глубина прохода при этом будет составлять от 1 до 0,2 диаметров. В этом контексте ВСФ характеризуется малой глубиной съема металла – это всегда десятые доли от диаметра фрезы, но ширина реза при этом существенна и приближена к 100 % от диаметра фрезы [7].

Однако на практике для ВСФ требуется соблюдение целого комплекса мер и требований к технологической системе [8]. В частности, широкое применение этой технологии останавливает необходимость наличия дорогостоящего оборудования – специализированных станков с ЧПУ [9]. Одной из важнейших характеристик этого оборудования является скоростной шпиндель (от 20 000 об/мин). Стандартный шпиндель, устанавливаемый на фрезерных станках с ЧПУ общего назначения, имеет максимальную скорость 10 000–12 000 об/мин [10].

На стыке традиционного и высокоскоростного подходов к процессу фрезерования относительно недавно появилась технология высокопроизводительного фрезерования (ВПФ) [11]. ВПФ создает условия, при которых механические и тепловые воздействия на инструмент оказываются постоянными, образуется тонкая стружка и обеспечиваются повышенные скорость и глубина резания (до 4 диаметров). Данные характеристики достигаются использованием специализированных траекторий перемещения инструмента в металле. ВПФ характеризуется увеличенной объемной производительностью резания и низкой энергоемкостью, т. е. сниженными требованиями к скорости и жесткости шпинделя фрезерного станка с ЧПУ [12].

При ВПФ, в отличие от ВСФ, на переднем плане стоит оптимизация объемной производительности резания – количества стружки, производимого за единицу времени, с целью сокращения основного машинного времени [13]. Причиной повышения производительности при ВПФ является использование эффективной длины кромки инструмента, в результате глубина резания может достигать до 4 диаметров фрезы [14]. В основе расчетов режимов и условий резания лежит положение о сохранении постоянства толщины стружки [15].

Для расчета траектории перемещения инструмента используют понятие средней толщины стружки, она задается в виде неизменяющегося параметра, а ширина контакта фрезы с материалом (угол контакта) (рис. 1), в отличие от традиционной фрезерной обработки, становится переменной. Значение толщины стружки используется САМ-системой или ЧПУ станка для вычисления оптимальной траектории движения фрезы и управления ей, чем обеспечивается максимальный эффект обработки [16].

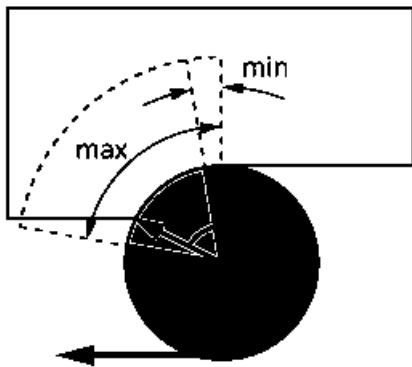


Рис. 1. Изменение ширины контакта фрезы

При работе эффективной длиной кромки фрезы скорости резания и подачи снижаются, при этом снижаются и требования к технологической системе в целом, что позволяет успешно применять ВПФ на неспециализированном оборудовании. Величина подачи во многом определяется количеством режущих кромок, а скорость резания зависит от применяемого инструментального материала. Главным условием обеспечения требуемых величин подачи и, соответственно, максимальной объемной производительности резания, а также сокращения времени обработки является использование высокопроизводительных твердосплавных фрез. За счет исключительной жесткости, которая делает возможной высокую подачу на оборот, данный инструмент соответствует нагрузкам, имеющим место при высокопроизводительном резании [17].

Цель исследования – изучение возможности применения ВПФ для обработки стали на неспециализированном оборудовании с ЧПУ, широко применяемом для традиционного фрезерования. В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований ВПФ нескольких видов сталей в контексте сравнения с параметрами ВСФ и традиционных методов фрезерования.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи использовалась неспециализированная технологическая система. Параметры элементов технологической системы отражены в таблице 1.

Методика эксперимента заключалась в применении на неспециализированной технологической системе предварительно рассчитанных режимов резания и траектории движения инструмента, фиксации состояния технологической системы во время эксперимента и последующем расчете объемной производительности резания.

В расчетах режимов резания учитывались особенности выбранной технологической системы. Для расчетов использовались рекомендуемые значения углов контакта для твердосплавных фрез [18], а также рекомендации по выбору скорости резания от производителя фрезы [19]. Закрепление инструмента происходило в цанговый патрон, глубина резания превышала 2 диаметра фрезы. Для предотвращения вытягивания фрезы из-за невозможности компенсировать осевую силу резания скорость резания была снижена на 25–30 %. Примененные режимы резания показаны в таблице 2.

