

ПЯТИОСЕВАЯ ОБРАБОТКА НА ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

И. В. БОНДАРЬ*, Д. В. КРИВОРУЧКО

Кафедра «Технология машиностроения, станки и инструменты», Сумский государственный университет, Сумы, УКРАИНА

*email: ishkabond@gmail.com

АННОТАЦИЯ В настоящее время, детали машин становятся все более сложными и точными. Это требует развития новых технологий механической обработки. В этих условиях многоосевая обработка на фрезерных станках с ЧПУ является одной из таких технологий. Несмотря на 20-ти летнюю историю развития этот подход все еще требует повышения эффективности для реализации современных задач. В работе представлена классификация пятиосевых станков и описаны сферы их применения. Рассмотрены преимущества и проблемы пятиосевой обработки. Проанализированы современные методы повышения ее эффективности.

Ключевые слова: пятиосевая обработка; высокоскоростная обработка; стратегия обработки; траектория обработки; вибрация

FIVE-AXIS MACHINING ON CNC MILLING MACHINES

I. KOVALEVA, D. KRIVORUCHKO

Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

ABSTRACT At the present time, the parts of the machines are becoming more complex and precise. This requires the development of new machining technologies. In these conditions, multi-axis CNC machining is one of those technologies. In spite of the 20-year history of development, this approach still requires increasing efficiency in implementation to modern tasks. This article presents classification of the five-axis machines depending of the Z-axis location and the axis types and configuration. By default, Z-axis is spindle axis, and therefore, spindle location is determines the machine type (a vertical or horizontal machine). The particular configuration depends on which two of the three rotation axes are used and where they are located. Catalogues review gave the advantages, features and fields of the application of the particular configuration of five-axis machines. This article shows that path generation and vibrations are the main keypoints for improvement of five-axis machining. Path strategies evaluates from linear to advanced trochoidal with features detection. The high-speed machining is the main approach for finish five-axis machining, but other approaches are also used. Because of lower rigidity the vibration during five-axis machining could be both regenerative and forces depending on tool rotation speed and rigidity of machining system. The traditional methods for vibration decreasing are not effective often.

Keywords: Five-axis machining; high speed machining; machining strategy; the trajectory of machining; vibration

Введение

В современных условиях высокой конкуренции вопросы повышения качества производимой продукции и сокращения сроков изготовления актуальны во всех отраслях машиностроения. Применение на производстве многоосевых фрезерных обрабатывающих центров – это действенный подход в решении данных задач. Фрезерование на пятиосевых обрабатывающих центрах, которое находит сейчас широкое применение, является важной тенденцией развития современной технологии, обеспечивая возможность изготовления пространственно сложных деталей современных машин с высокой точностью и качеством.

Вместе с тем, несмотря на 20-ти летнюю историю развития, представленные на рынке технические решения, реализующие пятиосевую обработку на фрезерных станках с ЧПУ, все еще требует совершенствования и повышения эффективности для реализации современных задач.

Цель работы

Целью настоящей работы является выявление основных тенденций в развитии пятиосевой обработки и резервов повышения ее эффективности.

Классификация пятиосевых станков

Пятиосевая обработка осуществляется на фрезерных станках с ЧПУ, в которых программно управляются пять осей. Путем анализа и обобщения материалов из каталогов производителей [1–6] систематизирована информация о компоновках пятиосевых станков, также выделены основные сферы их применения (табл. 1).

В зависимости от глубины управления пятиосевая обработка подразделяется на **позиционную** и **непрерывную**. При позиционной пятиосевой обработке шпиндель или стол поворачивается в ряд дискретных положений, а

обработка происходит в несколько установов. Она также называется обработка «3+2», так как дополнительные оси используются только для изменения положения заготовки или инструмента, а фрезерование осуществляется с интерполяцией максимум 3-х осей. При изготовлении деталей машин с циклической симметрией, например, лопаток различных турбин, этого недостаточно, так как не всегда есть возможность доступа инструмента к обрабатываемой поверхности без изменения положения заготовки. При непрерывной пятиосевой обработке может происходить одновременное движение (интерполяция) по всем пяти осям станка. Это открывает дополнительные возможности и обеспечивает следующие преимущества:

- делает процесс обработки деталей со сложной пространственной геометрии более простым и эффективным;
- исключает погрешности установки и закрепления, устраняет человеческий фактор;
- повышает производительность, что ведет к сокращению сроков производства;
- обеспечивает повышение стойкости инструмента и качества обработанной поверхности за счет возможности фрезерования наклонных поверхностей торцевыми и/или боковыми частями фрезы.

