УДК 621

Р.И.ДЕДЮХ, Г.Л.КУФАРЕВ, П.Я.КРАУИНЬШ, А.К.МАРТЫНОВ, В.П.НЕСТЕРЕНКО, В.Ф.СКВОРЦОВ, А.И.СЛОСМАН

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Обобщены результаты исследований и разработок кафедр машиностроительного факультета ТПУ по основным научным направлениям за последнее десятилетие. Рассмотрены пути совершенствования процессов обработки материалов резанием и инструментов. Дан анализ нового класса гидравлических, вибрационных и импульсных источников возбуждения колебаний и их приводов. Систематизированы способы и средства импульсного управления сварочными процессами при дуговой сварке, плазменно-порошковой наплавке и сварке трением. Приведены данные по развитию представлений физической мезомеханики поверхностного упрочнения материалов, оптимизации на этой основе составов и технологий упрочняющих и защитных покрытий, включая их компьютерное конструирование. Рассмотрены вопросы разработки теории пассивных автобалансирующих устройств, улучшения геометро-кинематических характеристик известных зубчатых передач и синтеза новых видов механических передач зацеплением промежуточных тел. Приведены сведения по проектированию и созданию гибких производственных систем (ГПС) механообработки деталей точной механики, а также систематические аспекты реализации таких ГПС в условиях действующего производства.

Основным условием подъема промышленного производства в переходный период является его техническое перевооружение на основе опережающего развития науки, вырабатывающей основополагающие принципы создания высокоэффективных технологий производства конкурентоспособной продукции.

Сложившаяся в последние годы на кафедрах машиностроительного факультета тематика научно-исследовательских работ направлена главным образом на решение указанной выше задачи.

В данной статье систематизированы результаты исследований и разработок кафедр факультета за последнее десятилетие по пяти основным научным направлениям.

Совершенствование процесса резания и инструментов

Обработка резанием, благодаря высоким технико-экономическим показателям, по-прежнему преобладает над другими методами обработки деталей, а потому задачи дальнейшего совершенствования процессов обработки резанием и инструментов являются весьма актуальными для современного машиностроения. Ниже изложены основные результаты научных исследований, выполненных в последнее время на кафедрах технологии машиностроения, резания и инструментов и автоматизации и роботизации в машиностроении в рамках решения этих задач.

На основе экспериментальных данных выполнен анализ напряженного состояния в контактном слое сливной стружки [1]. При решении этой задачи впервые учтено действие на стружку изгибающего момента, создаваемого контактными нагрузками. Это позволило определить (также впервые) второе нормальное напряжение, действующее в направлении движения стружки, и тем самым получить полную картину напряженного состояния в различных точках по длине контакта инструмента со стружкой. Расчеты, выполненные с помощью полученного алгоритма для разных обрабатываемых материалов и различных условий резания, показали, что управляющую роль в формировании контактных условий на передней поверхности инструмента играет закономерность изменения фактической площади контакта по пути движения стружки.

Впервые проведено экспериментальное исследование изменения контактных нагрузок в процессе формирования элемента стружки скалывания [2]. В частности, показано, что среднее контактное давление после резкого повышения в начале формирования элемента ступенчато уменьшается: первая ступень соответствует стадии сжатия, вторая – стадии скольжения элемента по плоскости скалывания.

На основе анализа экспериментальных данных о характере стружкообразования при резании различных материалов сформулирована гипотеза об определяющей роли контактных условий на передней поверхности, в частности, соотношения между силами трения и изгибающим стружку моментом как фактора, управляющего видом образующейся стружки [3].

Выполнено экспериментально-теоретическое исследование контактных нагрузок и температур на задней поверхности инструмента при резании различных материалов. Получено распределение механических нагрузок и температур по контуру контакта инструмента с поверхностью резания [4]. Установлена связь между характером этого распределения, уровнем и местом локализации растягивающих напряжений в режущем клине. Показаны и объяснены различия в характере взаимодействия инструмента с поверхностью резания при сливном и элементном стружкообразовании в связи с формированием напряженного состояния в окрестностях режущей кромки.

На базе глубоких экспериментальных исследований механики процесса резания [5] разработан комплект твердосплавных сменных многогранных пластин с винтовой передней поверхностью (защищены патентами), предназначенных для оснащения резцов различного назначения. Конструкция пластин обеспечивает надежное завивание стружки в горизонтальной плоскости и ее отвод из зоны обработки. Причем плотность стружки (плоская винтовая спираль) оказывается в 20 – 100 раз больше плотности стружки, завитой в вертикальной плоскости (цилиндрическая спираль), что позволяет снизить затраты на ее транспортировку и переработку. Разработанные конструкции пластин рекомендуется использовать прежде всего при точении высокопластичных сталей и цветных сплавов, когда применение пластин известных конструкций, обеспечивающих завивание стружки в вертикальной плоскости, оказывается малоэффективным.

Были продолжены начатые ранее исследования по повышению режущих свойств инструментов методом ионной имплантации. Установлено [6], что повышение стойкости режущей пластины после модифицирования ее рабочих поверхностей связано со сложными физическими и химическими процессами, происходящими в приповерхностном слое твердого сплава (упрочнение кобальтовой связки, измельчение зерен карбидов, образование теплостойких химических соединений: оксидов, нитридов, боридов и др.) Обнаружен эффект миграции ионов тяжелых металлов (Zr, Mo) вглубь, которая сопровождает процесс изнашивания пластины и позволяет сохранить ее повышенные режущие свойства до износа, существенно превышающего первоначальную глубину залегания имплантированной примеси [6,7]. Впервые проведено в одинаковых условиях резания сравнение результатов имплантации на различных имплантерах: при непрерывном режиме излучения (газометаллическая плазма) и импульсно-периодическом излучении (металлическая плазма) [8]. Изучено воздействие модификации поверхностей на контактные характеристики и параметры процесса стружкообразования [9]. Определены оптимальные составы пучков и режимы имплантации для различных инструментальных материалов и видов инструментов.

Для повышения надежности режущего инструмента предложен, теоретически и экспериментально исследован метод прогнозирования износостойкости путем измерения температуропроводности твердого сплава [10]. Проведено сравнительное исследование различных методов прогнозирования, которое показало, что предложенный метод дает наилучшие результаты и успешно может быть реализован на практике.