В процессе обработки фиксировалось состояние технологической системы: температуры, однородность стружки (размер и цвет), износ покрытия и геометрии фрезы. Для данного исследования было принято положение, справедливое для ВСФ при обработке данной группы сталей, о нежелательности использования смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), которые могут привести к сокращению стойкости инструмента [20]. Во время резания были зафиксированы колебания температуры в зоне резания, а также температура инструмента и заготовки после резания. Измерения осуществлялись инфракрасным пирометром СЕМ DT-8863 481691.

Для каждого исследуемого материала фиксировалось машинное время, далее был рассчитан удаленный объем металла и вычислена объемная производительность резания.

Таблица 1. Параметры элементов технологической системы во время исследования

Элементы технологической системы	Характеристики	
Станок	Модель	AWEA AF-1000
	Система ЧПУ	Fanuc 0i
	Тип шпинделя	Шпиндель с прямым приводом
	Тип конуса шпинделя	BT40
	Мощность шпинделя	7,5/11 кВт
	Максимальная скорость вращения шпинделя	10 000 об/мин
Инструмент	Диаметр фрезы	12 мм
	Количество зубьев	6
	Длина режущей части	26 мм
	Угол подъема стружечной канавки	41 град.
	Материал фрезы	Твердый сплав
	Покрытие	Ti-NAMITE-X
Патрон	не специальный, цанговый, с нормальной точностью	
Заготовка 1	Материал	Сталь 40X
	Предел прочности на растяжение, σ_b	655 МПа
	Габариты	Лист 260×70×95 мм
	Закрепление	Тиски станочные
	Глубина закрепления	10 мм
Заготовка 2	Материал	Сталь 10
	Предел прочности на растяжение, σ_b	429 МПа
	Габариты	Круг $\phi 130 \times 50$ мм
	Закрепление	Патрон 3-кулачковый
	Глубина закрепления	15 мм

Таблица 2. Принятые режимы резания

Название параметра		Сталь 40X	Сталь 10
Глубина резания, мм		26	26
Толщина стружки, мм		0,063	0,058
Угол контакта	max	30	38
	min	15	22
Скорость резания, м/мин		148	168
Среднее значение скорости вращения шпинделя, об/мин		3 900	4 500
Среднее значение подачи, мм/мин		2 500	2 100

Таблица 3. Количественные результаты исследования

Название параметра		Сталь 40X	Сталь 10
Удаленный объем материала, мм ³		473	365
Затраченное машинное время, сек		1 170	732
Объемная производительность резания, мм ³ /сек		0,4	0,5
Средняя температура, °C	в зоне резания	150	195
	инструмента	30	30
	заготовки	40	60

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Количественные результаты исследования, а также зафиксированные температуры приведены в таблице 3.

Для оценки объемной производительности резания ВПФ был проведен ее расчет для традиционной фрезерной обработки, характерной для данной неспециализированной технологической системы. При расчете времени обработки с параметрами из таблицы 2 для

традиционной фрезерной траектории с постоянным значением глубины резания и рекомендуемыми поставщиком инструмента режимами резания для стали 10 были получены значения для объемной производительности резания (таблица 4).

Расчетное значение затраченного на траекторию машинного времени получено из САМ-системы. Таким образом, можно прогнозировать снижение объемной производительности резания для стандартной техноло-

гии фрезерования, где подача и глубина/ширина резания остаются постоянными для всех проходов, практически в 2 раза.

Таблица 4. Расчет параметров для стандартной траектории

Название параметра	Сталь 10
Глубина резания, мм	6 (0,5D*)
ширина резания, мм	4,8 (0,4D)
Скорость резания, м/мин	160
Значение подачи, мм/мин	900
Удаленный объем материала, мм ³	365
Затраченное машинное время, сек	1 380
Объемная производительность резания, мм ³ /сек	0,26