На рынке представлены пятиосевые обрабатывающие центры различной компоновки. Дополнительные программно-управляемые оси могут быть реализованы как в *вертикальных* фрезерных обрабатывающих центрах, так и в *горизонтальных*. Вертикальные обрабатывающие центры более компактны, однако горизонтальные обеспечивают лучшую возможность автоматической загрузки заготовок, обработки крупногабаритных заготовок большой массы, улучшенный отвод стружки и больше подходят для серийного производства.

Компоновка пятиосевых станков может быть различной. Конкретная компоновка зависит от того, какие две из трех осей вращения используются:

а) *с поворотной шпиндельной головкой* (рис. 1). Преимущества компоновки:

- шпиндель поворачивается вместе с инструментом, что обеспечивает хороший доступ инструменту в карманы и пазы для обработки труднодоступных мест;
- возможность обработки более тяжелых заготовок, чем у станков с глобидным столом, поскольку стол в этой компоновке имеет значительно большую несущую способность.

б) *с поворотной шпиндельной головкой и поворотным столом* (рис. 2). По сравнению со станками предыдущей группы эти станки имеют большую жесткость и нагрузочную способность шпиндельного узла при одинаковых габаритах. Увеличенная площадь поверхности стола дополнительно увеличивает рабочее пространство.

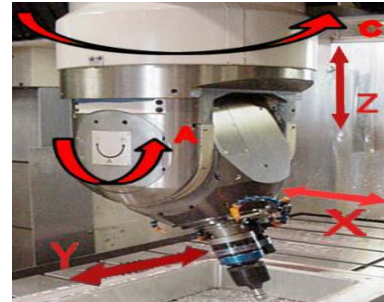


Рис. 1 – Компоновка осей пятиосевых фрезерных станков с поворотной шпиндельной головкой

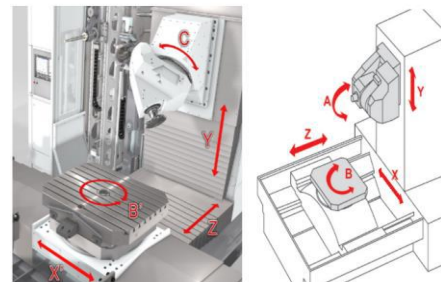
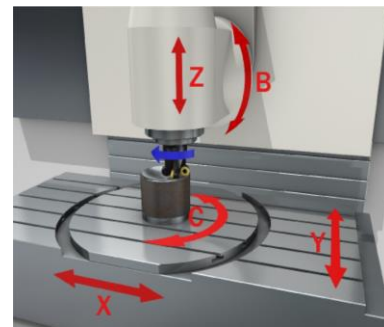


Рис. 2 – Компоновка осей пятиосевых станков с поворотной шпиндельной головкой и поворотным столом

в) *с глобидным поворотным столом*. Эта компоновка обеспечивает повышенную жесткость технологической системы и в, вместе с тем, хороший доступ инструмента к труднодоступным местам карманов, поднутрений, пазов. Программирование очень приближено к программированию трехосевых станков. Однако станки с глобидным столом имеют значительно меньшее рабочее пространство, чем станки других групп при одинаковых габаритных размерах.

Следует обратить внимание, что оси вращения дополнительных осей станка часто выполняют под углом, не равным 90° (рис. 2). Этим достигается экономия рабочего пространства и повышенная жесткость технологической системы, однако усложняется программирование. В силу этого такие станки имеют расширенные функции преобразования систем координат.

Таблица 1 – Область применения пятиосевых обрабатывающих центров

Область применения	Вертикальные пятиосевые станки	Горизонтальные пятиосевые станки
Аэрокосмическая промышленность	Следует учитывать, что много деталей для аэрокосмической промышленности изготавливается из алюминия и титана [8]. Титан является сложным для обработки металлом ввиду ряда обстоятельств, описанных в [8, 9]. Станки для обработки этих материалов должны обладать высокой жесткостью, высоким крутящим моментом, высокомошным шпинделем с максимальными частотами вращения 10000-15000об/мин и обеспечивать высокие рабочие подачи.	
	Относительно негабаритные высокоточные детали (импеллеры, лопастные ротора, лопасти и детали турбин и т. п.)	Габаритные компоненты летательных аппаратов разной сложности (детали каркаса крыла, пилоны, шпангоуты и т. п.)
Общее машиностроение	Наиболее удобны в единичном и мелкосерийном производстве	Наиболее удобны в серийном и крупносерийном производстве
Инструментальная промышленность	Точные детали и детали со сложной конфигурацией небольшой массы	Детали больших габаритов и массы
Медицинская промышленность	Изготовление пространственно сложных имплантатов и других сложных деталей, требующих особо высокого качества (преимущественно на станках с глобидным столом)	Применяются редко