Значительные научные и практические результаты получены в направлении совершенствования технологии обработки точных отверстий.

Разработаны основы теории самоустанавливающихся технологических систем для обработки точных отверстий [11 – 14]. В частности, установлены зависимости структурной схемы самоустанавливающихся технологических систем от класса кинематической пары «инструмент – заготовка». Дана классификация конструкций осевых мерных инструментов по классам кинематической пары «инструмент – заготовка». Показано, что самоустанавливающимися могут быть любые конструкции осевых мерных инструментов. Разработана методика проектирования структурных схем самоустанавливающихся технологических систем для обработки отверстий. Доказано, что наибольшая точность обработки отверстий обеспечивается самоустанавливающимися инструментами с определенностью базирования.

Разработана новая технология дорнования отверстий малых (1 – 2 мм) диаметров твердосплавными прошивками [15,16], позволяющая существенно повысить эффективность их обработки. Исследованы особенности контактного взаимодействия инструментов с заготовкой. Детально изучены технологические возможности дорнования применительно к обработке отверстий в заготовках из конструкционных сталей и цветных сплавов. В частности, установлено, что дорнование позволяет повысить точность отверстий с JT9...JT11 до JT4...JT6, обеспечить шероховатость поверхности отверстий, соответствующую параметру Ra ≤ 0,1 мкм, а также значительно упрочнить поверхностный слой. Для реализации процесса дорнования в условиях серийного и массового производства разработаны конструкции специальных станков [17,18], оснащенных системами циклового программного управления.

Гидравлические, вибрационные и импульсные источники возбуждения колебаний и их приводы

Вибрационные и импульсные источники периодического действия широко распространены в различных технологических приложениях. К таким приложениям относится: установки для виброабразивной обработки и вибротранспорта; вибраторы для возбуждения волновых полей в сварных конструкциях для снижения остаточных напряжений (вибрационное старение); источники для создания импульсов или вибрации в сплошных средах для очистки коллекторов нефтедобывающих скважин, а также излучатели для вибрационной и виброимпульсной сейсморазведки и др.

Во многих технологических машинах применяются наиболее простые, дебалансные и эксцентриковые вибровозбудители, снабженные асинхронными электродвигателями с частотным управлением. Гидравлические вибровозбудители, в основном, распространены в двух видах исполнения: с дроссельным управлением параметрами вибрации или импульса и с объемным способом управления параметрами вибрации или импульса.

В Томском политехническом университете в начале 70-х годов был предложен новый класс вибрационных механизмов, содержащих гидрообъемный генератор колебаний, исполнительный механизм на упругих оболочках – рукавах высокого давления (РВД), и силовой гидропривод с объемным регулированием. Такая схема вибромеханизма гарантирует высокий коэффициент полезного действия, малую материалоемкость и гибкость конструкции.

В результате исследований исполнительных механизмов с рабочими камерами, выполненными с применением радиально симметрично деформированных оболочек (РВД), выявлены их кинематические и упругие свойства. Установлены закономерности формирования потерь в оболочках, стенки которых при использовании в исполнительных механизмах совершают радиальные симметричные перемещения. Такое движение стенок при периодическом возбуждении в них пульсирующего потока, создаваемого генератором колебаний, приводит в определенных случаях к возникновению дополнительного возбуждения. В результате этих исследований были созданы и внедрены на предприятиях ряд вибрационных стендов для испытания изделий и создано несколько новых схем конструкций исполнительных механизмов и регулируемых генераторов колебаний [19, 20].

Особенность упругих свойств оболочек исполнительных механизмов виброисточников с объемным генератором колебаний позволяет создавать не только гармонические колебания, но и колебания, близкие по форме к периодическим импульсам. Проведенные исследования [20] показали, что наиболее эффективно удается исказить выходные колебания, когда применяются однополостные исполнительные механизмы и размах их колебаний соизмерим с внутренним диаметром оболочки. Возбуждение колебаний может производиться в этих механизмах, как на основной резонансной частоте, так и на частотах, близких к первому обертону. В таких случаях в колебательной системе возникают явления захвата, и, несмотря на то, что генератор возбуждает колебания на обертоне, выходные колебания близки к резонансной частоте и, следовательно, происходит параметрическое возбуждение колебаний. Такой режим работы виброисточника является эффективным, если цикловые потери энергии не превышают четвертую часть цикловой энергии, вводимой

в систему гидрообъемным генератором. Исследована также возможность автоматической стабилизации колебаний посредством управления амплитудой колебаний генератора.

Анализ процессов стабилизации размеров в сварных конструкциях при помощи специальных вибровозбудителей привел к созданию гидрообъемных накладных вибраторов с прецизионно управляемой амплитудой и частотой колебаний и, одновременно, с перестраиваемой собственной частотой резонансного контура вибратора. Применение такого накладного вибратора позволило вводить в изделие, на требуемых частотах обработки, дозированную энергию колебаний, а также, благодаря взаимодействию резонансных колебаний изделия и вибратора, производить диагностику процесса старения. Рассмотрены также различные схемы управления характеристикой гидропривода генератора колебаний, обеспечивающего усиления процесса взаимодействия при изменении собственной частоты изделия [21].

Развитие полевой, региональной и глобальной сейсмики потребовало создание новой вибрационной сейсмической техники, предназначенной для изучения земной коры и верхней мантии. В рамках целевой программы СО РАН были созданы полногабаритные макеты управляемых по частоте виброисточников и проведены их полевые испытания [22], а результаты исследований обобщены в работах [23].