*D – диаметр фрезы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Высокопроизводительное фрезерование, в отличие от ВСФ, можно успешно применять на неспециализированном оборудовании, достигая существенного сокращения машинного времени. При этом экономическая эффективность достигается в том числе и за счет снижения требований к элементам технологической системы. Возможность сократить использование СОТС представляет экономический и экологический интерес: как показало исследование, для рассматриваемой группы сталей было достигнуто постоянство температуры в зоне резания, что благоприятно сказывается на состоянии кромки фрезы и, как следствие, износе. Проведенные измерения температуры в зоне резания, инструмента и заготовки после резания указывают на схожесть механизма теплопередачи и теплового баланса ВПФ и ВСФ. Эффективное использование фрезы по всей длине ее режущей части также можно отнести к условиям, благоприятным для повышения стойкости инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из ключевых элементов и в то же время одним из ограничителей процесса внедрения ВПФ являются специфические требования к режущему инструменту. Для ВПФ используются цельные твердосплавные фрезы с диаметром, меньшим или равным 20 мм. Для удаления действительно больших объемов металла большая производительность достигается применением корпусных фрез с пластинками. Поэтому при подготовке технологического процесса сегодня следует проанализировать как возможности имеющегося оборудования, так и геометрию изделия с точки зрения применения той или иной технологии резания, а возможно, и их комбинации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грудов П.П. Скоростное резание // Скоростные методы обработки металлов: доклады и тезисы докладов на Московской конференции по скоростным методам обработки металлов. М.: Машгиз, 1949. С. 239–269.
2. Щеголев А.В. Современное состояние скоростного фрезерования // ЛОНИТОМАШ. М.: Машгиз, 1948. С. 52–64.

3. Forssell P. Tool and method advances for efficient manufacturing, C-2940:139 US/01 AB. New York: Sandvik Coromant, 2012. 23 p.
4. Степанов А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве // CAD/CAM/CAE Observer. 2003. № 4. С. 1–8.
5. Machining and Machine-tools / ed. J. Paulo Davim. New York: Woodhead Publishing Limited, 2013. 280 p.
6. Выявление пиковой производительности при высокоскоростной обработке: технический обзор // Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2010. С. 1–11.
7. Виттингтон К., Власов В. Высокоскоростная механообработка // САПР и графика. 2002. № 11. С. 10–17.
8. High speed machining (HSM) – the effective way of modern cutting // International Workshop CA Systems And Technologies Forum. San Francisco: Moscone Center, 2012. P. 72–79.
9. Звонцов И.Ф., Иванов К.М., Серебrenицкий П.П. Подготовка управляющих программ для оборудования с ЧПУ. СПб.: БГТУ, 2016. 251 с.
10. Canter N. The tribological challenges of high-speed machining // Tribology & Lubrication Technology Magazine. 2007. Vol. 3. P. 29–36.
11. Danielson S., Georgeou T., Teo A. High Performance Machining: A Practical Approach to High Speed Machining // American Society for Engineering Education. 2008. Vol. 6. P. 1–11.
12. Dashchenko A. Manufacturing Technologies for Machines of the Future. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 280 p.
13. Blau P. Flushing Strategies for High Performance, Efficient and Environmentally Friendly Cutting // 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing. USA: Elsevier, 2015. P. 361–366.
14. HPC for improved efficiency on standard machine tools by using new fluid-driven spindles // Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Innovative Solutions. Berlin: Universitätsverlag der TU, 2013. P. 241–246.
15. Жаропрочные сплавы: руководство по применению Sandvik Coromant, AB Sandvikens Tryckeri. М.: Сандвик, 2010. 132 с.
16. GARANT ToolScout: справочник по резанию. СПб.: Хоффман, 2015. 653 с.
17. High Performance Cutting (HPC) in the New Era of Digital Manufacturing // Procedia CIRP. 2016. Vol. 46. P. 1–6.
18. Основной каталог 2015/2016 // Hoffmann Group. URL: hoffmann-group.com/RU/ru/horu/service/downloads/blaetterkatalog.
19. Инструментальный каталог SGS T-CARB // Интертулмаш: промышленное оборудование. URL: itmash.ru/ftpgetfile.php?id=293&module=files2014.
20. Resource and Energy Efficiency in Machining Using High Performance and Hybrid Processes // Rrocedia CIRP: 5th CIRP Conference on High Performance Cutting. 2012. Vol. 1. P. 3–15.

REFERENCES

1. Grudov P.P. Speed Cutting. *Skorostnye metody obrabotki metallov: doklady i tezisy dokladov na Moskovskoy konferentsii po skorostnym metodam*

