

methods of estimation of thermal condition of semitransparent coatings in complex heat exchange combustion chambers for low-heat-rejection diesel engines. FISITA World Automotive Congress. Budapest, 30 May – 4 June 2010. Book of Abstracts, 2010. P.198. Congress CD-ROM, paper № F2010-C081, p.p. 8.

18. Красс М.С., Мерзликин В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда / Л. Гидрометеиздат. 1990. 261 с.
19. Kathiravan Krishnamurthy, Harpreet Kaur Khurana, Soojin Jun, Joseph Irudayaraj, and Ali Demirci. Infrared Heating in Food Processing: An Overview// Comprehensive Reviews in Food Science and food safety. 2008. Vol. 7. С. 2 -13.
20. Спириин Р.И. Разработка технологии хлеба из целого зерна пшеницы с предварительной ИК-обработкой зерна. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / М.: Московский государственный университет пищевых производств. 2007. 24 с.

О некоторых особенностях фрезерования в режиме высокоскоростной обработки (ВСО)

д.т.н. проф. Оленин Л.Д., Очкин Д.И.
Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1327

Аннотация. Статья посвящена анализу особенностей резания в режиме высокоскоростной обработки (ВСО) с целью обеспечения качества и производительности при фрезеровании. Сформулированы требования к оборудованию, режущему и вспомогательному инструменту, а также к подготовке управляющих программ. Проанализированы причины возникновения вибраций при обработке в режиме ВСО, а также способы борьбы с ней. Изложены практические рекомендации по выбору и отладке режимов обработки, в том числе с учетом акустических характеристик технологической системы.

Ключевые слова: эффект Соломона, диаграмма стабильности, трахоидальная обработка, резонанс и диссонанс, термоматрон, дробление, акустический способ.

Высокоскоростная обработка (High Speed Machining), далее ВСО – одна из новых, наиболее быстро развивающихся технологий, способная радикально увеличить эффективность обработки. Её отличительная особенность – использование повышенной скорости резания до величины, при которой силы резания уменьшаются, что позволяет вести обработку с увеличенными подачами. В свою очередь увеличение подачи приводит к увеличению толщины срезаемого слоя и, как следствие, к уменьшению температуры и повышению стойкости инструмента.

О ВСО заговорили в 1931 году, после публикации в Германии Патента № 523594 [1] на имя Карла Соломона, однако до сих пор нет четкого определения, что считать высокоскоростной обработкой, как нет и научного объяснения эффекта, на котором эта технология основана. По современным представлениям кривая зависимости температуры в зоне резания от скорости имеет вид показанный на рисунке 1 [2]. С увеличением скорости температура в зоне резания растет пока не достигнет некоторого критического значения (точка *a*), при котором инструмент утрачивает режущие свойства. При дальнейшем увеличении скорости рост температуры замедляется и она даже несколько падает. Однако после некоторого падения рост температуры возобновляется и на участке после точки *c* условия для работы инструмента вновь становятся неблагоприятными.

Обработку возможно проводить в интервале скоростей от нуля до точки *a*. Это соответствует классической обработке. Обработку можно успешно выполнять также в интервале

скоростей от точки b до точки c , но не следует вести в интервале между точками a и b , а также на участке за точкой c . В этих случаях температура будет заведомо выше критической для данного сочетания материала инструмента и обрабатываемого материала. Резание на участке bc считается высокоскоростной обработкой. Существенно, что для каждого случая скорости резания, при которых достигается критическая температура, (точки a , b , c), будут различными.

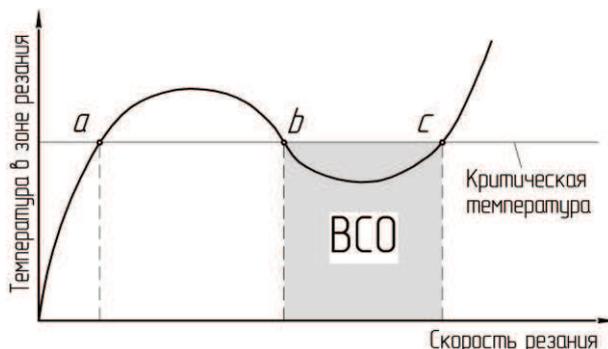


Рисунок 1. К объяснению эффекта Соломона при ВСО

Процесс резания – это непрерывный процесс пластического деформирования материала, обладающего деформационным упрочнением [3]. Основу процесса составляет акт стружкообразования, на долю которого приходится до 80% всей мощности, подводимой в зону резания. В известной степени эффект ВСО связан с изменением температурно-скоростных условий деформирования при стружкообразовании.