Особую группу вибромеханизмов для возбуждения управляемых прецизионных колебаний составляют виброисточники для скважинной и полевой сейсморазведки. Объем исследований в скважинах, проводимый при бурении или эксплуатации, особенно параметрических, достаточно велик, поэтому для сокращения времени при проведении межскважинного сейсмического просвечивания требуются источники с достаточно высокой цикловой энергией. Ограничения, накладываемые каротажным кабелем по способности передавать эту мощность к виброисточнику, расположенному в скважине, являются серьезным препятствием на пути создания таких источников. Альтернативой служат разработанные нами источники, использующие гидростатическую энергию столба жидкости. Поисковые исследования в рамках региональной программы «Нефть и газ» позволили создать полногабаритный макет источника, с гидрообъемным приводом, работающим в неустановившемся переходном режиме с внешней программной коррекцией развертки частоты СВИП-сигнала [24,25], однако начавшийся процесс перестройки и продолжающийся кризис в мировой нефтедобывающей отрасли не позволил закончить эти работы полевыми исследованиями источника как прецизионного сейсмического излучателя. Наряду с вибрационным источником колебаний давления был предложен и испытан в скважинах, с частичной регистрацией сейсмического отклика на поверхности, специальный управляемый импульсный источник давления с отрицательным передним фронтом [26]. На момент создания этого источника в скважинной сейсморазведочной практике применялись только взрывные устройства малой мощности. Микровзрывы имеют высокочастотный спектр импульса, поэтому такой импульс автоматически локализован в пространстве скважины на малой длине, однако нестабильность их характеристик и быстрое затухание сигнала на пути распространения требуют применения режима многократного накопления сигнала.

Дальнейшие исследования импульсного источника давления с отрицательным передним фронтом посредством изучения математических моделей взаимодействия источника с волноводом – скважиной и около скважинным пространством позволили предложить импульсный источник с динамическими пакерами, позволяющими, в основном, подавить волны-помехи, распространяющиеся по жидкостному волноводу скважины. В результате этих исследований создано надежное управляемое устройство быстрого открытия рабочих окон камеры, разработана ударно-волновая технология воздействия на нефтяной пласт в зоне перфорации и проведены опытные испытания в нескольких добывающих скважинах с положительным эффектом по притоку флюидов.

Управление технологическими свойствами источников энергии при сварке

Современный уровень развития сварочной техники и технологии отличает большое разнообразие источников нагрева, их энергетических характеристик и способов теплового и силового воздействия на изделие. В данном разделе обзора систематизированы способы и средства управления

сварочными процессами при дуговой сварке, плазменно-порошковой наплавке и сварке трением, разработанные на кафедре оборудования и технологии сварочного производства.

Для управления технологическими свойствами сварочной дуги в последние годы широко используют электрическое регулирование, в частности, – модуляцию сварочного тока.

Наиболее широкое применение модуляция тока как способ управления сварочными процессами получила при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом тонкостенных изделий. При этом большинство материалов сваривают на постоянном токе.

При сварке алюминия и его сплавов исходя из требований катодного распыления окисной пленки, как правило, используют переменный ток. Однако малоамперная дуга переменного тока обладает низкой физической и пространственной устойчивостью, что затрудняет сварку металла малых толщин.

Для решения проблемы сварки алюминиевых сплавов малых толщин на кафедре разработан новый способ аргонодуговой сварки неплавящимся электродом на переменном прямоугольном модулированном токе [27, 28] и специальный источник питания для его реализации [29]. Схемное решение источника питания, выполненного на базе мостового тиристорного преобразователя, обеспечивает смену полярности тока в сварочной цепи в течение 3 – 7 мкс и кратковременное ограничение тока дуги до и после смены полярности. Это существенно повышает физическую и пространственную устойчивость малоамперной дуги и тем самым стабилизирует ее горение. Кроме того, предложенный закон модуляции тока обеспечивает широкие возможности управления процессами проплавления основного металла, его кристаллизацией и формированием шва.

При дуговой сварке покрытыми электродами модуляция сварочного тока предоставляет возможность освободить сварщика от трудоемкой операции по дозированию тепловой энергии, вводимой в сварочную ванну, что значительно облегчает сварку в вертикальном и потолочном положениях, стабилизирует качество сварного соединения, повышает производительность. Однако широкое применение модуляции тока при данном процессе сварки сдерживается его низкой технологической устойчивостью, обусловленной короткими замыканиями дугового промежутка, возникающими во время паузы при уменьшении тока импульса. Такие замыкания вследствие малого амплитудного значения тока приводят к затягиванию перехода капли электродного металла, и как следствие, к нарушению процесса сварки в виде «примерзания» электрода к изделию.

В работе [30] разработан новый способ дуговой сварки покрытыми электродами модулированным током, лишенный указанного недостатка. Способ реализован с помощью специального устройства, которое обеспечивает включение по сигналам обратной связи тока импульса на время короткого замыкания, возникшего в период протекания тока паузы. Это принудительно активизирует разрушение жидкой перемычки между электродом и сварочной ванной, что создает условия для ускоренного перехода капли электродного металла и своевременного зажигания дуги. Установлено [30], что принудительная активизация разрушения перемычки во время паузы позволяет в 3 – 4 раза повысить технологическую устойчивость процесса сварки, оцениваемую по минимальному толку паузы.

Идея принудительной активизации разрушения перемычки при малом токе была реализована также при разработке малогабаритного однофазного сварочного выпрямителя для сварки покрытыми электродами тонколистового металла [31]. Выпрямитель обеспечивает высокую устойчивость процесса при сварке на малых токах (15 – 90А), что позволяет сваривать тонколистовой металл толщиной 0,8 – 1,5 мм.

С целью повышения производительности сварочно-монтажных работ при сооружении в условиях Сибири магистральных газонефтепроводов корневой слой шва в процессе сварки неповоротных стыков выполняют способом сверху вниз специальными электродами с покрытием основного вида. Главным недостатком указанных электродов при сварке сверху вниз является малый «запас технологичности», что выражается в затекании шлака под дугу и нарушении стабильности сварочного процесса. Поэтому данные электроды не всегда обеспечивают стабильный провар корня шва.

В работе [32] установлено, что увеличение «запаса технологичности» электродов с покрытием основного вида при сварке сверху вниз может быть достигнуто путем усиления динамического силового воздействия дуги на сварочную ванну посредством модуляции сварочного тока. Для этого наиболее целесообразно осуществлять питание дуги током с пульсациями низкой частоты – до 5 Гц. Причем во время паузы для предотвращения затекания шлака под дугу необходимо включать дополнительные импульсы сварочного тока длительностью не менее 0,007 с и с частотой следования ≥ 20 Гц. На этой основе разработан новый способ сварки покрытыми электродами сверху вниз модулированным током, обеспечивающий стабильное проплавление корня шва и высокую линейную скорость сварки.

Наложение на дугу во время паузы дополнительных импульсов сварочного тока наряду с указанными выше преимуществами позволяет эффективно управлять процессом кристаллизации металла.

