

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ**

**80-летию БГПА,
85-летию академика Национальной академии наук Беларуси
ПЕТРА ИВАНОВИЧА ЯЩЕРИЦЫНА**
посвящается

МАШИНОСТРОЕНИЕ

**РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ
СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Основан в 1976 году

Выпуск 16

Минск
“Технопринт”
2000

621,7
М 38

УДК 621(082)

Машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. 16 под ред. И.П. Филонов. – Мн. УП «Технопринт», 2000 – 318 с. – ISBN 985-6373-67-0

Приведены результаты исследований прогрессивных технологических процессов изготовления деталей, в том числе с использованием современных программных средств и элементов машинного интеллекта. Рассмотрены некоторые вопросы проектирования технологического оборудования и оснастки. Изложены исследования иглофрезерования, зубообработки, вибрационного точения и обработки деталей с переменной глубиной резания. Приведены технологические условия подготовки поверхности и упрочнения деталей электрофизическими и электрохимическими методами. Рассмотрены проблемы динамики и прочности машин. Изложены актуальные вопросы экономики машиностроительного производства.

Редакционная коллегия:

И.П. Филонов (гл. редактор), А.П. Акулич, Г.Я. Беляев (зам. гл. редактора),
Э.М. Дечко, С.А. Иващенко, М.М. Кане, А.И. Кочергин, М.И. Михайлов,
Ж.А. Мрочек, Ф.И. Пантелеенко, М.Ф. Пашкевич, В.И. Похабов, А.Ф. Присевко,
Н.В. Спиридонов, В.И. Туромша, И.С. Фролов (отв. секретарь).

ISBN 985-6373-67-0

© УП «Технопринт», 2000

© Коллектив авторов, 2000

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.792

А. П. Ракомсин, М. И. Сидоренко, И. П. Филонов,
Л. А. Исаевич, В. А. Король, Л. М. Кожуро

1.1. СОЗДАНИЕ НОВЫХ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ, ОБОРУДОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ ИХ В ПРОИЗВОДСТВО КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ СЕМЕЙСТВА МАЗ

Государственное предприятие «МАЗ»

Белорусская государственная политехническая академия

*Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Беларусь*

Настоящая работа посвящена повышению конкурентной способности автомобилей семейства МАЗ технологическими методами. Предлагаемые новые наукоемкие технологии позволяют повысить долговечность деталей и узлов, улучшить комфортабельность автомобилей, снизить себестоимость их изготовления и привести их в соответствие с требованием международных стандартов. Если уровень конструкторских разработок может сравнительно быстро повышаться за счет модернизации имеющихся аналогов, то технологическая подготовка производства высокого уровня зависит от создания новых, эффективных технологических процессов, оборудования и оснастки на всех стадиях изготовления деталей и узлов.

Предлагаемое направление повышения конкурентоспособности автомобилей семейства МАЗ технологическими методами основано на решении трех взаимосвязанных проблем:

- совершенствование технологии и оборудования заготовительного производства;
- улучшение параметров качества рабочих поверхностей и восстановление деталей машин;
- компьютерное обеспечение поисков вариантов снижения энергопотребления, себестоимости и трудозатрат процессов изготовления деталей машин.

Такой подход к решению проблемы повышения конкурентоспособности машин соответствует новым признакам наукоемких технологий и обеспечивает существенное улучшение технических и экономических показателей процессов изготовления деталей и узлов машин. Наряду с этими технологическими решениями проведена работа по техническому и кадровому обеспечению. Изготовлено, апробировано и внедрено соответствующее оборудование, инструмент и технологическая оснастка.

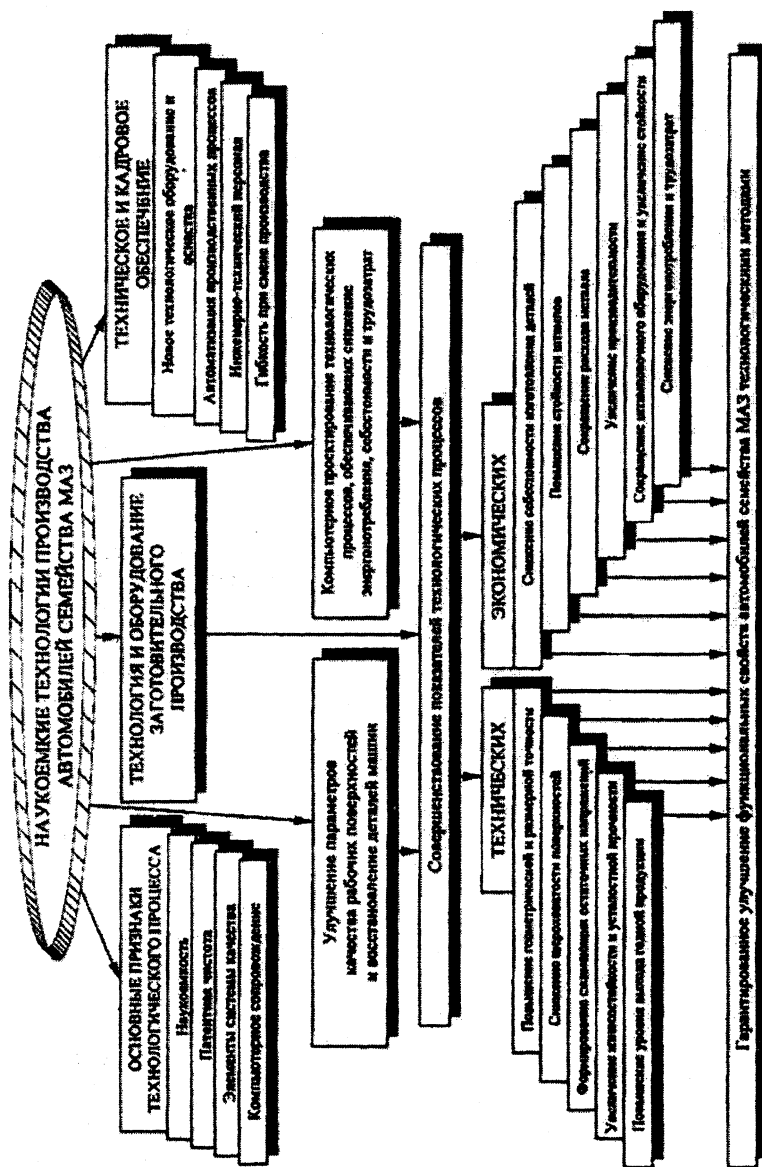


Рис. 1. Структура наукоемных технологий, обеспечивающих конкурентоспособность автомобилей семейства МАЗ.

Подготовлен инженерно-технический персонал. Научная новизна подкреплена кандидатскими диссертациями, выполненными сотрудниками МАЗа по данной тематике. Структура наукоемких технологий, обеспечивающих конкурентоспособность автомобилей семейства МАЗ, представлена на рис. 1.

Поскольку Минский автомобильный завод работает исключительно на импортном сырье и полуфабрикатах, то первостепенной задачей становится экономия материальных ресурсов, в частности металла. Это может быть осуществлено за счет сокращения потребления традиционных сортов проката черных и цветных металлов путем внедрения непосредственно на заводе деталипрокатного производства, позволяющего в условиях периодической прокатки максимально приблизить размеры и форму заготовки к размерам и форме готовой детали. Применение, например, периодических профилей позволяет сократить расход металла на 15... 40 % при одновременном увеличении производительности операций штамповки и обработки резанием в 1,5...2,0 раза. Практически все автомобильные заводы США, Англии, ФРГ, Франции, Японии, использующие рессорную подвеску, в промышленных масштабах производят и применяют периодические профили для изготовления малолистовых рессор. Масса обычной многолистовой рессорной подвески составляет до 6... 12 % общей массы автомобиля, а стоимость металла при изготовлении рессор может достигать 60 % окончательной их стоимости. При этом срок службы рессор в несколько раз меньше, чем у двигателя, определяющего срок службы автомобиля в целом.