Особенности применения пятиосевых станков

К преимуществам технологии обработки на пятиосевых фрезерных станках можно отнести [7]:

– возможность обработки детали за один установ. Это хорошо видно при обработке наклонной поверхности (рис.3). Трехосевой станок обрабатывает эту поверхность послойно, снимая за один проход слой 0.1–0.5 мм. В то же время пятиосевое позиционирование позволяет расположить инструмент под необходимым углом к поверхности и удалить материал за один проход. Как результат, повышается производительность обработки и качество обработанной поверхности;

– пятиосевое фрезерование позволяет использовать относительно короткие и жесткие инструменты. Уменьшение деформаций инструмента позволяет применять более высокие скорости резания и способствует снижению вибраций. Поэтому в этом случае намного легче достичь требуемого качества поверхности и уровня точности размеров и формы. Ещё один положительный результат – продление службы инструмента и повышение производительности;

– в пятиосевой обработке инструмент перемещается в пяти осях по отношению к обрабатываемой поверхности. Это позволяет обрабатывать деталь всей режущей частью инструмента, что повышает эффективность его использования. Также свободная геометрическая ориентация позволяет достичь оптимальных углов и добиться стабильного резания, что благоприятно сказывается на сроке службы инструмента и качестве обрабатываемой поверхности.

Вместе с тем сложность программирования пятиосевых станков требует применения специальных CAD/CAM систем, а также повышенной квалификации технолога-программиста. Многообразие и, часто, неопределенность траекторий требует от программиста повышенного внимания и постоянной проверки траектории на недопустимые столкновения инструмента с элементами станка и заготовки.

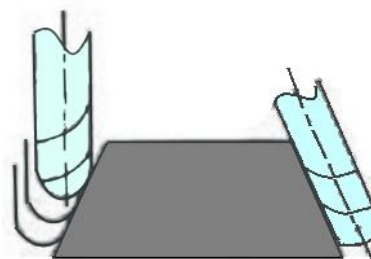


Рис. 3 – Обработка наклонной поверхности при помощи трех- и пятиосевой обработок

Ограничивают эффективность пятиосевой обработки и вибрация, возникающая вследствие более низкой жесткости по сравнению с трехосевыми станками таких же габаритов и снижение жесткости СПИД системы в целом из-за ее сложной пространственной конфигурации.

В настоящее время пятиосевая обработка развивается в различных направлениях. Применение симуляции обработки, которая позволяет с высокой точностью определить характеристики и ограничения

конкретного станка с ЧПУ и учесть их в САМ-системе при дальнейшей разработке управляющих программ [10].

Оптимизация стратегии съема припуска и траектории обработки обеспечивает равномерную нагрузку на инструмент, повышение его стойкости, качества обработанной поверхности и производительности [11, 12]. Баланс между стратегиями резания с высокими подачами, высокоскоростного резания и высокопроизводительного резания может обеспечить дополнительный эффект.

Борьба с вибрациями и погрешностями обработки, вызванные деформацией технологической системы, является одним из основных направлений развития пятиосевой обработки. В частности, активно развивается подход, предполагающий коррекцию управляющей программы на стадии проектирования на основании симуляции процесса фрезерования, внесением на этом этапе поправок в

траекторию, компенсирующих деформацию технологической системы.

Применение специальных программ, которые позволяют определить оптимальные параметры и режимы обработки, существенно сокращает время на подготовку производства и уменьшает количество ошибок [13].

Стратегии обработки согласно [14] условно можно разделить на инструментальные и кинематические. Под выбором инструментальной стратегии подразумевается выбор последовательности обрабатываемых поверхностей и выбор инструментов. Кинематическая стратегия предполагает выбор траектории движения инструмента при обработке. На рис. 4 для примера представлено сравнение стандартной и усовершенствованной трохoidalной стратегий обработки.