Совместное изучение макрошлифов, кинограмм и осцилограмм процесса дуговой сварки стали 12Х18Н9Т покрытыми электродами и неплавящимся электродом в аргоне позволило установить, что дополнительные импульсы тока в паузе, оказывая тепловое и силовое воздействие на металл сварочной ванны в процессе его кристаллизации, приводят к прекращению роста столбчатых дендритов и образованию прослоек мелкозернистой дезориентированной структуры. Расстояние между прослойками измельченной структуры зависит от частоты следования дополнительных импульсов тока и скорости сварки. При частоте, близкой к оптимальной, области направленной кристаллизации практически исчезают.

Положительный эффект применения модуляции сварочного тока проявляется также при плазменно-порошковой наплавке. Исследованиями установлено, что плазменно-порошковая наплавка модулированным током позволяет получить меньшее разбавление наплавленного металла основным, что повышает однородность наплавленного слоя и снижает разброс значений твердости. Кроме того, вследствие снижения накопления излишнего тепла в детали величина остаточных деформаций уменьшается на 30 – 40%. Результаты металлографического, микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализов наплавленных покрытий из сплава ПР – Н70Х17С4П4 показали, что дисперсность структуры, в особенности выделений упрочняющей фазы (карбидов, боридов и карбоборидов хрома), выше у покрытий, наплавленных импульсной дугой по сравнению со стационарной. Такая структура обеспечивает сочетание высокой твердости и износостойкости с хорошим сопротивлением ударным нагрузкам.

При плазменно-порошковой наплавке композиционных сплавов вследствие перегрева армирующих частиц в дуге и жидком металле существует опасность их растворения в металле матрицы. В результате уменьшается концентрация износостойких составляющих, а матрица сплава теряет пластичность, увеличивая склонность к трещинообразованию.

С целью предотвращения растворения армирующих частиц в металле матрицы разработан принципиально новый способ плазменно-порошковой наплавки композиционных сплавов [33]. Наплавку при данном способе осуществляют модулированным током смесью порошков, состоящей из порошков матричного сплава и армирующих частиц. При этом порошки смеси подают в плазменную дугу раздельно. Во время действия импульса тока подают порошок матричного сплава, а во время паузы – армирующие частицы.

Результаты исследования композиционного сплава, наплавленного разработанным способом с использованием в качестве металлической связки порошков самофлюсующихся хромоникелевых сплавов, а в качестве армирующих частиц – порошков карбидов вольфрама, титана и ниобия, показали, что раздельная подача порошков обеспечивает защиту армирующих частиц от перегрева в дуге и длительного взаимодействия при высокой температуре с металлом матрицы. Потери карбидного порошка не превышают 5%, что практически свидетельствует об отсутствии их растворения в металле матрицы. Полученные покрытия представляют собой сплав, содержащий пластичную матрицу из сплава – связки и равномерно дисперсированные в ней частицы тугоплавких соединений.

Импульсное регулирование технологических свойств источника энергии можно эффективно использовать при сварке трением. Так, после сварки трением заготовок концевого режущего инструмента требуется дополнительная термическая операция – отжиг, что увеличивает затраты на его изготовление.

В работе [34] показано, что устранить операцию отжига заготовок после сварки трением возможно путем перевода процесса сварки в температурный интервал сверхпластичности (15 – 25°С ниже температуры фазовых превращений). С этой целью был разработан новый способ сварки трением [35] и машина для его реализации [36], позволяющие управлять скоростью нагрева посредством импульсного регулирования силового и теплового воздействия на стык сварки. Установлено [37], что новая технология сварки трением биметаллического концевого режущего инструмента позволяет устранить операцию отжига и повысить за счет увеличения прочности сварного соединения надежность инструмента. Повышение прочности сварного соединения обусловлено устранением в зоне термического влияния участка перегрева и блестящих полос скольжения, являющихся карбидными образованиями.

Благодаря разработанному способу сварки трением стало возможным производство биметаллических пик отбойных молотков, рабочая часть которых изготавливается из стали ШХ15, а хвостовая из стали 50. Заводские стендовые испытания таких пик показали высокую их работоспособность и надежность по сравнению с цельными.

Материаловедение и технология новых материалов

Последние годы классические представления материаловедения о природе свойств материалов и путях их повышения оказались в значительной мере исчерпанными: для создания высокоэффективных материалов нового поколения необходимы новые подходы к вопросам о природе пластичности и прочности материалов, новые композиции, новые технологии современных материалов.

Теоретической основой создания таких подходов является физическая мезомеханика материалов — новое научное направление, возникшее в последние годы на стыке теории дислокаций, рассматривающей природу пластичности и прочности на микромасштабном уровне, и механики деформируемого твердого тела, рассматривающей эти вопросы на макромасштабном уровне. В основе физической мезомеханики лежат представления о деформируемом твердом теле как о многоуровневой иерархически самоорганизующейся системе, в которой микро-, мезо- и макроуровни пластической деформации органически связаны [38]. Разрушение является завершающей стадией процесса деформации на макроуровне. Поэтому задержка включения в процесс деформации макромасштабного уровня, сохранение определяющей роли микро- и мезоуровня должно способствовать повышению работоспособности материалов.

Ведущие позиции в развитии физической мезомеханики материалов занимает томская школа материаловедов, возглавляемая академиком РАН, заведующим кафедрой композиционных материалов и покрытий ТПУ В.Е.Паниным. Томский политехнический университет является одним из организаторов ряда международных конференций по этому научному направлению.

С позиций физической мезомеханики в ТПУ в последние годы были проведены исследования по разработке составов и технологий новых безвольфрамовых твердых сплавов [39], высокопрочной циркониевой керамики конструкционного и инструментального назначения [40,41]. Одним из основных направлений научной деятельности в настоящее время является развитие представлений физической мезомеханики поверхностно упрочненных материалов, оптимизация на этой основе составов и технологий упрочняющих и защитных покрытий, включая их компьютерное конструирование. Основная часть исследований по мезомеханике поверхностно упрочненных материалов проведена на конструкционных и инструментальных сталях, подвергнутых ионному азотированию [6 – 8].