Вместе с тем эффект Соломона реализуется преимущественно при фрезеровании, когда инструмент и заготовка контактируют циклически. Обусловлено это тем, что с увеличением скорости резания при фрезеровании температура стружки растёт, а время её контакта с инструментом уменьшается. В результате инструмент и заготовка просто не успевают нагреваться [2, 4]. Поэтому доля тепла, уносимая из зоны резания стружкой, возрастает и при ВСО достигает 80%, а доля тепла, отводимого через инструмент, убывает. Это проявляется, в частности, в том, что на кривой роста температуры (рисунок 1) появляется участок bc , подобный площадке текучести на кривой растяжения. На этом участке реализуются условия, благоприятные для работы режущего инструмента. Считается также [2], что это позволяет производить обработку закаленных сталей, не опасаясь их отпуска и прижогов.

Требования к станку и инструменту. Узлы станка для ВСО должны обладать демпфирующими свойствами, при этом система в целом должна быть жесткой. С этой целью станину и несущие элементы станка изготавливают не из металла, а из полимербетона, он лучше гасит вибрацию, его логарифмический декремент затухания в 10 раз выше, чем у чугуна [5]. Кроме того, за счет увеличенных размеров и сечений станина и несущие элементы станка обладают гораздо большей пространственной жесткостью.

Шпиндель станка для ВСО должен не только обеспечивать высокую частоту вращения и ее плавное бесступенчатое регулирование во всем рабочем диапазоне, при этом крутящий момент на его валу должен быть достаточным для фрезерования с увеличенными подачам, то есть для силового резания.

Приводы подачи станка должны иметь высокие динамические характеристики (разгон-торможение) и так же, как электрошпиндель, обеспечивать возможность плавного регулирования скорости во всем скоростном диапазоне. Это связано с особенностями траекторий ВСО, которые, как правило, состоят из множества коротких перемещений, выполняемых с различными подачами и скоростями резания.

Наиболее полно принципы и возможности ВСО реализуются на 5-ти осевых фрезерных станках [4] и многокоординатных токарно-фрезерных обрабатывающих центрах, оснащенных высокооборотными электрошпинделями. Такие станки позволяют обработать деталь с разных сторон, под различными углами за один установ. При таком подходе за счет concentra-

ции операций удаётся повысить производительность, а за счет постоянства технологических баз повысить точность обработки.

Режущий и вспомогательный инструмент. Из-за высокой температуры в зоне резания инструмент для ВСО должен обладать повышенной красностойкостью, а высокая скорость резания выдвигает повышенные требования к твердости, износостойкости и балансировке.

ВСО предъявляет дополнительные требования и к системам вспомогательного инструмента, которые должны обеспечивать крепление и возможность балансировки инструмента. В связи со снижением сил резания на первый план выходят биение фрезы и вибрации [2]. При ВСО центробежные силы становятся соизмеримыми с силами резания, что приводит к увеличению шероховатости обрабатываемой поверхности, нагрузки на подшипники шпинделя и износа инструмента.

Для ВСО применяют цанговые балансируемые патроны повышенной точности, а также патроны с термозажимом.

У патрона с термозажимом диаметр отверстия для инструмента выполняется несколько меньше диаметра хвостовика инструмента. При нагревании это отверстие расширяется, позволяя установить в него инструмент. При охлаждении материал равномерно сокращается вокруг хвостовика инструмента, обеспечивая концентричное и значительно более жесткое соединение [6], чем цанговые и гидравлические патроны. Но для работы с термпатронами необходимо использовать нагреватель. Это существенно увеличивает время смены инструмента, а также стоимость всей системы. Кроме того, возрастает вероятность получения травмы (ожоги).

Для ВСО также применяют специальные цанговые балансируемые патроны повышенной точности, которые балансируются в сборе с инструментом. Начальный дисбаланс патрона и инструмента компенсируется результирующей центробежной силой, создаваемой двумя балансирующими кольцами со смещенным центром масс. Это позволяет балансировать патрон с инструментом без удаления или добавления материала.