- obrabotki metallov*. Moscow, Mashgiz Publ., 1949, pp. 239–269.
2. Shchegolev A.V. The current status of speed milling, col. *LONITOMASH*. Moscow, Mashgiz Publ., 1948, pp. 52–64.
 3. Forssell P. *Tool and method advances for efficient manufacturing, C-2940:139 US/01 AB*. New York, Sandvik Coromant Publ., 2012. 23 p.
 4. Stepanov A. High Speed milling at present-day production. *CAD/CAM/CAE Observer*, 2003, no. 4, pp. 1–8.
 5. Davim J.P., ed. *Machining and Machine-tools*. New York, Woodhead Publ., 2013. 280 p.
 6. Exposure of High Speed Machining peak capacity. Technology overview. *Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.*, 2010, pp. 1–11.
 7. Vittington K., Vlasov V. High Speed Machining. *SAPR i grafika*, 2002, no. 11, pp. 10–17.
 8. High speed machining (HSM) – the effective way of modern cutting. *International Workshop CA Systems And Technologies Forum*. San Francisco, Moscone Center Publ., 2012, pp. 72–79.
 9. Zvontsov I.F., Ivanov K.M., Serebrenitskiy P.P. *Podgotovka upravlyayushchikh programm dlya oborudovaniya s ChPU* [Preparation of code for CNC machines]. Sankt Petersburg, BGTU Publ., 2016. 251 p.
 10. Canter N. The tribological challenges of high-speed machining. *Tribology & Lubrication Technology Magazine*, 2007, vol. 3, pp. 29–36.
 11. Danielson S., Georgeou T., Teo A. High Performance Machining: A Practical Approach to High Speed Machining. *American Society for Engineering Education*, 2008, vol. 6, pp. 1–11.
 12. Dashchenko A. *Manufacturing Technologies for Machines of the Future*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2003. 280 p.
 13. Blau P. Flushing Strategies for High Performance, Efficient and Environmentally Friendly Cutting. *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. USA, Elsevier Publ., 2015, pp. 361–366.
 14. HPC for improved efficiency on standard machine tools by using new fluid-driven spindles. *Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Innovative Solutions*. Berlin, Universitätsverlag der TU Publ., 2013, pp. 241–246.
 15. *Zharoprochnye splavy: rukovodstvo po primeneniyu Sandvik Coromant, AB Sandvikens Tryckeri* [Heat resistant super alloys: Application guide Sandvik Coromant, AB Sandvikens Tryckeri]. Moscow, Sandvik Publ., 2010. 132 p.
 16. *GARANT ToolScout: spravochnik po rezaniyu* [GARANT ToolScout: Metalworking guide]. Sankt Petersburg, Khoffman Publ., 2015. 653 p.
 17. High Performance Cutting (HPC) in the New Era of Digital Manufacturing. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 1–6.
 18. Basic Catalog 2015/2016. *Hoffmann Group*. URL: hoffmann-group.com/RU/ru/horu/service/downloads/blatterkatalog.
 19. Tools catalog SGS T-CARB. *Intertulmash: promyshlennoe oborudovanie*. URL: itmash.ru/ftpgetfile.php?id=293&module=files2014.
 20. Resource and Energy Efficiency in Machining Using High Performance and Hybrid Processes. *Procedia CIRP: 5th CIRP Conference on High Performance Cutting*, 2012, vol. 1, pp. 3–15.

THE APPLYING OF HIGH-PERFORMANCE MACHINING METHOD FOR CUTTING OF STRUCTURAL STEELS

© 2017

M.V. Vilkina, postgraduate student,
engineer of Chair “Process and manufacturing engineering of artillery equipment”
Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg (Russia)

Keywords: metal cutting; high-speed machining; high-performance machining; improving productivity level.

Abstract: The implementation of high-speed machining (HSM) allows minimizing the processing time, raising the specific volume cutting efficiency, and achieving the range of advantages having a positive effect on the economic efficiency of this method. However, to implement this technology in practice, it is necessary to follow the set of measures and requirements to the manufacturing system. In particular, the wide use of HSM negates the necessity of having the expensive equipment – specialized CNC machines (computerized numerical control machines).

The research of HSM in practice resulted in the modifications of this type of processing – high-performance machining (HPM). The distinctive features of HPM are the reduced (as compared with HSM) spindle rotational speed (cutting speed) and the increased volumes of removed material (the depth and width of cutting). The goal of the research is the study of feasibility to apply HPM for cutting of structural steel using undedicated CNC machines widely used for traditional milling. When preparing and carrying out the research, the author took into account the mechanical properties of process material; MDTP (machine-device-tool-part) system stiffness; machine technical data; material, coating, and geometry of a cutting tool. The temperature in the cutting area and the work material and cutting tool temperature were recorded as well. The study determined the following mandatory parameters of the process: smooth, tangentially costate trajectories of a tool; angle of cutter spiral; cutter engagement angle. The calculation of cutting time and cutting specific volume showed the advantage of HPM as compared to the traditional CNC milling. The process parameters having a positive impact on tool wear are determined and the parameters constraining the process of HPM implementation are considered.