В работах [45 – 47] показано, что для поверхностно упрочненных материалов при механическом нагружении характерен ряд особенностей. Во-первых, в упрочненных слоях затруднена деформация на микроуровне (движение дислокаций). Во-вторых, на границе упрочненного слоя и

сердцевины при нагружении возникают контактные напряжения, имеющие осциллирующий характер. Периодичность пиковых значений этих напряжений связана с толщиной упрочненного слоя, его механическими характеристиками и обычно соответствует мезомасштабному уровню. Оба эти фактора способствуют тому, что в процессе пластической деформации поверхностно упрочненных материалов определяющую роль играет процесс на мезоуровне.

Релаксация пиковых значений осциллирующих контактных напряжений на упрочненной поверхности происходит путем образования квазипериодической системы микротрещин, а в неупрочненном объеме – путем образования и распространения соответствующей системы мезополос локализованной деформации в направлении максимальных касательных напряжений. Эти полосы, взаимно пересекаясь, формируют в объеме мезоструктуру, и дальнейшая деформация происходит путем движения отдельных элементов этой мезоструктуры (мезообъемов) как целого. Таким образом, важным механизмом пластической деформации на мезоуровне является фрагментация, а также образование деформационных доменов. Последнее убедительно подтверждается анализом картин полей векторов смещений на поверхности деформируемых образцов, полученных с помощью оптико-телевизионного измерительного комплекса, снабженного системой компьютерной обработки изображений. Другой важной закономерностью является модуляция напряжений и деформаций на границе раздела (отдельных мезообъемов, упрочненного слоя и подложки и т. д.), что приводит к гофрированию как на поверхности, так и в объеме материала, причем гофрирование предваряет процесс образования деформационных доменов. Это также подтверждается анализом картин полей векторов смещений.

В указанных экспериментальных исследованиях показано, что в процессе пластической деформации действует принцип масштабной инвариантности процессов деформации на разных масштабных уровнях.

Экспериментальные результаты достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными при компьютерном моделировании поведения поверхностно упрочненных материалов, что можно считать первым этапом в компьютерном конструировании таких материалов.

Результаты исследований позволяют более адекватно анализировать механизмы усталостного разрушения, изнашивания, прогнозировать поведение поверхностно упрочненных изделий в различных условиях эксплуатации.

Одним из распространенных вариантов технологий нанесения покрытий на различные изделия с целью восстановления их размеров или повышения эксплуатационных характеристик является нанесение газотермических покрытий. На кафедре композиционных материалов и покрытий работа в области газотермических покрытий ведется в трех направлениях: [48] разработка и создание САПР (для проектирования технологии получения покрытия на заданной детали), моделирование процесса напыления (для выбора оптимальных параметров процесса), компьютерное конструирование материала покрытия (выбор химического состава, задание структуры материала покрытия).

В рамках первого направления разработана маршрутная схема проектирования «Газотермика», создана компьютерная программа прохождения маршрута с выбором технологического процесса в диалоговом режиме. Для информационного обеспечения разработаны базы данных по типовым технологическим процессам, материалам, оборудованию.

С позиций макроструктуры газотермические покрытия представляют собой пористый материал ячеистого типа с разветвленной системой границ. Особенностью формирования структуры материала покрытия является то, что ведущая роль при этом принадлежит теплофизическим процессам, в первую очередь, на мезоуровне, т. е. в объеме напыленной деформированной частицы – сплэта. Разработанные модели взаимодействия частица – подложка и проведенное численное моделирование показывают, что, регулируя условия формирования мезоструктуры, можно влиять на микроструктуру (изменяя ее от кристаллической до аморфной). Важная роль в формировании механических свойств как покрытий, так и изделия с покрытием в целом принадлежит возникающим в процессе напыления границам различного типа.

Указанные особенности формирования газотермических покрытий, проявляемые на различных масштабных уровнях, лежат в основе компьютерного конструирования материала покрытия с заданными свойствами.

Все эти работы проводились в тесном сотрудничестве с Институтом физики прочности и материаловедения в рамках Российского материаловедческого центра. Еще одним многие годы развиваемом в Томском политехническом университете направлении в области материаловедения является термическая обработка, структура и свойства инструментальных сталей и сплавов. В рамках этого направления под руководством профессора И.О.Хазанова проведен цикл исследований по термической, механической, термомеханической обработке быстрорежущих сталей, по сверхпластичности, литому и сварному инструменту из быстрорежущих сталей [49,50].

Результаты научных исследований внедрены на Томском заводе режущих инструментов, Томском химфармзаводе (поверхностное упрочнение пресс-инструмента) и других предприятиях Томска.

Динамика и прочность машин и механизмов

Сотрудники кафедр теоретической механики, сопротивления материалов и прикладной механики занимаются решением проблемы увеличения ресурса машин при наложенных ограничениях на массу и габариты. При этом решаются задачи динамики, прочности и жесткости узлов машин и механизмов. В предлагаемой работе проводится анализ полученных результатов исследований по данной проблеме.

Группой сотрудников разработана теория пассивных автобалансирующих устройств, где в качестве корректирующих элементов используются шары, маятники и жидкость [51]. Определены причины остаточной неуравновешенности роторов и даны рекомендации по расчету эксцентриситета беговой дорожки шаров и выбору посадки обоймы автобалансирующего на вал ротора, допустимой шероховатости и твердости поверхности беговой дорожки. Рассмотрены механические системы, имеющие несколько собственных частот, и найдены диапазоны частот вращения ротора, где имеет место автоматическая балансировка. Наряду с механическими рассмотрены и жидкостные автобалансирующие устройства и впервые разработаны многокамерные устройства, имеющие высокую эффективность балансировки. Теоретические исследования доведены до инженерных методик и проверены многочисленными экспериментальными исследованиями и испытаниями на заводах опытных партий ручных шлифовальных машин с установленными на них шаровыми автобалансирующими устройствами [52].

Определенные успехи достигнуты сотрудниками кафедры прикладной механики по проблемам улучшения геометро-кинематических характеристик известных зубчатых передач и синтеза новых видов механических передач зацеплением промежуточных тел. К достоинствам новых видов передач можно отнести удобство компоновки, технологичность и малая чувствительность к погрешностям. На базе новых принципов созданы и исследуются передачи с произвольным расположением осей валов колес, волновые передачи, вариаторы, планетарные передачи с некруглыми колесами и т.д.