Система охлаждения. При использовании классической системы подачи СОЖ стойкость инструмента значительно снижается, это проявляется главным образом в выкрашивании режущих кромок твердосплавных пластинок, что обусловлено циклическими термическими нагрузками. Постоянная тепловая нагрузка, даже на относительно высоких температурах, лучше, чем меняющаяся при относительно низких температурах циклическая нагрузка. Наиболее предпочтительным является охлаждение масляным туманом и обдув инструмента [2, 4].

Требования к системе ЧПУ. Короткие перемещения и высокие скорости подачи при ВСО, предъявляют повышенные требования к системе ЧПУ. К ним относятся время отработки одного кадра, минимальное перемещение, которое обеспечивает система, максимальная частота вращения шпинделя и возможность предварительного просмотра кадров.

Так, система ЧПУ HEIDENHAIN iTNC 530 [7], которая используется на многих станках для ВСО обладает следующими параметрами: время отработки одного кадра (0,5 мс), минимальные перемещения: линейные оси – 0,1 мкм., круговые оси – 0,0001°, максимальная частота вращения шпинделя – 60 000 мин⁻¹, возможность предварительного просмотра кадров – макс 1024 кадров.

Управляющая программа (УП). ВСО предъявляет дополнительные требования к УП и, как следствие, к САМ системам, в которых эти УП создаются. От САМ системы во многом зависит не только время создания УП, но и её качество, а сама программа определяет время обработки. От неё также зависят износ инструмента и износ станка.

При создании УП для ВСО технолог-программист должен придерживаться некоторых дополнительных правил, выработанных практикой.

Обработку следует вести, используя небольшие сечения срезаемого слоя, но с вы-

сокой минутной подачей. При одновременном уменьшении сечения срезаемого слоя и увеличении скорости резания и минутной подачи производительность изменяется незначительно, но при этом силы резания уменьшаются значительно.

Уменьшение сил резания позволяет использовать электрошпиндель меньшей мощности, уменьшить усилие зажатия заготовки, что позволит обрабатывать тонкостенные заготовки, не опасаясь их деформации и повреждения. Уменьшение сечения срезаемого слоя обеспечивается заданием малой глубины и ширины резания. Тем не менее, при врезании фрезы, а также при обработке узких мест ширина резания, если не скорректировать программу, увеличивается до диаметра фрезы. Это приводит к незапланированному увеличению сил резания.

Для исключения фрезерования всей шириной фрезы используют траекторию движения инструмента, составленную из множества окружностей – траихоиду (рисунок 2). САМ-система для ВСО должна уметь автоматически строить такую траекторию.

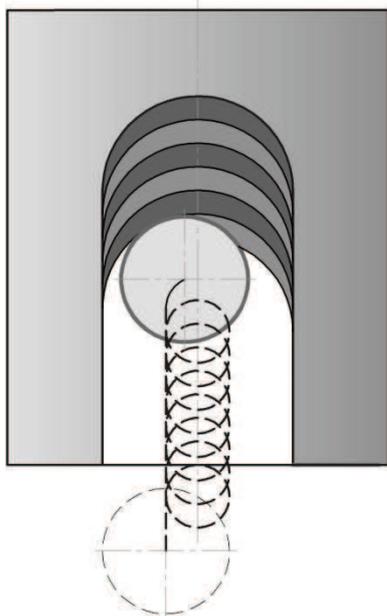


Рисунок 2. Трахоидальная обработка паза

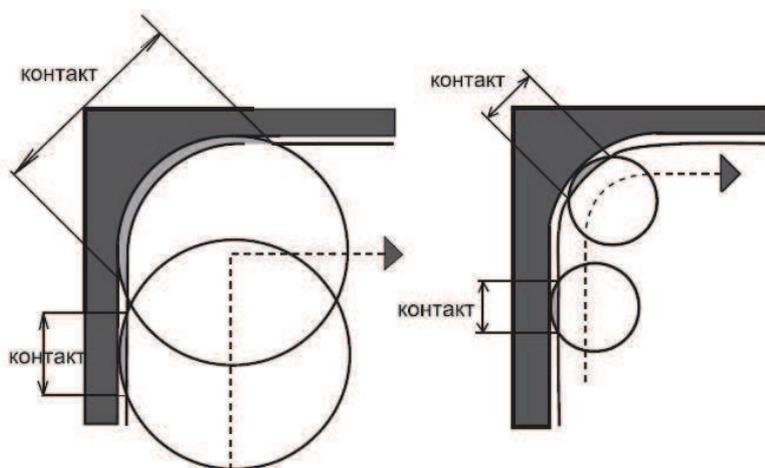


Рисунок 3. Обработка внутренних скруглений [2]

Для исключения непроизвольного увеличения ширины фрезерования внутренние углы и скругления рекомендуется обрабатывать фрезами меньшего диаметра (рисунок 3).