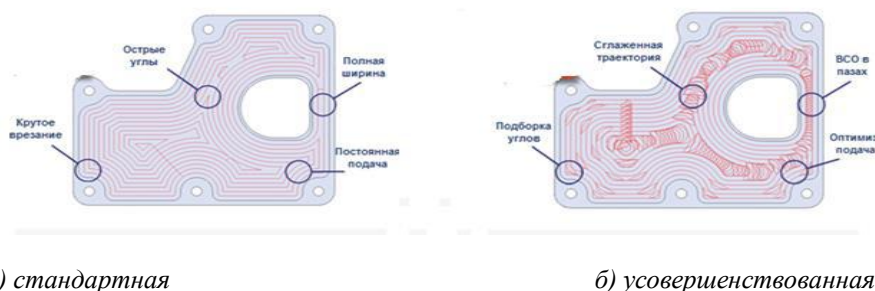


Рис. 4 – Тенденции усовершенствования современной стратегии обработки

В стандартных траекториях обработки (рис. 4а) часто присутствуют острые углы. Они нежелательны при обработке, так как в углу скорость движения инструмента равна нулю, и, следовательно, при изменении направления движения инструмента происходит с ускорением. Это приводит к ускоренному износу инструмента и искажениям обработанной поверхности. Когда возникает необходимость обработки не только прямолинейных участков заготовки, а и канавок по наружному контуру, то возникают проблемы, связанные с применением стандартных стратегий [10]:

- не стабильный режим резания;
- преждевременный износ инструмента;
- низкая производительность.

Согласно [10] при обработке на прямолинейных участках детали угол перекрытия постояен, следовательно, легко добиться соблюдения режимов резания, рекомендованных производителями инструмента. При обработке по наружному контуру (рис. 5а) угол перекрытия уменьшается, а при обработке внутренних углов (рис. 5б) – резко увеличивается. Вместе с тем повышается нагрузка на станок и инструмент, а также

увеличивается количество выделяемого тепла в зоне резания, что приводит к износу инструмента. Чтобы предотвратить рост нагрузки до значений, которые могут повредить инструмент, САМ-система обычно автоматически уменьшает скорость подачи, что приводит к уменьшению производительности.

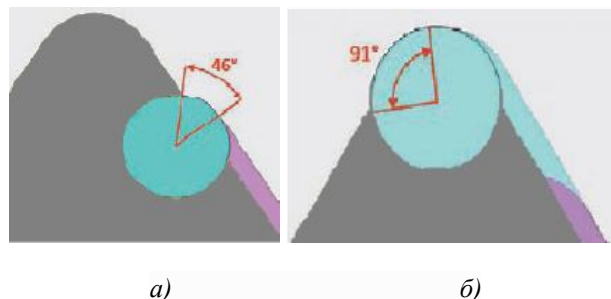


Рис. 5 – Угол перекрытия при обработке по наружному (а) и внутреннему (б) контуру

Эту проблему решает стратегия черновой обработки с автоматическим добавлением трохoidalных участков траекторий. Данная

стратегия увеличивает срок эксплуатации инструмента благодаря небольшому углу перекрытия и удалению лишь небольшого слоя металла за один проход. Производительность в этой стратегии увеличивается за счет существенного увеличения подачи.

Несмотря на то, что по сравнению с обычными стратегиями чернового фрезерования трохойдальная обработка обладает целым рядом несомненных преимуществ, трохойдальные траектории все же характеризуются непостоянной величиной угла перекрытия. Существующая проблема – это стимул к дальнейшему развитию. Последняя разработка в этой области – стратегия Vortex (стратегия для высокоскоростной и пятиосевой обработки). Данная стратегия представляет собой генерацию САМ-системой особых «вихревых» траекторий, обеспечивающих постоянный угол перекрытия. Как следствие, обеспечиваются стабильные режимы резания.

Высокоскоростная обработка (ВСО) является основной стратегией пятиосевой обработки [15]. Принцип ВСО – малое сечение среза, снимаемое с высокой скоростью резания при большой частоте вращения шпинделя и минутной подаче (рис. 6).

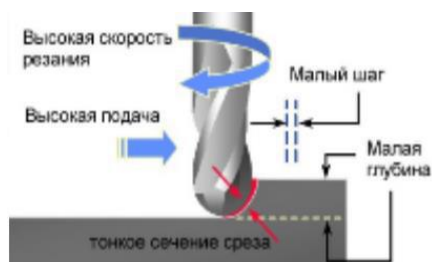


Рис. 6 - Принцип ВСО

За счет этого ВСО обеспечивает высокое качество обработки и производительность, особенно при обработке пространственно-сложных поверхностей из труднообрабатываемых материалов, и, в частности, закаленных сталей. Вместе с тем высокие частоты вращения шпинделя способствуют возбуждению вибраций, как вынужденных колебаний, так и регенеративных автоколебаний.