Одним из ключевых вопросов при расчете новых передач является разработка нормы кинематической точности и связанные с ним проблемы назначения допусков изготовления и монтажа при удовлетворении требований плавности хода. Проведенные М.В.Горбенко исследования влияния эксцентриситетов установки колес, осевых ошибок монтажа и угла пересечения осей подтвердили предположение о малой чувствительности к погрешностям. Так, в ортогональной передаче с $U = 2$ мгновенные колебания передаточного отношения в диапазоне углов монтажа φ = 89,5 – 91,5 градусов не превзошли 0,02. При уменьшении радиуса промежуточного элемента-шарика до 1,05 раза от теоретического также не оказывает существенного влияния на плавность хода. Последнее обстоятельство является весьма существенным, поскольку расширяет диапазон регулирования монтажных допусков. Однако при этом возрастает кинематический мертвый ход до 0,8 градуса. На основании проведенных исследований составлены таблицы норм кинематической точности для рядовых передач.

Разработкой и исследованием вариантов зацепления с промежуточными телами занимается Т.Ю.Ищенко. Это новый перспективный тип передачи, имеющий по сравнению с вариаторами трения большие преимущества. Они отличаются стабильностью механической характеристики, сравнимой с механическими характеристиками зубчатых передач, из-за практического отсутствия геометрического скольжения на площадках контакта тел цепи передачи энергии, тогда как в вариаторах других известных типов частота вращения выходного вала может отличаться от расчетных значений до 20% из-за большого геометрического скольжения в них. Кроме того, вариаторы с промежуточными телами несложны по конструкции, обладают большой степенью ремонтопригодности, не требуют для своего изготовления специального оборудования, реверсивны и обратимы. Изданы методические рекомендации к ГОССТАНДАРТу по комплексному расчету их геометро-кинематических, силовых и прочностных параметров этих вариантов и ряд монографий по научному обоснованию методик расчета [53].

В последнее время получил развитие новый вид шестеренной гидромашины планетарного типа с некруглыми центральными колесами. Обладая лучшими энергетическими показателями, она имеет ряд недостатков, одним из которых является нетехнологичность, связанная с наличием разнопрофильных зубьев на центральных колесах. Если в качестве профилей зубьев на центральных колесах принять дугу окружности, то зубья могут быть заменены промежуточными элементами, например роликами [54]. Поскольку центроидами центральных колес являются сложные кривые, то для сопряженности колес зубья сателлитов должны иметь разные циклоидальные профили. Для оценки степени сопряженности был рассмотрен случай, когда центроида внутреннего центрального колеса составлена из прямых и дуг окружностей. Используя свойства мгновенных центров скоростей плоского движения, получена система из двух дифференциальных уравнений, связывающих параметры центроид колес. При решении системы уравнений были учтены условия непрерывного периодического движения колес: длины центроид колес должны быть кратными шагу зубьев. Дифференциальнные уравнения с краевыми условиями решались методом стрельбы по схемам Рунге-Кутта. Корректировка решения осуществлялась методом дихотомии.

В качестве приближенного зацепления принято центроидное зацепление: центры роликов расположены на центроидах центральных колес. При назначении параметров руководствовались следующими соображениями:

1. Толщина зуба сателлита по начальной окружности приблизительно равна диаметру ролика.
2. Толщина зуба на поверхности вершин не меньше 0.25 диаметра ролика.
3. Предусмотреть возможность нарезки зубьев стандартным зуборезным инструментом.

Для величины коэффициента перекрытия 1,15 были проанализированы осевые линий теоретических циклоидальных профилей зубьев сателлита для различных участков центроид центральных колес. Результаты расчета показали, что наибольшее отклонение по нормали не превышает 0,02 мм. Поэтому практической осевой линией целесообразно принять линию, которая имеет наибольшую длину и направлена в тело теоретических зубьев. Для практического профиля зубьев удалось подобрать эвольвенту окружности, достаточно близко описывающую его. Следовательно, циклоидальный профиль может быть сформирован эвольвентным зуборезным инструментом. На основании полученных данных изготовлен опытный образец, который подтвердил, что применение промежуточных элементов в качестве зубьев не нарушает зацепление колес и позволяет уменьшить затраты на изготовление колес.

Автоматизация технологических процессов механообработки и производства

Важнейшей задачей научно-технического прогресса в машиностроении является автоматизация технологических процессов и производства. При этом для мелкосерийного механообрабатывающего производства актуальны методология создания и системное проектирование гибких производственных комплексов и их элементов.

Именно этой тематике посвящены научные исследования, выполнявшиеся на кафедре компьютеризации машиностроения в последние годы.

Впервые разработаны научно-методические основы проектирования и создания гибких производственных систем (ГПС) механообработки деталей точной механики, а также системотехнические аспекты реализации таких ГПС в условиях *действующего* производства, обеспечивающих резкое ускорение выпуска изделий новой техники за счет высокой интенсификации технологии производства [55].

На основании научных исследований и экспериментальной апробации были сформулированы технологические аспекты создания ГПС механообработки [56]. Исследованы, экспериментально отработаны, спроектированы и изготовлены различные технические системы, расширяющие технологические возможности станков с ЧПУ с доведением их до уровня гибких производственных модулей [57]. Разработаны системы управления гибким автоматизированным производством [58], дорабатываются и апробируются элементы САПР технологических процессов, формируются базы знаний и базы данных. Для создания адаптивных роботов были разработаны системы технического зрения [59].

Существенные научные и практические результаты получены в теории и практике проектирования многоцелевых робототехнических систем. Разработана методология системного подхода при проектировании гибких модулей механообрабатывающего производства, выработаны рекомендации по проектированию токарных гибких производственных модулей (ГПМ), дана количественная оценка критерия гибкости и его влияние на производительность ГПМ. Предложен комплексный подход к оценке специализированных загрузочных роботов для металлорежущих станков с ЧПУ. Разработана методика конструирования манипуляторов специализированных загрузочных роботов [57,65].

Впервые разработан робот для обработки литья, рука которого оснащена двумя исполнительными механизмами – схватом и инструментальным шпинделем. Причем его привод размещен в основании робота, обеспечивая передачу крутящего момента по кинематической цепи, проходящей внутри модулей робота [60, 61, 65]. Другой отличительной особенностью предложенного робота является обеспечение точностных параметров на весь период эксплуатации, что достигнуто применением в качестве силовых связей разомкнутых стальных лент, нечувствительных к загрязненной среде литейного производства, а также герметичных и необслуживаемых силовых редукторов на базе передач с промежуточными телами качения.