Но при этом следует помнить, что при уменьшении диаметра фрезы ее жесткость уменьшается быстрее, чем диаметр, что уменьшает жесткость системы и может привести к возникновению дробления или даже поломке инструмента.

Траектория движения инструмента должна быть плавной и иметь как можно меньше углов. Из-за более высоких подач при ВСО динамические нагрузки при резкой смене направления движения инструмента значительно выше, чем при классической обработке. Кроме того, каждый раз при резкой смене направления движения, инструмент сначала останавливается, что приводит к сбросу технологической нагрузки и, как следствие, к врезанию фрезы в заготовку [2]. При последующем увеличении скорости нагрузка возрастает, а врезание уменьшается. Это ухудшает качество обработки, резко увеличивает износ инструмента и существенно увеличивает износ станка.

Топология остаточного материала. Исходными данными для формирования УП в САМ-системе являются трехмерная модель детали и модель заготовки, из которой после снятия припуска она должна получиться. Для исключения повторной обработки уже обработанных мест САМ-система должна учитывать, какой объем материала удаляется, и сама перестраивать модель заготовки на каждом переходе. Это необходимо, чтобы после каждого

перехода технолог-программист видел, с каких мест еще необходимо снять припуск.

САМ-система должна обладать функцией оптимизации подачи. К примеру, при полуступенчатой обработке, когда снимаются ступени оставшиеся после черновой обработки, в местах увеличения припуска САМ система должна автоматически снижать подачу, а в местах уменьшения припуска увеличивать её. При классической же обработке технолог задает одно конкретное значение минутной подачи, с которой инструмент должен двигаться по всей траектории обработки.

Назначение режимов резания при ВСО. Максимальная скорость резания при ВСО не всегда обеспечивает максимальную производительность, и связано это не с уменьшением стойкости фрезы. При фрезеровании с частотой вращения шпинделя выше 15000 мин^{-1} появляется интервал частот, в котором резание происходит более стабильно, чем на частотах выше или ниже этого интервала [8], без вибраций и дробления. В этом интервале глубину резания можно увеличить в 2 – 3 раза. Вследствие прерывистого характера резания фрезерованная поверхность имеет характерную волнистость [8]. При каждом последующем проходе выполняется резание «по следу», при этом частота врезаний зубьев накладывается на волнистость обработанной поверхности.

Не очевидно, но процесс резания протекает наиболее стабильно, если волнистость поверхности и вибрация фрезы находятся в одной фазе (в резонансе), как показано на рисунке 4а. В этом случае нагрузка на инструмент постоянна, это оптимальная область частот вращения шпинделя. Напротив, наибольшая вибрация и дробление реализуются, если волнистость поверхности и частота воздействия зубьев фрезы находятся в противофазе, то есть в режиме диссонанса, как это показано на рисунке 4в.

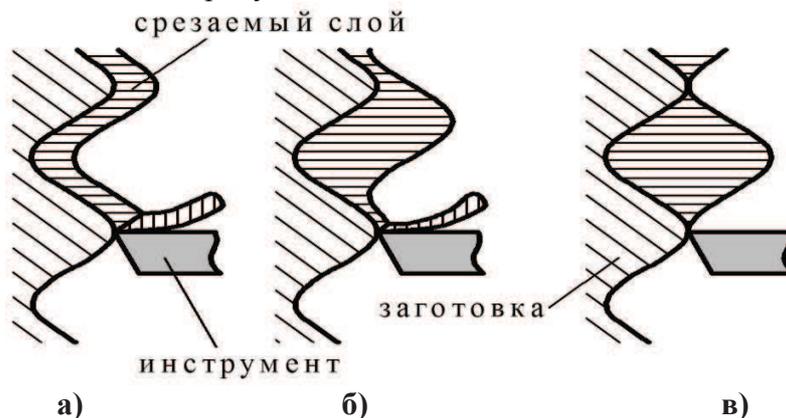


Рисунок 4. Диссонанс и резонанс автоколебаний заготовки и инструмента [8]