При обработке деталей в условиях низкой жесткости регенеративные автоколебания возникают только в определенном диапазоне частот вращения шпинделя. Если отношение времени резания одним зубом ($t_{рез}$) к периоду собственных колебаний элемента заготовки или технологической системы ($T_{скз}$), находится в диапазоне от 1 до 7, то возникают регенеративные автоколебания. Во всех остальных случаях возникают вынужденные колебания [16]. В связи с этим примеры подавления колебаний становятся зависимыми от режима резания. Например, использование фрез с разнонаклонными зубьями неэффективно в скоростной зоне, где есть лишь вынужденные колебания, более того

применение несимметричных фрез дополнительно может привести к возбуждению дополнительной неуравновешенности процесса обработки в данном случае. Чем выше частота вращения шпинделя, тем выше значения центробежной силы при дисбалансе и амплитуда вынужденных колебаний. Поэтому, при ВСО большое внимание следует уделять балансировке [17].

Для оценки зон устойчивости к автоколебаниям применяют так называемые «лепестковые диаграммы» [18], определяемые расчетом для данного инструмента и технологической системы. Зоны над кривой считаются нестабильными областями, под кривой – стабильными или зонами устойчивости (рис. 7) [19,20].

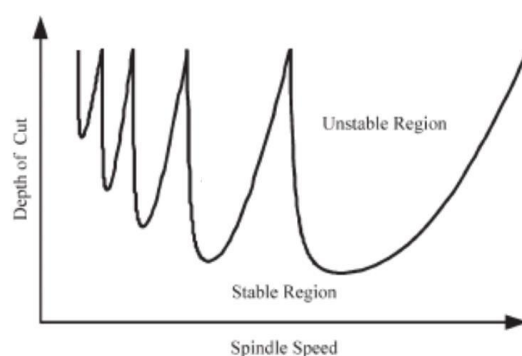


Рис. 7 - Типичная лепестковая диаграмма стабильности

Возникновение вибрации – сложный процесс, на который влияют многие факторы. В [18, 21, 22] описаны факторы, которые влияют на уровень вибраций. Однако при реализации обработки на пятиосевых станках дополнительно следует принимать во внимание [23]:

- диаметр и количество зубьев. Из двух фрез с одинаковым диаметром, но с различным количеством зубьев более жесткой и прочной будет та, у которой количество зубьев больше, так как большим будет и диаметр сердцевин;

- метод заточки зубьев по задней поверхности. Исполнение фрезы с цилиндрической ленточкой на задней поверхности зуба благоприятно сказывается на виброустойчивости при работе в диапазоне возникновения регенеративных автоколебаний;

- фреза с переменным шагом зубьев. Применение таких фрез позволяет избавиться от регенерации колебаний, как основного источника автоколебаний [11].

- применение фрез с разницей в углах наклона соседних зубьев $\Delta\omega$. Например, при $\Delta\omega=2^\circ$ ширина безвибрационного фрезерования увеличивается в два раза, а при $\Delta\omega=4^\circ$ в 3,5 раза. Дальнейшее увеличение $\Delta\omega$ не имеет существенного влияния на вибростойкость [24].

Высокого уровня эффективности обработки можно достичь путем оптимального подбора инструмента и стратегии обработки в комплексе. Круг вопросов, при выборе которых, велик и включает много аспектов. Оптимальным считается выбор с минимально возможными издержками (время простоя станка и расходы на инструмент) и максимально возможной производительностью.

Выводы

Пятиосевая обработка является современным трендом в металлообрабатывающей промышленности, обеспечивая широкие технологические возможности изготовления сложных пространственных изделий, включая корпуса приборов, режущие инструменты, детали штампов, пресс-форм, лопатки, моноколеса и другие изделия. Компоненты пятиосевых станков обеспечивают возможность обработки деталей как в единичном, так и в серийном производстве; деталей как малой, так и большой массы.

Современное развитие этой технологии связано с увеличением скорости резания и подачи, совершенствованием стратегий обработки, которые обеспечивают постоянство нагрузки на инструмент и плавность траектории. Поэтому, высокоскоростная обработка и обработка с большими подачами являются основными методами съема припуска при пятиосевой обработке фрезерованием.

В силу того, что виброустойчивость процесса фрезерования зависит не только от режимов резания, но и от жесткости технологической системы в текущем ее состоянии перспективным направлением является разработка САМ систем, способных еще на стадии проектирования обработки спрогнозировать и учесть деформацию и вибрационное состояние технологической системы, внося, например, поправки в траекторию инструмента и режим резания.