Не менее эффективно использование периодических профилей при штамповке такой металлоемкой поковки, как балка передней оси автомобиля. Так, по данным ГАЗ, экономия металла здесь достигает 13,6 %. При этом существенно повышается стойкость молотовых штампов за счет меньшего количества ударов на формирующей операции.

В случае использования заготовок для процессов холодного выдавливания, а также безоблойной штамповки в закрытых штампах требуется высокая геометрическая точность. Традиционные высокопроизводительные процессы разделения прутковых материалов в штампах не позволяют получать заготовки требуемого качества, в связи с чем усложняется процесс последующего их пластического деформирования и увеличиваются потери металла в отход. Это приводит к необходимости разработки более эффективных способов получения цилиндрических заготовок.

Разработанные на кафедре «Машины и технология обработки металлов давлением» Белорусской государственной политехнической академии технологии и оборудование позволили решить ряд проблем в заготовительном производстве ПО «БелавтоМАЗ» (рис. 2). Так, предложенный способ периодической прокатки полос переменной толщины для малолистовых рессор выгодно отличается по производительности и экономичности от наиболее распространенного в мире способа фирмы «Даниэль Хойзер» (ФРГ), которым пользуются самые известные производители рессор, такие как «Krupp Faderfabrik» (ФРГ), «Ovako Stell» (Финляндия), «Мицубиси» (Япония), «Eaton Corporation» (США).

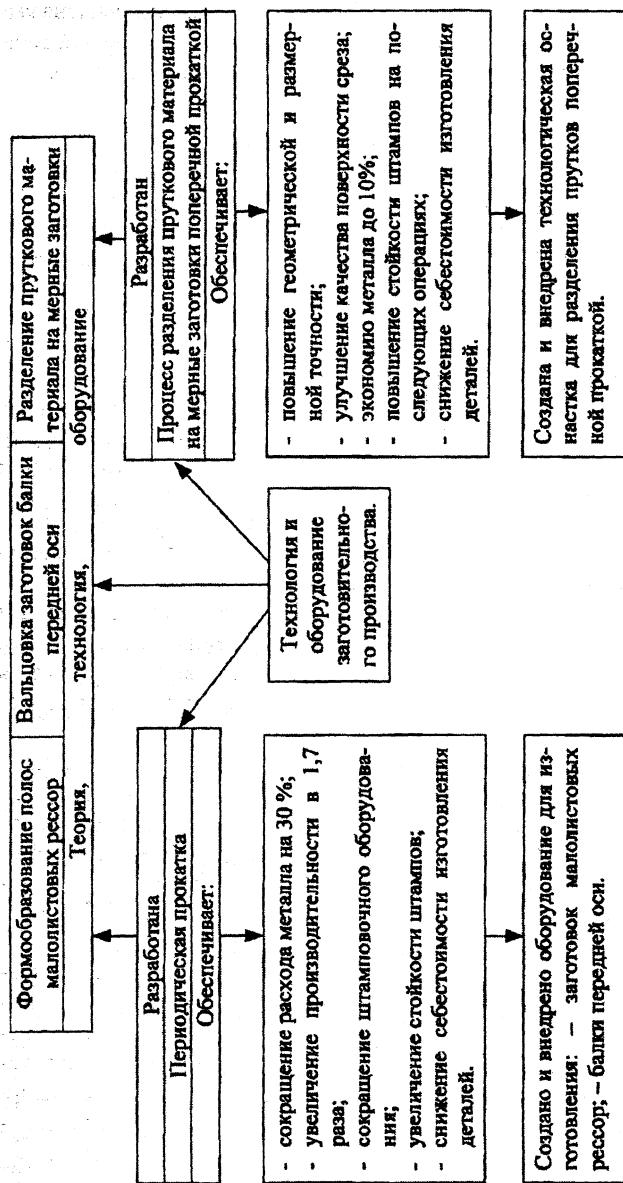


Рис. 2. Структурная схема разработанных технологий и оборудования в заготовительном производстве

Вместо обжата в приводных валках каждого конца заготовки поочередно за несколько проходов при двукратном ее нагреве по известному способу в предложенном варианте прокатки осуществляют на профилированной оправке в неприводных валках сразу всей заготовки с одного ее нагрева. Разработанные по этому способу технология и оборудование для ее реализации внедрены в 1992 году на Минском рессорном заводе с общим суммарным экономическим эффектом 55 492 677 тыс. руб. В 1994 году по данной разработке с фирмой «Eaton Corporation» (США, г. Детройт) подписано лицензионное соглашение о передаче прав на использование на ее предприятиях предложенного способа производства профилированных заготовок малолистовых рессор, что является первым случаем в отечественном автомобилестроении. В соответствии с данным соглашением названная фирма обязалась выплатить одноразовую подписную цену за передачу ей прав в размере 100 тыс. долларов США и после освоения ею новой технологии выплачивать ежегодно до 2008 года роялти в зависимости от объема выпускаемой продукции. За период с 1995 по 1999 год в Республику Беларусь переведено 324 945 долларов США.

Технология горячей вальцовки заготовки балки передней оси заключается в обжате серединной ее части на определенную длину секторными валками полуфабриката круглого сечения на квадрат с меньшим поперечным сечением. Это приближает заготовку к самой поковке, обеспечивает экономию металла до 22 % и уменьшает количество ударов молота в 1,5 раза, что во столько же раз повышает стойкость штамповой оснастки. Созданный для реализации данной технологии стан и сама технология внедрены в 1997 году на Кузнечном заводе тяжелых штамповок (г. Жодино). Суммарный экономический эффект от внедрения за три года составил 16 279 450 тыс. руб.

Для получения точных по размерам и форме заготовок из пруткового материала предложены принципиально новые способы, которые основаны на формировании поперечной прокаткой в прутке концентратора напряжений и последующем расклинивании прутка в зоне сформировавшегося концентратора клиновидными ребордами. Это позволяет получать заготовки с плоскими перпендикулярными торцами и обеспечивает экономию металла до 10%. Данная технология внедрена в 1997 году на Минском автозаводе с суммарным экономическим эффектом 10 700 248 тыс. руб.

Перечисленные выше направления решения проблем в заготовительном производстве в основном касаются снижения себестоимости выпускаемых автомобилей. Не менее важным является увеличение ресурса работы тяжело нагруженных деталей, что в целом повышает долговечность автомобиля. Достичь этого можно не только применяя высокопрочные и дорогие конструкционные материалы, но и за счет упрочняющей обработки традиционных, более дешевых марок сталей путем холодной поверхностной пластической деформации, электромагнитной наплавки порошковых материалов, совмещенной с поверхностным пластическим деформированием, объемной деформации. Такие технологии позволяют формировать в поверхностных слоях деталей прогнозируемый уровень остаточных сжимающих напряжений, положительно влияющих на усталостную прочность.

Разработанный на кафедре «Технология металлов» Белорусского государственного аграрного технического университета совместно с ГП «МАЗ» комбинированный метод электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием позволил увеличить в 1,3... 1,4 раза ресурс деталей типа тел вращения, работающих в условиях высоких нагрузок и интенсивного абразивного изнашивания. Такой результат получен за счет того, что новый метод упрочнения деталей сочетает нанесение, термообработку и упрочняющее деформирование покрытия, сокращая приработку поверхности за счет формирования структуры поверхностного слоя. Эксплуатационные характеристики комбинированного метода определяются электромагнитными и деформационными воздействиями на упрочняемую поверхность (рис. 3). Электромагнитная наплавка с ППД, к достоинствам которой следует отнести высокую прочность соединения наплавляемого покрытия с основой, повышенную износостойкость и минимальное тепловыделение, исключаящее термическое деформирование обрабатываемых деталей, эффективна при упрочнении поверхностей трения и посадочных поверхностей под подшипники и зубчатые колеса. Годовой экономический эффект от внедрения электромагнитной наплавки с ППД составил в 1999 г. 3500000 тыс.руб.