Впервые в отечественном машиностроении предложены принципы создания систем управления многоцелевых робототехнических систем, построенных «на основе знаний», позволяющих реализовать интеллектуальное управление комплексом в реальном масштабе времени, учитывающее изменение внешней среды, процесса обработки и внутреннее состояние комплекса. Для повышения быстродействия таких систем предложено формировать библиотеки подпрограмм, описывающих функции исполнительных механизмов комплекса, на основе которых системой обеспечивается автоматическое формирование управляющей программы работы комплекса при выполнении конкретной технологической операции [65].

Новые теоретические и практические результаты получены в направлении создания прецизионных и силовых механизмов на базе передач с промежуточными телами качения. Установлено, что для силовых, непрерывно работающих механизмов на базе передач с промежуточными телами качения расчет основных геометрических и кинематических параметров передачи следует выполнять не по критериям механической прочности, а по критической температуре в зоне зацепления. Это обусловлено тем, что малые масса и габариты передачи, большой угол зацепления, большая величина передаваемого крутящего момента и радиальных нагрузок приводят к интенсивному выделению тепла в зоне зацепления, что может привести к снижению твердости взаимодействующих элементов и, следовательно, к их интенсивному износу.

Разработана методология проектирования силовых механизмов на базе передач с промежуточными телами качения, показывающая зависимость компоновок передачи от условий эксплуатации, режима работы, его конструктивных особенностей.

Впервые предложена конструкция силовых механизмов на базе передач с промежуточными телами качения, имеющими суммарный КПД в пределах 0,95 – 0,98 в зависимости от количества

ступеней передачи, в которой передача крутящего момента осуществляется только обкатными движениями, практически без трения [62 – 65].

На базе разработанных теорий и методик создан ряд силовых механизмов: привод запорной арматуры для магистралей тепло-, водоснабжения и нефтегазового комплекса, электропривод регенеративного воздухоподогревателя для ТЭЦ РВП-15, привод перемещения плит радиальных уплотнений МРТ-1, гамма приводов промышленно-бытового назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Poletika M.F., Pushnykh V.A. «Contact Processes in Cutting with Cemented Carbide Tools», Key Engineering Materials «Advanced Ceramic Tools for Machining Application - 3». - Trans Tech Publications, Switzerland, 1998. - V.138-140. - P.357-393.
2. Полетика М.Ф., Подворчан А.И. // Наукоемкие технологии в машиностроении и приборостроении. - Рыбинск: РАТИ, 1994. - С.57-58.
3. Полетика М. Ф. // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. -Томск: ИПФ ТПУ, 1997. - С.6-13.
4. Полетика М.Ф., Козлов В.Н. // Повышение эффективности протягивания. - Рига: Политехн. институт, 1990. - С. 48-53.
5. Куфарев Г.Л. // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. -Томск: ИПФ ТПУ, 1997. - С.34-40.
6. Vesnovsky O.K., Poletika M.F., Topoleski T.L.D., Pushnykh V.A. «Ion Implantation of Cemented Carbide Cutting Tools», Key Engineering Materials «Advanced Ceramic Tools for Machining Application - 3». - Trans Tech Publications, Switzerland, 1998. - V.138-140. - P.327-355.
7. Брюхов В.В., Яновский В.П. // Тез. докл. 4 Всерос. конф. по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. - Томск, 1996. - С.290-292.
8. Полещенко К.Н., Полетика М.Ф., Геринг Г.И., Вершинин Г.А. // Физика и химия обработки материалов. - 1995. - № 3. - С.29-33.
9. Полетика М.Ф., Весновский О.К., Полещенко К.Н. // Совершенствование процессов резания и средств автоматизации для повышения производительности гибких станочных систем. -Курган, 1990. - С.33-36.
10. Pushnykh V.A. «Prediction of Tool Life for Cemented Carbide Cutting Tools», Key Engineering Materials «Advanced Ceramic Tools for Machining Application - 3». - Trans Tech Publications, Switzerland, 1998. - V.138-140. - P.395-416.
11. Кирсанов С.В. Пути повышения точности обработки отверстий мерными инструментами. - М.: ВНИИТЭМР, 1992. - 48 с.
12. Кирсанов С.В. // Вестник машиностроения. - 1993. - № 11. - С.36-37.
13. Кирсанов С.В. // Вестник машиностроения. - 1994. - №5. - С.8-11.
14. Кирсанов С.В., Черкасов А.И. // Вестник машиностроения. - 1995. - № 1. - С.14-15.
15. Гольдшмидт М.Г., Скворцов В.Ф. // Машиностроитель. - 1996. - № 3. - С.21.
16. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю. // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. - Томск: ИПФ ТПУ, 1997. - С.73-74.
17. Патент РФ № 2021097 / М.Г.Гольдшмидт, В.Ф.Скворцов, А.Г.Бригадин и др. - Опубл. в БИ. - 1994. - № 19.
18. Патент РФ № 207698 / В.Ф.Скворцов, М.Г.Гольдшмидт, А.В.Панов. - Опубл. в Б.И. - 1997. - № 10.
19. А.с. 1712681. Гидравлический генератор колебаний / П.Я.Крауиньш, С.А.Смайлов, С.Н.Атальянц и др. - Опубл. в БИ. - 1992. - № 6.
20. Крауиньш П.Я., Нижегородов А.И. // Вопросы динамики механических систем: Межвуз.сб.науч.тр. / Отв. ред. Г.С. Мигиренко. - Новосибирск: Новосиб. электротехн. ин-т, 1989. - С.98-102.
21. Крауиньш П.Я., Смайлов С.А., Атальянц С.Н., Абрамов А.П. // Матер. науч.-техн. конф. « Вибрация и диагностика машин и механизмов». - Челябинск, 1990. - С.5-6.
22. Крауиньш П.Я., Гаврилин А.Н., Смайлов С.А. // Развитие вибросейсмических исследований земной коры в Сибири. - Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1989. - С.139-146.
23. Крауиньш П.Я., Климов Б.С., Чичинин И.С. // Излучение и прием вибросейсмических сигналов. Вып. 1. Исследование Земли вибрационными источниками. - Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1990. - С.88-111.
24. Пат. 1787277 / П.Я.Крауиньш, С.А.Смайлов, А.Н.Гаврилин и др. - Опубл. в БИ. - 1993. - № 1.
25. А.с. 1681289 / П.Я.Крауиньш, С.А.Смайлов, А.П.Абрамов и др. - Опубл. в БИ. - 1991. - № 36.
26. Пат. 2071090 / П.Я.Крауиньш, С.А.Смайлов, А.Н.Гаврилин, А.В.Иоппа. - Опубл. в БИ. - 1996. - № 36 .
27. Киселев А.С. // Современные проблемы сварочной науки и техники. - Ростов-на-Дону, 1993. - С.115-116.
28. Киселев А.С. // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. - Томск: ИПФ ТПУ, 1997. - С.127-132.