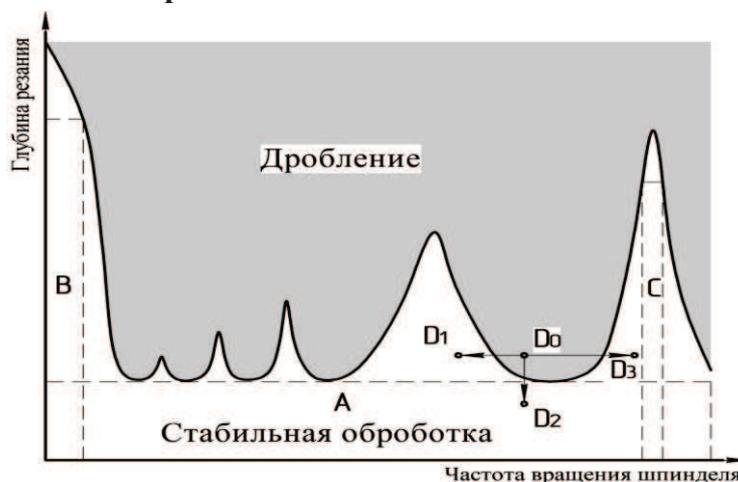


Рисунок 5. Характерный профиль стабильных зон обработки (упрощенный)

На рисунке 5 показан характерный профиль стабильных зон обработки в зависимости

от частоты вращения шпинделя и глубины резания. В зоне **A** резание проходит стабильно на любой частоте вращения шпинделя, но при небольших глубинах резания. Однако производительность при этом невысокая, так как она ограничивается максимальной частотой вращения шпинделя.

В зоне **B** при любой глубине резания обработка проходит стабильно, но при этом на малых оборотах шпинделя производительность невысокая, так как она ограничивается жесткостью станка и инструмента. Это режим силового резания.

Максимальная производительность реализуется при оптимальном сочетании глубины резания и частоты вращения шпинделя, то есть когда частота вращения шпинделя находится в оптимальной зоне обработки, в зоне **C**.

Точка **D0** соответствует режимам, при которых обработка выполняется с дроблением. Для устранения его можно уйти в точку **D1**, либо уменьшить глубину резания и уйти в точку **D2**. Производительность при этом уменьшится. Можно также увеличить частоту вращения шпинделя и уйти в точку **D3**. Производительность при этом увеличится, но придется повторить поиск зон стабильной обработки.

Поиск оптимальных зон обработки по диаграмме стабильности. На тестовой заготовке выполняют несколько серий проходов с разными скоростями вращения шпинделя, оставляя подачу на зуб постоянной для всех проходов каждой серии. На каждой последующей серии увеличивают глубину фрезерования и следят за нагрузкой, так как процесс резания может проходить стабильно даже при таких глубинах резания, когда шпиндель уже не сможет преодолевать возникающую нагрузку. Оптимальные параметры обработки определяют по качеству обработанной поверхности на каждом проходе.

Задавая сечение срезаемого слоя и минутную подачу, скорость съема металла на каждом проходе определяют, как показано на рисунок 6.