С учетом того, что валы, пальцы, оси лимитируют ресурс узлов автомобилей и составляют основную часть деталей, увеличение их износостойкости и усталостной прочности имеет большое значение для повышения их конкурентоспособности. Решению этих проблем посвящена работа ИТГ «МАЗ». Так, за последние три года внедрена гамма высокопроизводительного инструмента для обработки деталей поверхностной пластической и объемной деформацией. Особое место занимают комбинированные инструменты, позволяющие одновременно обрабатывать несколько поверхностей деталей и обеспечивающие повышение качества обработки, а также расширение технологических возможностей. На ряде деталей внедрен технологический процесс радиальной штамповки шлицев на валах, продольной накатки прямобоочных шлицев. Экономический эффект от внедрения технологии за 1997–1999 гг. составил 6679329,5 тыс.руб.

В условиях сложившейся экономической ситуации в Республике Беларусь представляется целесообразным поиск путей и методов совершенствования технологических процессов с точки зрения оптимизации их основных технико-экономических показателей (себестоимости, энергопотребления и трудоемкости). Разработанный кафедрой «Технология машиностроения» Белорусской государственной политехнической академии компьютерный метод проектирования технологических процессов позволяет автоматизировать процесс и обеспечить поиск оптимальных решений. В основу проектирования технологических процессов, изготовления деталей машин положен кибернетический подход. Темпы развития программного обеспечения и аппаратных средств в последние пятьдесят лет указывают на то, что такие технологии могут быть реализованы уже в ближайшем будущем.



Рис. 3. Структура метода электромагнитной наплавки с ППД.

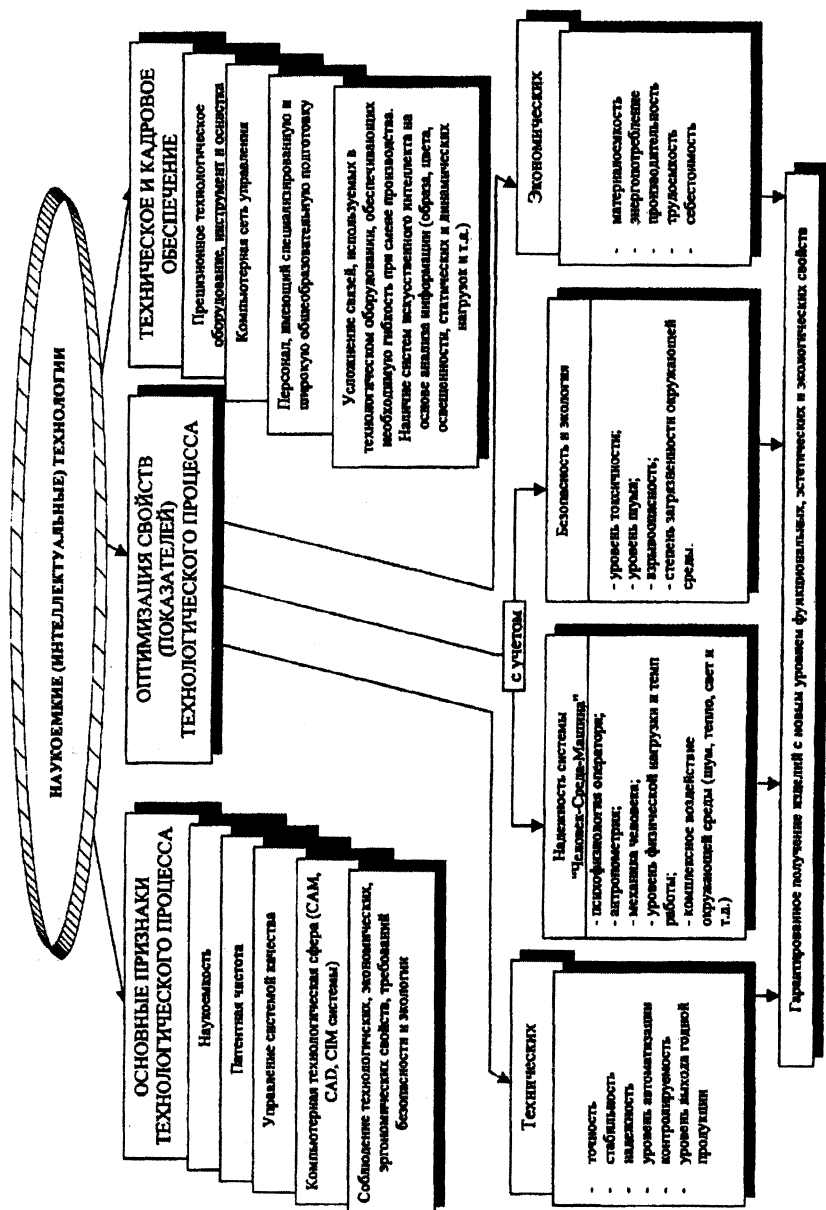


Рис. 4. Структура наукоемких технологий.

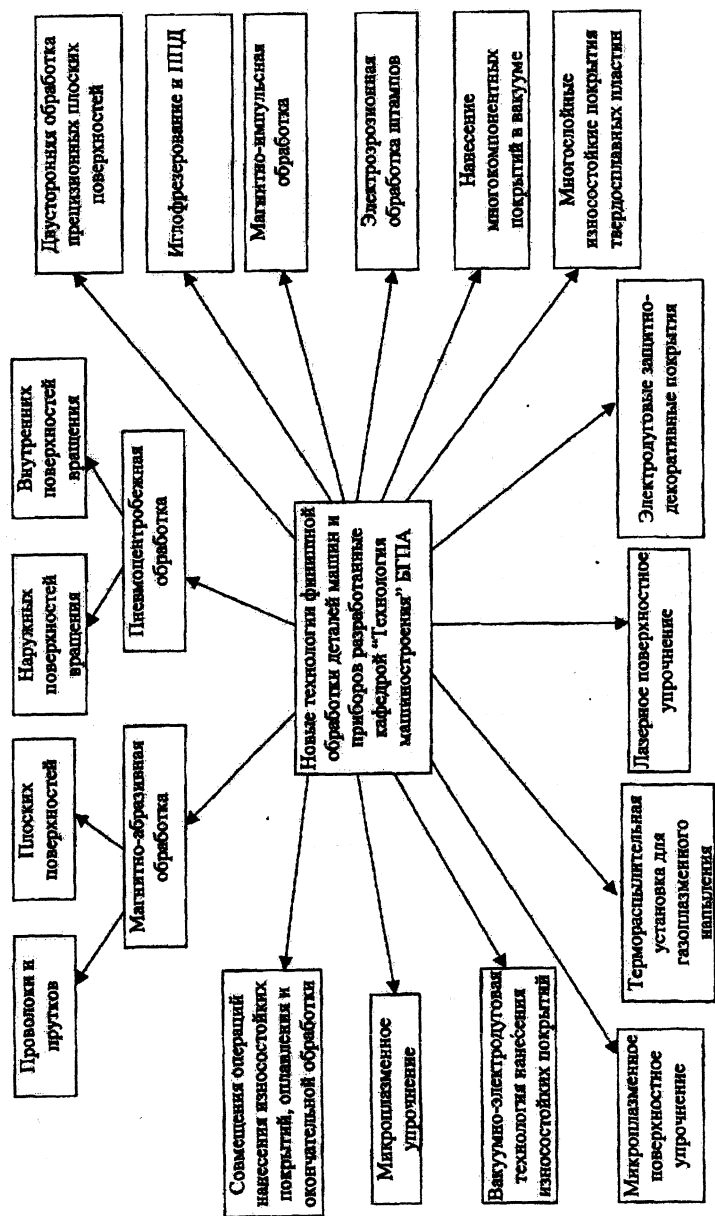


Рис. 5. Структура предлагаемых новых технологий.