Список литературы

- 1 HURCO North America : Hurco USA. – Indianapolis. – <http://pdf.directindustry.com/pdf/hurco/tmx-series/5650-166536.html>.
- 2 Vertical Machining Center V22 : Makino. – Tokyo. – <http://www.balling-maskiner.dk/files/kataloger/V22.pdf>.
- 3 Horizontal Machining Center: Makino. – Tokyo. – http://www.balling-maskiner.dk/files/kataloger/a71_a81.pdf.
- 4 Overview: Berthold Hermle AG. – Gosheim. – https://www.hermle.de/cms/en/info_center/media_library/printed_documents.
- 5 CNC universal milling machines DMU 50/70 series : DMG MORI USA. – Hoffman Estates – <http://us.dmgmori.com/blob/304264/16b8b67b9d622a86b3cc4c2a3fce48ba/pm0us13-dmu-50-70-pdf-data.pdf>.
- 6 Universal turn and mill machining CTX beta TC : DMG MORI SEIKI Europe AG. – Dubendorf. – http://media.dmgmori.com/media/epaper/ctx-tc_uk/index.html.

- 7 **Schiffer, R.** Features and Functions of Five-Axis / **R. Schiffer** // *MoldMaking Technology*. – 2016. – №3. – P. 24-30.
- 8 **Чазов, П. А.** Особенности конструкции концевых фрез для обработки труднообрабатываемых материалов / **П. А. Чазов, П. Н. Беспалов, Г. И. Коровин** // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 3 (ч. 2) – С. 316-319.
- 9 **Wang, Z.** Energy Efficient Machining of Titanium Alloys by Controlling Cutting Temperature and Vibration / **Z. Wang, S. Nakashima, M. Larson** // *Procedia CIRP*. – 2014. – vol. 17. – P. 523-528.
- 10 **Евченко, К.** Стратегия Vortex и технология оптимизации MachineDNA от компании Delcam – новые возможности для повышения производительности фрезерной обработки / **К. Евченко, Д. Маслов, А. Пичук, С. Таликин** // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2013. – №1. – С. 112-115.
- 11 **Голдберг, М.** Увеличение производительности благодаря использованию инновационных инструментальных технологий / **М. Голдберг** // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2013. – №2. – С. 12-14.
- 12 **Lauwers, V.** Five-axis milling tool path generation with dynamic step-over calculation based on integrated material removal simulation / **V. Lauwers, D. Plakhotnik** // *Manufacturing Technology*. – 2012. – №61. – P. 139-142.
- 13 **Никонов, А.** Seco Business Solutions: несколько шагов к повышению эффективности в металлообработке / **А. Никонов** // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2012. – №3. – С. 76–77.
- 14 **Аверченко, А. В.** Автоматизация выбора стратегий обработки конструкторско–технологических элементов деталей в технологической подготовке производства изделий / **А. В. Аверченко** // *Вестник УГАТУ*. – 2012. – т. 16 №3(48). – С. 76-80.
- 15 **Ловыгин, А. А.** Будущее САМ–систем / **А. А. Ловыгин** // *САПР и графика*. – 2016. – №1. – С. 8-17.
- 16 **Козлова, О. Б.** Пригнічення регенеративних автоколивань при фрезеруванні тонкостінного елемента деталі кінцевими циліндричними фрезами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 [Електронний ресурс] / **О. Б. Козлова** ; [наук. керівник Дядя С. І.] ; Харківський політехнічний ін-т, нац. техн. ун-т. – Харків, 2016. – 24 с. – Бібліогр. : С. 16-21. – укр.
- 17 **Грачев, Ю. В.** Повышение эффективности высокоскоростного фрезерования центробежных колес / **Ю. В. Грачев, Г. В. Пухальская, С. В. Кричнин, Т. А. Панченко** // *Вестник двигателестроения*. – 2011. – №1. – С. 95-100.
- 18 **Внуков, Ю. Н.** Эволюция развития исследований сил при цилиндрическом фрезеровании от статических к динамическим условиям обработки (часть 2) / **Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова** // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2016. – вип. 11. – С. 20-41.
- 19 **Reza Kashyzadeh, K.** Study of Chatter Analysis in Turning Tool And Control Methods – A Review / **K. Reza Kashyzadeh, M. J. Ostad-Ahmad-Ghorabi** // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. – 2012. – Vol. 2, Issue 4. – P. 1-5.
- 20 **Jean-Vincent Le Lan.** Providing stability maps for milling operation/ **Jean-Vincent Le Lan, Audrey Marty, Jean-Francois Debongnie** // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2007. – № 47. – P. 1493-1496.
- 21 Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / **Мазур Н. П., Внуков Ю. Н.,**