20 Заказ № 19

29. Киселев А.С. // Современные проблемы сварочной науки и техники. - Воронеж, 1997. - С.34-35.
30. Дедюх Р.И., Азаров Н.А., Киселев А.С. // Сварочное производство. - 1989. - № 1. - С.20-21.
31. Пат. РФ 2086372, (CI) B 23 9/095 / А. С. Киселев, Р. И. Дедюх, Н. А. Азаров. - Опубл. в БИ. - 1997. - № 22.
32. Дедюх Р.И., Азаров Н.А., Мазель А.Г. // Автоматическая сварка. - 1988. - № 7. - С.24-27.
33. А.с. 1562082, СССР, МКИ B23K 9/04. / Р.И.Дедюх, Н.А.Азаров, Ю.В.Звирь и др. - Опубл. в БИ. - 1990. - № 22.
34. Хазанов И.О., Фомин Н.И. // Сварочное производство. - 1991. - № 6. - С.5-7.
35. Пат. РФ 2103131, CI, B23/K 9/00. / И.О.Хазанов, Б.Ф.Советченко, Н.А.Азаров, Е.А.Трущенко.
36. Трущенко Е.А., Азаров Н.А., Хазанов И.О. и др. // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. - Томск, 1997. - С.106-114.
37. Хазанов И.О., Азаров Н.А., Советченко Б.Ф. и др. // Сварочное производство. - 1996. - № 7. - С.11-13.
38. Panin V.E., Egoruskin V.E., Makarov P.V., et al. Physical Mesomechanics of Heterogeneoses Media and Computer-Aided Design of Materials. - Cambridge Interscience Publishing Hoursé, 1996. - 450 p.
39. Панин В. Е., Слосман А. И., Овечкин Б. Б. и др. // Порошковая металлургия. - 1993. - № 3. - С.21-26.
40. Слосман А. И., Апаров Н. Н., Матренин С. В. и др. // Огнеупоры. - 1994. - № 2. - С.4-7.
41. Слосман А. И., Матренин С. В. // Огнеупоры. - 1994. - № 10. - С.32-36.
42. Слосман А. И., Лемешев Н. Н. // МиТОМ. - 1990. - № 12. - С.15-17.
43. Крейндель Ю. Е., Слосман А.И., Лемешев Н.М. // Электронная обработка материалов. - 1990. - № 6. - С.46-51.
44. Slosman A. I., Han Wei. // Acta Scientiar. Nat. Univers. Jilinsis. - 1995. - № 9. - P. 14-18.
45. Панин В.Е., Слосман А.И., Колесова Н.А. // ФММ. - 1996. - Т 82. - Вып.2. - С. 129-136.
46. Панин В.Е., Слосман А.И., Колесова Н.А. // ФММ. - 1997. - Т 84. - Вып. 2.- С.130-135.
47. Панин В.Е., Слосман А.И., Колесова Н.А. и др. // Изв. вузов. Физика. - 1998. - № 6. - С.63-69.
48. Zenin B.S., Eroshenko A.U., Klimenov V.A. // Computer aided design of advanced materials and technologies. V International conference. - Tomsk, 1997. - P.191-192.
49. Дегтяренко Е.А., Хазанов И.О., Егоров Ю.П. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1990. - № 8. - С.51-55.
50. Егоров Ю. П. // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. - Томск, 1997. - С.106-114.
51. Нестеренко В.П. Автоматическая балансировка роторов приборов и машин со многими степенями свободы. - Томск: ТГУ, 1985. - 85 с.
52. Нестеренко В.П., Кладиев С.Н. // Автоматизация и современные технологии. - 1994. - № 1. - С.15 - 19.
53. Ищенко Т.Ю. // Известия вузов. Машиностроение. - 1997. - № 4-6. - С.24-28.
54. Положительное решение на выдачу патента РФ от 22.01.98. по заявке №7101427. Шестеренная гидромашина с промежуточными телами / Ан И-Кан.
55. Мартынов А.К. Гибкие производственные системы механообработки в единичном и мелкосерийном производстве деталей точной механики. - Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1986. - 308 с.
56. Мартынов А.К. // Аппаратные программные средства и технологическая подготовка ГПС. - М.: ЦНТИ «Поиск», 1989. - С.9.
57. Мартынов А.К., Панкратов Э.Н. Многоцелевой промышленный робот РМ-154. - М.: ВИМИ, 1990. - С.8.
58. Мартынов А.К. // Использование программируемых контроллеров в системах автоматизации производства и технологического оборудования. - М.: Радио и связь, 1990. - С.3.
59. Мартынов А.К., Титов В.С., Сырямкин В.И. и др. Системы технического зрения: Справочник. - Томск: МГП «РАСКО», Радио и связь, 1993. - 367 с.
60. Пат. № 1756142 / Э.Н.Панкратов. - Опубл. в БИ. -1992. - №31. - С.9.
61. Пат. № 1757869 / Э.Н.Панкратов. - Опубл. в БИ. -1992. - № 39. - С.9.
62. Панкратов Э.Н. // Космос - народному хозяйству. Ч.1. - М.: ЦНТИ «Поиск», 1994, С.2.
63. Пат. № 2029167 / Э.Н.Панкратов. - Опубл. в БИ. -1995. - №5. - С.5.
64. Пат. № 2029168 / Э.Н.Панкратов, А.Е.Брезгин. - Опубл. в БИ - 1995. - №5. - С.5.
65. Панкратов Э.Н. Проектирование механических систем автоматизированных комплексов для механообрабатывающего производства. - Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1998. - 295с.