Оптимизацию технологических процессов (ТП) следует проводить не только с учетом технических и экономических критериев, но и параметров системы «человек–среда–машина», а также проблем сохранения окружающей среды. Структура наукоемких (высоких, интеллектуальных) технологий представлена на рис. 4.

Алгоритм проектирования ТП предусматривает формирование требуемой информации в определенной последовательности с автоматическим поиском и выбором необходимых показателей, обеспечивающих установление требуемого уровня снижения энергопотребления, себестоимости, трудозатрат на основе новых физических явлений и способов, которых нет в справочной литературе. Подобные новые технические решения обычно являются результатом научно-исследовательской работы коллективов. На рис. 5 приведены результаты работы кафедры «Технология машиностроения» БГПА в области совершенствования финишных процессов обработки деталей машин за последние 10 лет.

Предлагаемая разработка позволила создать алгоритм и электронный вариант формирования наукоемких технологий, привязанный к условиям производства автомобилей семейства МАЗ (рис. 1). Программный продукт представлен на CD-ROM, 70 МБ дискового пространства с использованием интерактивной графики и интерфейса для трех уровней пользователей.

Так, третий уровень предназначен для инженера-программиста, которому предоставляется доступ к файлам. Он может их пополнять дополнительной информацией, имеющейся только в его распоряжении. Таким образом, инженер-программист совершенствует программный продукт и становится его соавтором. Это дает возможность непрерывного улучшения программного обеспечения путем пополнения (расширения) базы данных о новых физических явлениях, способах обработки и т.п., которые могут быть положены в основу наукоемких технологий в конкретной отрасли.

Таким образом, данной работой внесен значительный вклад в создание наукоемких технологий и оборудования, обеспечивающих повышение конкурентной способности автомобилей семейства МАЗ.

УПРАВЛЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Технико-сельскохозяйственная академия

Быдгощ, Польша

Нормальные распределения обычно в практике встречается редко, т.к. невозможно точно обеспечить равномерное влияние всех факторов на исследуемый параметр. Особенно можно это заметить в технологии машиностроения. Причины различные. Во-первых, потому что на практике несовершенны условия образования теоретической модели погрешности, а во-вторых, особенно в машиностроении, существуют такие организационные факторы, которые значительно деформируют эту модель, даже если она была бы технически реализуемой.

Здесь представлены результаты эксперимента, проведенного З. А. Домбэком на машиностроительном заводе (Wytwornia Sprzętu Komunikacyjnego) в г. Вроцлав в Польше, рассмотрены вопросы управления распределения вероятности и возможности исследования этого метода в технологии машиностроения.

Управляемым распределением является такое эмпирическое распределение, которое образуется в результате сознательной деятельности исполнителя, знающего желательный характер и форму распределения. Вообще говоря, речь идет о формировании и управлении видом функции плотности распределения путем влияния соответственной организационной системы в производстве, направленной на получение определенного результата.

При исполнении серийно какого-то геометрического размера в технологии машиностроения в большинстве случаев получается распределение вида, представленного на рис. 1.

По своей форме кривая напоминает нормальное распределение, но она асимметрична относительно моды на некоторую величину ε . Эта асимметрия имеет место всегда, а ее направление зависит от того, вал это или отверстие. Согласно принципу образования допуска вглубь материала, допуски валов и других наружных размеров направлены «в минус», а отверстия и внутренние размеры – «в плюс» от т.н. нулевой линии, которая соответствует номинальному размеру. В исполнительных размерах перемещение моды направлено к нулевой линии. Это значит, что оно противоположное для размеров вида «вал» и «отверстие».

Допустим, что исполнение какого-то размера ведет, по теоретическим условиям, к нормальному распределению с модой, медианой и математическим ожиданием в середине интервала допуска. В момент, когда в это абстрактное событие вмешивается человек с его субъективным подходом к исполняемой работе, — условия уже изменяются и также изменяется результат. У исполнителя нет никакого интереса, чтобы исполнять этот размер в середине интервала допуска. Боясь по причине непредусмотренных обстоятельств сделать неисправимый брак, все свои действия он направляет на избежание этого события. Эта естественная подстраховка исполнителя ведет сознательно к асимметрии распределения. Можно сказать, что здесь мы уже встречаемся с сознательной деятельностью, т.е. управляемым распределением.

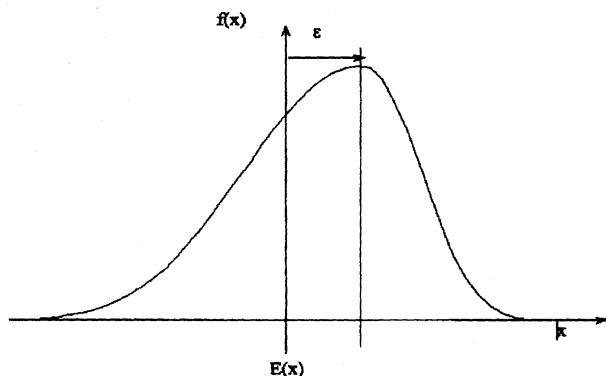


Рис.1. Типичное распределение вероятности наружного размера.

Может быть еще одна причина. Если уменьшение размера требует увеличения затрат времени, то у рабочего нет никакого интереса, чтобы добиваться этого, потому что за дополнительное время ему не платят. Такое управление распределением, отвечающее интересу рабочего, не всегда отвечает интересу предприятия.

Возможность получения симметричного распределения очень важна, например, во всех вопросах селективной сборки.

Селективная сборка, как известно, применяется везде там, где обычные, т.е. экономические, методы обработки не позволяют получить требуемую точность исполнения размера. Тогда экономический допуск делится на несколько субинтервалов (одинаковых для обеих деталей), называемых селективными группами. После обработки изготовленные детали классифицируют и обозначают их раз-

ными цветами или помещают в отдельных контейнерах. При сборке выбирают для соединения детали из соответствующих групп. Здесь управление по интересу рабочего ведет к отрицательным результатам. Тогда получаем, в соответствии с рис.2, два распределения с противоположной асимметрией. Вследствие этого возникает избыток деталей типа «отверстие» в группах I и II, а также избыток деталей типа «вал» в группах III и IV. На практике эти избытки достигают 60–70% числа собираемых деталей.

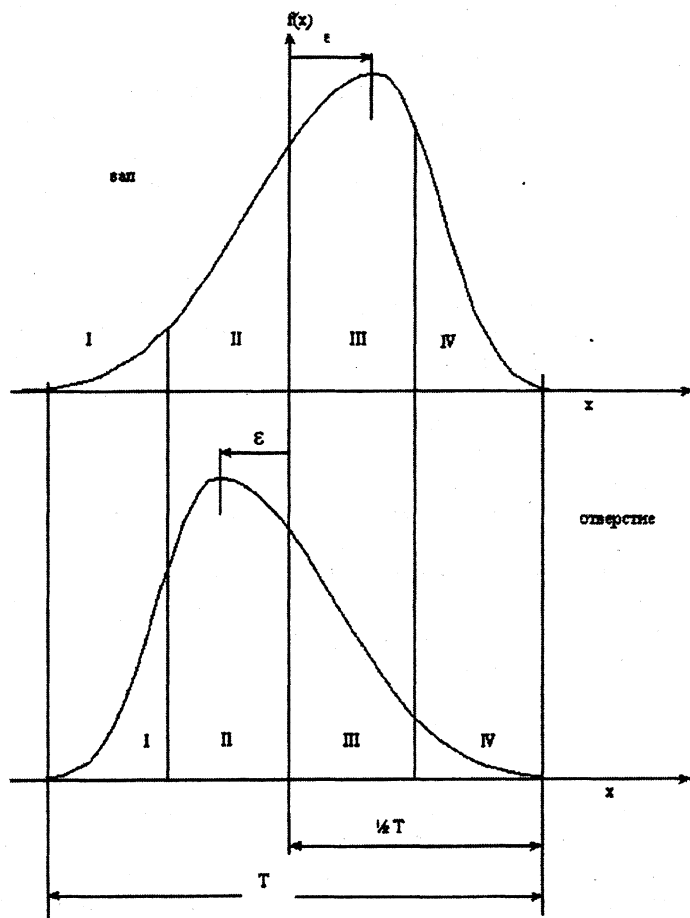


Рис.2. Асимметрия распределений при селективной сборке.