- Грабченко А. И.** и др. ; под общ. ред. Н. П. Мазура и А. И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.
- 22 **Yusoff, A. R.** The role of tool geometry in process damped milling / **A. R. Yusoff, S. Turner, Ch. M. Taylor, N. D. Sims** // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-010-2586-6 Springer Publication (in press). P. 883-895.
- 23 **Внуков Ю. Н.** О влиянии конструктивных и геометрических характеристик концевых фрез на виброустойчивость процесса фрезерования / **Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова** // *Резание и инструмент в технологических системах*. – 2016. – №86. – С. 7-17.
- 24 **Winston A. Knight.** Fundamentals of Metal Machining and Maching Tools / **Winston A. Knight** // *Geofrey Boothoyd*. – Third Edition, 2005. – 608 p.
- Bibliography (transliterated)**
- 1 HURCO North America : Hurco USA. – Indianapolis. – <http://pdf.directindustry.com/pdf/hurco/tmx-series/5650-166536.html>.
- 2 Vertical Machining Center V22 : Makino. – Tokyo. – <http://www.balling-maskiner.dk/files/kataloger/V22.pdf>.
- 3 Horizontal Machining Center: Makino. – Tokyo. – http://www.balling-maskiner.dk/files/kataloger/a71_a81.pdf.
- 4 Overview: Berthold Hermle AG. – Gosheim. – https://www.hermle.de/cms/en/info_center/media_library/printed_documents.
- 5 CNC universal milling machines DMU 50/70 series : DMG MORI USA. – Hoffman Estates – <http://us.dmgmori.com/blob/304264/16b8b67b9d622a86b3cc4c2a3fce48ba/pm0us13-dmu-50-70-pdf-data.pdf>.
- 6 Universal turn and mill machining CTX beta TC : DMG MORI SEIKI Europe AG. – Dubendorf. – http://media.dmgmori.com/media/epaper/ctx-tc_uk/index.html.
- 7 **Schiffer, R.** Features and Functions of Five-Axis. *MoldMaking Technology*. 2016, №3, 24-30.
- 8 **Chazov, P. A., Bepalov, P. N., Korovyn, H. Y.** Osobennosti konstruktivnykh kontsevykh frez dlya obrabotki trudnoobrabatyvaemykh materialov [Design features end mills for machining hard materials]. *Fundamental'nye issledovaniya*. [fundamental research., 2016, № 3 (chast' 2), 316-319.
- 9 **Wang, Z., Nakashima, S., Larson, M.** Energy Efficient Machining of Titanium Alloys by Controlling Cutting Temperature and Vibration. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 17, 523-528.
- 10 **Evchenko, K., Maslov, D., Pinchuk, A., Talikin, S.** Strategija Vortex i tehnologija optimizacii MachineDNA ot kompanii Delcam – novye vozmozhnosti dlja povysheniya proizvoditel'nosti freznoj obrabotki [Vortex MachineDNA strategy and optimization technology from Delcam – new opportunities to improve milling productivity]. *Oborudovanie i instrument dlja professionalov*. [Equipment and tools for professionals]. 2013, №1, 112-115.
- 11 **Goldberg, M.** Uvelichenie proizvoditel'nosti blagodarja ispol'zovaniju innovacionnykh instrumental'nykh tehnologij. [The increase in productivity by using the innovative instrumental technologies] *Oborudovanie i instrument dlja professionalov*. [Equipment and tools for professionals]. 2013, №2, 12-14.
- 12 **Lauwers, B., Plakhotnik, D.** Five-axis milling tool path generation with dynamic step-over calculation based on integrated material removal simulation. *Manufacturing Technology*. 2012, №61, 139-142.
- 13 **Nikonorov, A.** Seco Business Solutions: neskol'ko shagov k povysheniju jeffektivnosti v metalloobrabotke. [Seco Business Solutions: a few steps to improve the efficiency in metalworking]. *Oborudovanie i instrument dlja professionalov*. [Equipment and tools for professionals]. 2012, №3, 76-77.
- 14 **Averchenko, A. V.** Avtomatizacija vybora strategij obrabotki konstruktorsko- tehnologicheskikh jelementov detalej v tehnologicheskoy podgotovke proizvodstva izdelij. [Automation of choice of processing strategies of design and technological elements of details in the technological preparation of production of products]. *Vestnik UGATU*. [Vestnik UGATU] 2012. Vol. 16 №3(48), 76-80.
- 15 **Lovygin, A. A.** Budushhee CAM-sistem. [Future of CAM-systems]. *SAPR i grafika*. [CAD and graphics.]. 2016, №1, 8-17.
- 16 **Kozlova, O. B.** Suppression of regenerative self-excited oscillations at milling of the thin-walled element of detail by end-capping cylindrical milling cutters: Dissertation thesis Candidate of Engineering Science. Kharkiv. 2016, 24 p.
- 17 **Grachev, Ju. V., Puhalskaja, G. V., Kritchin, S. V., Panchenko, T. A.** Povyszenie jeffektivnosti vysokoskorostnogo frezerovaniya centrobezhnykh koles. [Providing of parameters of exactness and quality at the high speed milling of centrifugal wheels]. *Vestnik dvigatelestroeniya*. [Herald of Aeroenginebuilding]. 2011, №1, 95-100.
- 18 **Vnukov, Ju. N., Djadja, S. I., Kozlova, E. B.** Jevoljucija razvitija issledovanij sil pri cilindricheskom frezerovanii ot staticheskikh k dinamicheskim uslovijam obrabotki (chast' 2). [Evolution of research of forces in the cylindrical milling from static to dynamic machining conditions (part 2)]. *Suchasni Tekhnologii v Mashynobuduvanni*. [Modern Technologies in Mechanical Engineering]. 2016, №11, 20-41.
- 19 **Reza Kashyzadeh, K., Ostad-Ahmad-Ghorabi, M. J.** Study of Chatter Analysis in Turning Tool And Control Methods – A Review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012, Vol. 2, Issue 4, 1-5.
- 20 **Jean-Vincent Le Lan, Audrey Marty, Jean-Francois Debongnie.** Providing stability maps for milling operation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007, № 47, 1493-1496 p.
- 21 **Mazur, N. P., Vnukov, Ju. N., Grabchenko, A. I.** Basics of the theory of cutting. Kharkiv: NTU «KhPI». 2013.
- 22 **Yusoff, A. R., Turner, S., Taylor, Ch. M., Sims, N. D.** The role of tool geometry in process damped milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-010-2586-6 Springer Publication (in press). 883-895.
- 23 **Vnukov, Ju. N., Djadja, S. I., Kozlova, E. B.** O vlijanii konstruktivnykh i geometricheskikh harakteristik koncevykh frez na vibroustojchivost' processa frezerovaniya. [About the influence of structural and geometric characteristics of the end mills on chatter stability of the milling process]. *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah* [Cutting and tool in technological systems]. 2016, №86, 7-17.
- a. 24 **Winston, A. Knight.** Fundamentals of Metal Machining and Maching Tools. *Geofrey Boothoyd*. – Third Edition, 2005