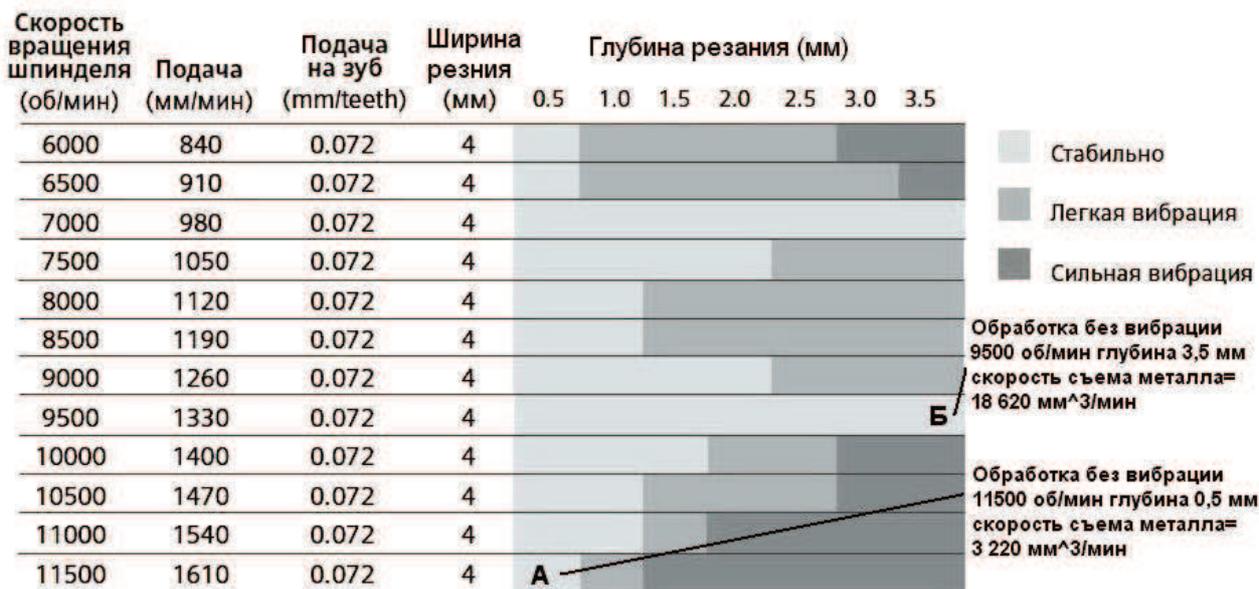


Рисунок 6. Диаграмма зон стабильности [9]

Акустический способ. Оптимальную частоту вращения шпинделя рассчитывают также, используя программное обеспечение, с помощью которого проводится анализ акустической информации, полученной через микрофон, подключенный непосредственно к компьютеру. Используется то обстоятельство, что звук, записанный при проходе на скорости резания, при которой это дробление происходит, содержит также информацию, необходимую для прогноза частоты вращения шпинделя, при которой процесс резания стабилен и дробления нет [8]. Использование такого ПО сокращает время и количество заготовок для поиска зон оптимальной обработки, но необходимость пробных проходов сохраняется.

Способ надежен и прост, но достаточно трудоемкий. Можно испортить не одну заготовку прежде, чем режим будет отработан, кроме того, в случае изменения хотя бы одного из параметров, например, вылета инструмента, процедуру поиска придется повторить. Использование специального программного обеспечения ПО сокращает время поиска зон оптимальной обработки, но требует высокой квалификации оператора-наладчика и дополнительного оборудования.

Заключение

Возможности высокоскоростной обработки, одной из новых быстро развивающихся высокоэффективных технологий, наиболее полно реализуются при фрезеровании на многокоординатных обрабатывающих центрах, оснащенных высокооборотными электрошпинделями.

Назначение режимов является более сложной задачей, чем при классической обработке. Наиболее важными критериями при этом являются диапазоны скоростей резания, в которых инструмент теряет свои режущие свойства, а также интервалы частот вращения шпинделя, в которых отсутствуют условия для появления дробления и вибрации.

Основными требованиями к управляющей программе при этом являются постоянство условий резания и сглаженность траектории движения инструмента.

Несмотря на то, что феномен ВСО известен более 80 лет, внятного научного объяснения он не получил, поэтому возможности технологии используются недостаточно полно.

В этой связи представляется обоснованной актуальность исследований, направленных на создание расчетных методик на основе физических уравнений, полученных в результате исследований процессов резания.

Литература

1. Патент № 523594 April 1931г. Германия.
2. Виттингтон К., Власов В. Высокоскоростная механообработка // «САПР и графика» №11, 2002.
3. Оленин Л.Д. К анализу механики процесса резания упрочняемого материала. Стружкообразование // Известия МГТУ «МАМИ» № 1(5), 2008.
4. Степанов А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве // CAD/CAM/CAE observer № 3, 2002.
5. Биленко С.В. Повышение эффективности высокоскоростной механической обработки на основе подходов нелинейной динамики и нейронносетевое моделирование // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, 2006.
6. Каталог компании GUHRING «GM 300 приспособления для зажима инструмента HSK-/SK, зажимы HSK и оснастка», 2010.
7. Каталог компании HEIDENHAIN «iTNC 530 Универсальная система ЧПУ для фрезерных, расточных станков и обрабатывающих центров», апрель 2010.
8. Потапов В.А. Проблемы вибрации при высокоскоростном фрезеровании алюминия в авиакосмической промышленности и способы их решения // По материалам журнала «MODERN MACHINE SHOP», январь 2001. http://www.instrstan.com/instrument/stati/stati_56.html
9. Выявление пиковой производительности при высокоскоростной обработке // Siemens PLM Software, 17. 06.2010.