Такая асимметрия – это серьезная проблема для технологов и организаторов производства. По этой проблеме написано также много различных научных работ (напр., [3]) и статей. В большинстве случаев авторы принимают асимметрию неизбежной, а потом думают, что с этим сделать. По мнению авторов, основываясь на проведенных З. А. Домбэком работах, следует предположить, что проблема исчезнет, если не допустить асимметрии. При этом надо применить такую организационную систему на предприятии, которая будет эффективно управлять эмпирическими распределениями, чтобы довести к требуемым распределениям, отвечающим интересу предприятия.

Следует отметить, что с рабочим нужно сотрудничать так, чтобы у него и у предприятия был общий интерес. Как известно, в большинстве систем заработная плата зависит от значения допуска, но она не зависит от того, в какой зоне интервала допуска будет находиться существенное значение размера. Интерес рабочего состоит в том, чтобы не сделать неисправимого брака, во-первых, потому что за это потерянное время ему не платят, а во – вторых, потому что неисправимые браки – это производственные затраты, и его не премируют за качество.

Кажется, что единственным путем, который позволяет достичь успеха, является система материальных стимулов, которая может вызвать интерес обеих сторон, потому что все можно рассчитать и определить, кто и насколько будет этим заинтересован. В принципе, рабочий должен заработать больше при управлении распределением размеров обрабатываемых деталей. Чтобы вообще вызвать у него интерес новыми условиями, необходимо оплатить его дополнительные действия.

Здесь можно предложить решения, предложенные З.А. Домбэком на упомянутом заводе. Заработная плата стала включать два слагаемых:

- основную заработную плату, определенную по существующим правилам, (плата за исполнение детали согласно допуску),
- премию за распределение размеров в требуемых соотношениях.

Премия за распределение может, например, заключаться в том, что интервал допуска делится на несколько субинтервалов, соответственно селективным группам, и премируется отдельно каждая группа. Размер премии вычисляют по формуле:

$$P = \sum_{i=1}^n a_i J_i S_i, \quad (1)$$

где n – число селективных групп (число субинтервалов), a_i – премиальный коэффициент, J_i – число исполненных деталей в данной группе, S_i – тарифная ставка.

Премиальные коэффициенты должны быть определены отдельно для разных деталей и допусков, учитывая требования производства. В случае селективной сборки значения коэффициентов должны быть расположены симметрично относительно центрального значения и возрастать по направлению к центру, напр., как на рис. 3.

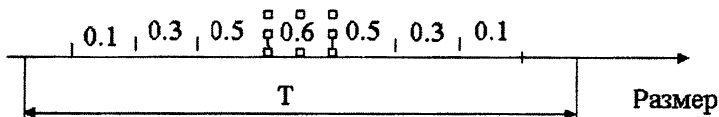


Рис.3. Премияльные симметрические коэффициенты.

Управление распределением можно применять не только в селективной сборке. Имея в виду факт, что неисправимый брак влечет затраты и нормальных (обычных) стимулов (нет платы) для рабочего не хватает, можно по интересу предприятия, премировать асимметрию такими например, коэффициентами (рис. 4), предупреждая таким образом вероятность появления неисправимого брака.

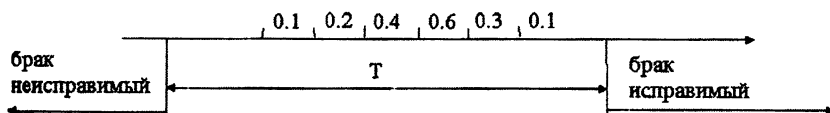


Рис.4. Премияльные асимметрические коэффициенты.

Можно применить другой вариант, состоящий в том, что премия за распределение не будет определена коэффициентами расположения, а только частными: $\frac{\epsilon_0}{\epsilon_i}$, где ϵ_0 будет определять в общем случае желаемую асимметрию (в селективной сборке может быть нулевая), а ϵ_i — исполненную в данной серии.

У этого метода есть недостаток: он не учитывает сосредоточения распределения вокруг значения моды, и поэтому в рамках той же асимметрии мы можем получить различные распределения.

В ходе исследования в области управляемых распределений был проведен такой эксперимент.

На упомянутом заводе изготавливали деталь, представленную на рис. 5, которая подвергалась затем селективной сборке, и во время монтажа имели место недостатки, упоминаемые ранее. Возникли серьезные проблемы, так как на складе рос запас лишних деталей, которые невозможно было собрать.

Размер $33^{+0.040}_{-0.002}$ обеспечивался на фрезерном станке и после обработки измерялся. Если очередные размеры после обработки показывали убывание или возрастающие значения размера, фрезеровщик поднимал или слегка опускал стол станка, кон-

тролируя это датчиком. Таким простым образом он стремился попасть в центр интервала допуска. Результаты этого эксперимента были весьма интересны. На рис. 6. показана гистограмма случайной выборки 150 шт. этих деталей, обработанных обычным способом перед экспериментом.

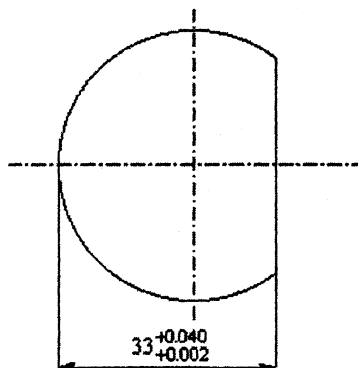


Рис.5. Обрабатываемая деталь.

Кол. шт.

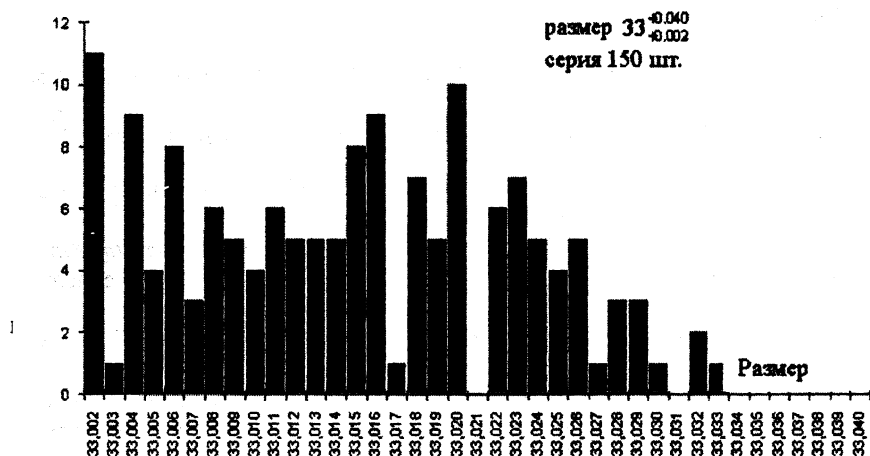


Рис.6. Гистограмма случайной выборки элементов, полученная в реальных условиях машиностроительного завода.

В результате проведенного эксперимента была получена гистограмма, изображенная на рис. 7.