Сведения об авторах (About authors)

Бондарь Инна Владимировна – аспирант, Сумский государственный университет, аспирант кафедры «Технология машиностроения верстаты и инструменты», г. Сумы, Украина; e-mail: ishkabond@gmail.com

Inna Bondar – postgraduate, Sumy State University, postgraduate Department of Mechanical Engineering technology machines and tools, Sumy, Ukraine; e-mail: ishkabond@gmail.com

Криворучко Дмитрий Владимирович – доктор технических наук, доцент, Сумский государственный университет, ведущий научный сотрудник кафедры «Технология машиностроения верстаты и инструменты», г. Сумы, Украина; e-mail: dmytro.kryvoruchko@gmail.com

Dmitrij Krivoruchko – Doctor of Technical Sciences, Docent, Sumy State University, Leading Researcher Department of Mechanical Engineering technology machines and tools, Sumy, Ukraine; e-mail: dmytro.kryvoruchko@gmail.com

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Бондарь, И. В. Пятиосевая обработка на фрезерных станках с ЧПУ / **И. В. Бондарь, Д. В. Криворучко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 10-17. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.02.

Please cite this article as:

Bondar, I., Krivoruchko, D. Five-axis machining on CNC milling machines. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, 7 (1229), 10–17, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.02.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бондар, І. В. П'ятиосьова обробка на фрезерних станках з ЧПУ / **І. В. Бондар, Д. В. Криворучко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 10-17. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.02.

АНОТАЦІЯ В даний час деталі машин стають все більш складними і точними. Це вимагає розвитку нових технологій механічної обробки. У цих умовах багатоосьова обробка на фрезерних верстатах з ЧПУ є однією з таких технологій. Незважаючи на 20-ти річну історію розвитку цей підхід все ще вимагає підвищення ефективності для реалізації сучасних завдань. В роботі подано класифікацію п'ятиосьових верстатів і описані сфери їх застосування. Розглянуто переваги та проблеми п'ятиосьової обробки. Проаналізовано сучасні методи підвищення її ефективності.

Ключові слова: п'ятиосьова обробка; високошвидкісна обробка; стратегія обробки; траєкторія обробки; вібрація

Поступила (received) 09.03.2017