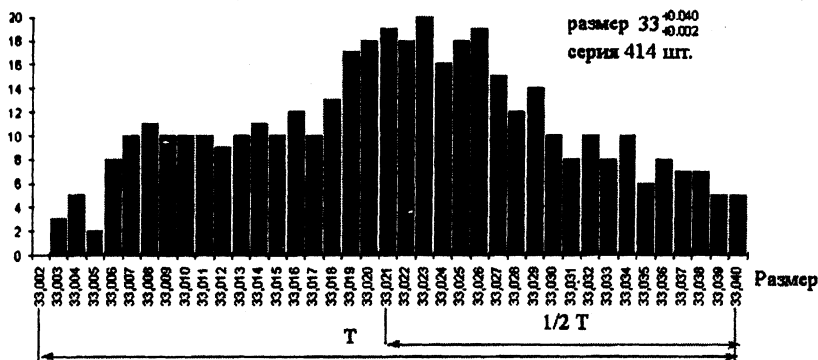


Рис. 7. Гистограмма случайной выборки элементов, полученная после эксперимента.

Сравнивая друг с другом эти гистограммы, следует заметить, что разница между ними большая. Размер чуть нетипичный, так как это наружный размер с положительными отклонениями, но это было обосновано специальными причинами. В итоге такого сравнения можно сказать, что гистограмма на рис. 6. изображает распределение, которое не подчиняется никаким правилам. Гистограмма, показанная на рис. 7, если не идеально симметричная, то можно надеяться, что нехватка изделий в отдельных группах одной серии будут заполнены в следующих сериях.

Выводы:

1. В технологических процессах, в которых исполняют размеры деталей машин, очень трудно сохранить такие условия, которые бы способствовали образованию нормального распределения вероятностей, как математической модели. Во-первых, невозможно говорить о бесконечном числе причин влияющих на значение размера, а во-вторых, невозможно создать такие условия, в которых влияние отдельных факторов на разброс размеров было бы одинаковым. Отсюда образование нормального распределения в машиностроительных процессах обработки даже теоретически труднодостижимо.

2. Самым важным фактором, деформирующим «натуральное» нормальное распределение, является подход рабочего к исполнению размера. Здесь нужно выделить его естественное страховочное действие перед возможным появлением неисправимого брака, а также стремление завершить обработку, если по-

лученный размер попадает в зону допуска. Это особенно касается обработки, в которой съем материала является функцией времени, потому что за это время ему не платят.

3. Чтобы получить распределение, близкое к нормальному, надо искусственным способом создать такие условия, чтобы вызвать интерес у рабочего к распределению, отвечающему интересу предприятия. Таким стимулом может явиться оплата труда. Разработана система зарплаты и премиальных добавок, которая позволяет управлять распределением, что подтверждают представленные выше результаты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Brandt S. Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych. — Warszawa PWN: 1974. С. 66. 2. Dąbek Z. Rozkłady kontrolowane.// Przegląd Organizacji. 1969. №10. С.407—413. 3. Катковник Б.Я., Савченко А.И. Основы теории селективной сборки. — Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1980.

УДК.621.941.01-529

И. А. Каштальян

ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБОТАННЫХ НА ТОКАРНЫХ ГПМ ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Основной тенденцией автоматизации современного машиностроительного производства является применение металлорежущих станков и станочных комплексов с числовым программным управлением, в том числе гибких производственных модулей (ГПМ). Относительная доля ГПМ в станочном парке предприятий машиностроения постоянно возрастает, и в этой связи все более актуальными становятся вопросы их эффективной эксплуатации.

Эффективность использования ГПМ на производстве в значительной степени зависит от функциональных возможностей устройства числового программного управления (УЧПУ). В современных микропроцессорных УЧПУ программное обеспечение строится по блочно-модульному принципу с максимальной независимостью модулей и делится на два вида: системное и технологическое. Основными элементами технологического программного обеспечения являются типовые цик-

ны, реализуемые в виде подпрограмм подготовительных функций. Наряду с унификацией подготовительных функций определенных видов технологических процессов не менее существенным является создание специализированных программ, ориентированных на узкую номенклатуру деталей или на совершенствование процесса обработки.

Анализ широкой номенклатуры деталей, обрабатываемых на токарных ГПМ, показал, что в технологическое программное обеспечение целесообразно включить модули, которые ориентированы на повышение производительности, точности и виброустойчивости процесса обработки за счет кинематической неустойчивости процесса резания [1]. В результате были разработаны программные модули, реализующие различные закономерности изменения подачи и скорости резания в функции пути (линейное изменение подачи, модулированное изменение подачи, прерывание подачи, поддержание постоянства скорости резания при фасонном точении) [2].

Указанные методы регулирования подачи и скорости резания условно можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, которые используются непосредственно для управления точностью обработки. Это прежде всего метод линейного изменения подачи в функции пути. Вторую группу составляют методы, которые используются для ломания стружки, гашения вибраций и т.д. (модулированное изменение подачи, прерывание подачи).

Вследствие кинематических особенностей этих методов максимальные значения возникающей при обработке силы резания переменны. Это ведет к возникновению переменных во времени деформаций, которые не всегда могут быть компенсированы наладкой или подналадкой технологической системы, что затрудняет управление точностью при обработке. Поэтому наряду с исследованием механизма повышения точности обработки путем стабилизации упругих перемещений (линейное изменение подачи в функции пути) необходимо провести исследование точности обработки при модулированном изменении подачи и ее прерывании. Это позволит оперативно управлять точностью обработки при кинематической неустойчивости режимов резания, а также выполнять прогнозную оценку ожидаемой точности.

Для выявления и анализа закономерностей распределения диаметральных и продольных размеров деталей, обработанных с переменной подачей (модулированное изменение подачи, прерывание подачи), и погрешности формы в поперечном сечении были использованы методы математической статистики.

С этой целью на токарном станке с ЧПУ мод. 1А751Ф3 с жесткостью суппортной группы 25000 Н/мм обрабатывались три партии заготовок из стали 40 ХН диаметром 70 мм и длиной 50 мм при частоте вращения шпинделя $n = 500$ об/мин и глубине резания $t = 1$ мм. Обработка велась резцом с механическим креплением пластины твердого сплава Т15 К6. Геометрические параметры режущей части: $\gamma = 8^\circ$; $\alpha = 12^\circ$; $\varphi = 95^\circ$; $\varphi_1 = 5^\circ$; $\rho = 0,8$ мм.

Одна партия заготовок обрабатывалась с модулированной подачей, которая изменялась в пределах от 0,2 до 0,4 мм/об. Длина обработки L между пиковыми значениями подачи была равна 0,8 мм. Другая партия обрабатывалась с прерыванием подачи, которое осуществлялось на время одного оборота детали. Третья партия деталей обрабатывалась с постоянной подачей. Во всех трех случаях среднее значение подачи было равно 0,3 мм/об.

Для определения вероятностных законов распределения погрешностей размеров и формы, а также основных статистических характеристик (среднего арифметического $\bar{X}$ и среднего квадратического отклонения s) из каждой партии обработанных деталей была взята выборка большего объема $n = 102$. Измерение диаметральных размеров осуществлялось микрометром МР 0220 (цена деления 2 мкм). Сечения детали, в которых делались замеры, предварительно были размечены. Для измерения продольных размеров был использован индикатор 1МИГ (цена деления 1 мкм). Погрешность формы в поперечном сечении определялась как разность между максимальным и минимальным диаметральными размерами.

Основные статистические характеристики распределений размеров и формы (среднее арифметическое $\bar{X}$ и среднее квадратическое отклонение S) вычислялись методом моментов [3]. Распределения подсчитывались при интервале $h = 5$ единиц; единица измерения была равна 0,001 мм. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Статистические характеристики погрешностей размеров и формы
деталей, обработанных на токарных ГПМ

Контролируемый параметр	Метод обработки	$\bar{X}$, мм	S , мм
Диаметральный размер	Обработка с модулированной подачей	0,0173	0,0086
	Обработка с прерыванием подачи	0,0212	0,0095
	Обработка с постоянной подачей	0,0120	0,0063
Продольный размер	Обработка с модулированной подачей	0,0129	0,0064
	Обработка с прерыванием подачи	0,0124	0,0066
	Обработка с постоянной подачей	0,0123	0,0062
Форма в поперечном сечении	Обработка с модулированной подачей	0,0024	0,0008
	Обработка с прерыванием подачи	0,0025	0,0009
	Обработка с постоянной подачей	0,0024	0,0008

Эмпирические распределения отклонений размеров и формы сравнивались с распределением по закону Гаусса. Удовлетворительность соответствия проверялась по критериям согласия χ^2 и ω^2 . Во всех случаях гипотеза о том, что выборка принадлежит нормально распределенной генеральной совокупности, не отвергалась. Некоторые практические и теоретические кривые распределения погрешностей размеров представлены на рис. 1 и рис. 2.

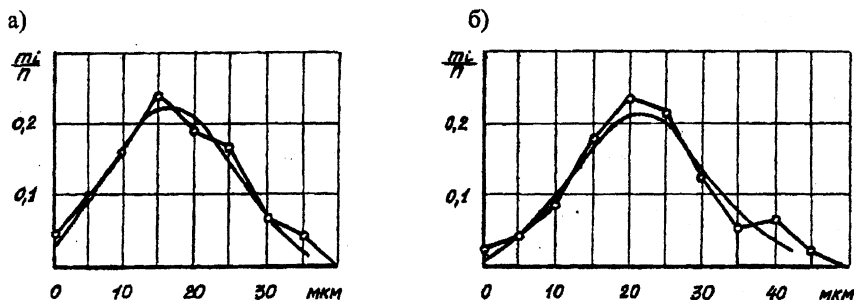


Рис. 1 Практические и теоретические кривые распределения отклонений диаметральных размеров: а – модулированное изменение подачи; б – прерывание подачи.

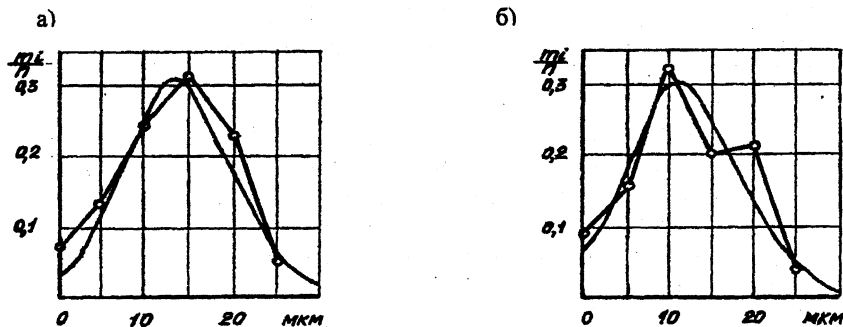


Рис. 2. Практические и теоретические кривые распределения отклонений продольных размеров: а – модулированное изменение подачи; б – прерывание подачи.

По методике расчетов, предложенной А.П. Соколовским, рассеяние погрешностей обработки деталей определяется как сумма рассеяния погрешностей размеров Δ_p и погрешностей формы Δ_f (методика допустима, когда погрешность формы по длине обработки не изменяется):

$$\Delta = \Delta_p + \Delta_\phi.$$

Влиянием погрешности формы Δ_ϕ можно пренебречь, если величина среднего квадратического отклонения этих погрешностей составляет не более 30% от величины среднего квадратического отклонения погрешностей размеров σ_p [4]. При обработке с модулированной подачей и при обработке с прерыванием подачи величина σ_ϕ не превышает 10% от σ_p . Поэтому фактическое поле рассеяния погрешностей обработки $\Delta = 6 \sigma$.

Для учета погрешности определения среднего квадратического отклонения s , зависящей от величины партии измеряемых деталей n , при подсчёте целесообразно использовать зависимость

$$\sigma = pS,$$

где p – коэффициент, учитывающий погрешность определения среднего квадратического при размере партии измеренных заготовок n .

Для $n = 102$ коэффициент $P = 1,2$ [3]. Тогда при обработке с модулированной подачей $\sigma = 0,01032$ мм, соответственно $\Delta = 6 \sigma = 0,062$ мм. При обработке с прерыванием подачи $\sigma = 0,0114$ мм; $\Delta = 6 \sigma = 6-0,068$ мм.

Оба торца детали, между которыми фиксировался продольный размер, обрабатывались с одной установки тем же подрезно-проходным резцом, что и цилиндрическая поверхность. Это позволило практически полностью исключить погрешность обработки, вызванную размерным износом инструмента.

С учетом погрешности определения среднего квадратического при размере партии измеренных заготовок $n = 102$ рассеяние погрешностей продольных размеров будет равно: при модулированном изменении подачи $\Delta = 0,046$ мм; при прерывании подачи $\Delta = 0,047$ мм.

При исследовании влияния параметров переменной подачи на погрешности формы обработанных деталей был использован метод малых выборок. Использование малых выборок наиболее эффективно, когда изучаемый параметр подчиняется нормальному или близкому к этому закону распределения [5].

Графики строились по средним значениям десяти замеров. Интервальная оценка среднего значения, а также сравнение дисперсий и средних проводились согласно [3].

Определялось влияние параметров модулированной подачи на точность формы обработанных деталей в поперечном и продольном сечениях. С этой целью при различных пиковых значениях подачи и на различных участках между пиковыми значениями подачи обрабатывалась партия деталей из стали 40Х диаметром 210 мм и длиной 200 мм при глубине резания $t=1$ мм и скорости резания $V=110$ м/мин. Деталь крепилась в патроне, свободный конец поджимался вращающимся центром. При контроле измерялась некрутость детали в фиксированном сечении и отклонение профиля продольного сечения (конусообразность). Для измерения не-

круглости был использован прибор «Tolurond». Конусообразность измерялась с помощью микрометра МР 0220 (цена деления 2 мкм). Полученные значения некруглости и конусообразности сравнивались со значениями некруглости и конусообразности деталей, обработанных с постоянной подачей, равной среднему значению модулированной подачи. В результате установлено, что параметры модулированной подачи на некруглость и конусообразность существенного влияния не оказывают. Некруглость колеблется в пределах от 0,001 до 0,005 мм, причем без проявления какой-либо закономерности (рис. 3, а). Характер изменения конусообразности при изменении параметров модулированной подачи показан на рис. 3, б. Здесь также наблюдается отсутствие четко выраженной закономерности. На длине 180 мм максимальная величина конусообразности при обработке с модулированной подачей ($S_{min} = 0,2$ мм/об; $S_{max} = 0,4$ мм/об; $L = 0,8$ мм) составила 0,016 мм, что находится в пределах паспортной геометрической точности станка.

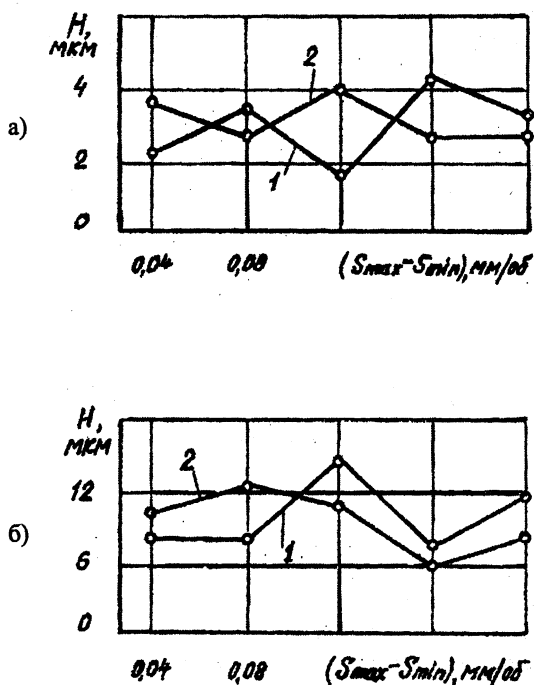


Рис. 3. Влияние параметров модулированной подачи на некруглость (а) и конусообразность (б): 1 - $L = 0,8$ мм; 2 - $L = 0,4$ мм.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) на токарных станках с ЧПУ, имеющих сравнительно высокую жесткость суппортной группы (не менее 25000 Н/мм), достижимая точность диаметральных размеров соответствует 8-му качеству при обработке с модулированной подачей и 9-му качеству при обработке с прерыванием подачи; 2) точность продольных размеров практически не зависит от закономерности изменения подачи и может быть обеспечена по 8-му качеству; 3) погрешности формы деталей, обработанных с модулированной подачей, практически соответствуют погрешностям формы деталей, обработанных с постоянной подачей, равной среднему значению модулированной подачи.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Каштальян И.А., Кочергин А.И., Зайцев В.Б. Поддержание заданного закона изменения подачи на токарных станках с ЧПУ. //Машиностроение. – Мн., 1979. – Вып. 2. С. 83 – 90. 2. Kashtalyan I.A. Improvement of Manufacturing Software for Microprocessor Program Controllers // Micro and Precision Mechanics: Proceeding of the 41TH International Colloquium . – Ilmenau, 1996. V. 1. P. 441 – 444. 3. Большов Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, // 1963. – 464 с. 4. Кораблев П.А. Точность обработки на металлорежущих станках в приборостроении. – М.: Машиностроение, 1962. – 228 с. 5. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, // 1974. – 239 с.

УДК 621.91.002

С. В. Маруга , А. С. Козерук , И. П. Филонов , Ф. Ф. Климович

ТЕХНОЛОГИЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В настоящее время в машино- и приборостроении при изготовлении деталей с высокоточными цилиндрическими поверхностями применяют способы притирки, особенностью которых является зависимость точности и качества обработки от свойств и твердости материала заготовки, зернистости применяемого абразива, а также от кинематических, геометрических, силовых факторов процесса и, что самое важное, от их сочетания. При этом выбор режимов осуществляет рабочий, основываясь на своем опыте и интуиции, что значительно увеличивает трудоемкость [1].

С целью формализации действий рабочего, механизации процесса и создания методики управления доводочными операциями при получении указанного класса изделий из различных материалов нами предложен метод свободной притирки, основанный на силовом замыкании пары «инструмент – заготовка», их самоустановке и сложной траектории относительного перемещения [2]. При этом заготовку вращают вокруг оси, а шлифовальнику в виде сегмента кольцевого цилиндра сообщают продольные осциллирующие движения с различными скоростями и амплитудами, в результате чего существенно усложняется траектория его движения и возрастает путь трения относительно детали, что повышает качество и производительность обработки.

Для практической реализации данного способа создано устройство (рис.1), устанавливаемое на серийно выпускаемых шлифовально-полировально-доводочных рычажных станках моделей ШП и ПД. Устройство работает следующим образом.

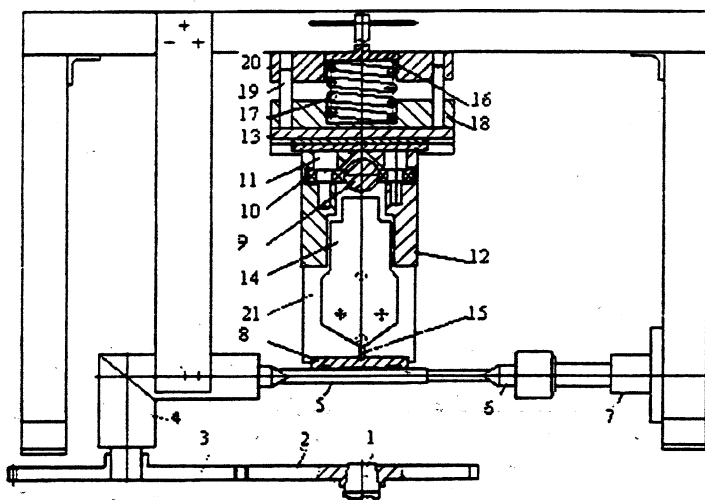


Рис. 1. Схема устройства для притирки цилиндрических поверхностей.

От шпинделя станка 1 через зубчатые колеса 2, 3 и конический редуктор 4 вращение передается заготовке 5, которая поджимается задним центром 6 при помощи механического устройства 7. Возвратно-поступательное перемещение инструмента 8 сообщается от штанги станка 9, совершающей возвратно-качательное движение, через подшипники 10, ось 11, корпус 12, перемещающийся по направляющей 13, источник вибраций 14 и поводок 15, входящий в контакт с пазами на поверхно-

сти инструмента и передающий, к тому же, продольные вибрации от электромагнитного источника. Усилие прижима инструмента к детали создается винтом 16 и пружиной 17. Далее через плиту 18, перемещающуюся по направляющим 19 призмы 20, усилие передается на корпус 12. Прижим осуществляется пластинами 21, имеющими возможность регулировки по высоте в зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки.

Нами разработана математическая модель закономерностей обработки, положенная в основу методики управления съемом материала по поверхности детали в зависимости от наладочных параметров технологического оборудования.

Предлагаемая методика основана на гипотезе Престона [3] о пропорциональности величины снимаемого припуска пути трения L_{mp} , проходимого произвольно выбранной точкой M на поверхности заготовки за цикл обработки T , причем

$$L_{mp} = \int_0^T V dt,$$

где V — абсолютная линейная скорость скольжения детали относительно инструмента.

Для получения точек M поверхность детали разбивают на n колец и m полос.

При этом образуются элементарные площадки S_{ij} , $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$, в центре которых определяют точки M_{ij} с координатами, рассчитываемыми из выражений

$$x_{i,j}^{\partial} = L_{\partial} \frac{2i - n - 1}{2n}; \quad y_{i,j}^{\partial} = -r_{\partial} \sin\left(\frac{2\pi}{m}\left(j - \frac{1}{2}\right)\right); \quad z_{i,j}^{\partial} = r_{\partial} \cos\left(\frac{2\pi}{m}\left(j - \frac{1}{2}\right)\right),$$

где L_{∂} — длина детали.

Согласно определению, вектор скорости $\vec{V}$ в точке M_{ij} можно записать в виде равенства

$$\vec{V} = \vec{V}_{\partial} - \vec{V}_u,$$

где $\vec{V}_u$, $\vec{V}_{\partial}$ — векторы линейных скоростей притира и детали, определяемые из соотношений

$$\vec{V}_{\partial} = \vec{\omega}_{\partial} \times \vec{R};$$

$$\vec{V}_u = (V_u^n + V_u^s) \vec{i},$$

где $\vec{R}$ — радиус-вектор рассматриваемой точки M_{ij} ; $\vec{\omega}_{\partial}$ — угловая скорость вращения заготовки; V_u^n , V_u^s — линейные скорости соответственно возвратно-поступательного и вибрационного движений инструмента.

Раскрыв соответствующие векторные произведения, получим выражение для расчета абсолютного значения скорости скольжения в виде

$$V = \sqrt{(V_u^n + V_u^s)^2 + (w_b R_z^s)^2 + (w_b R_z^s)^2}.$$

При этом скорость возвратно-поступательного движения притира V_u^n определяется из выражения

$$V_u^n = \frac{a}{\cos^2 \Psi} \dot{\Psi},$$

где a — амплитуда возвратно-поступательного движения инструмента; $\Psi = \Psi(t)$ — закон движения выходного звена исполнительного механизма станка, подробно описанный в литературе [4].

Поскольку в процессе обработки перемещение инструмента под действием вибраций в произвольный момент времени t подчиняется синусоидальному закону, то можно записать, что

$$e = e_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T_B} t\right) = e_{\max} \sin(w_B t),$$

где $e_{\max}, w_B, T_B$ — соответственно амплитуда, частота и период вибраций, сообщаемых шлифовальнику.

Тогда скорость вибрационного движения инструмента определяется из соотношения

$$V_u^s = \dot{e} = w_b e_{\max} \cos\left(\frac{2\pi}{T_B} t\right).$$

Из анализа закономерностей обработки цилиндрических поверхностей по предлагаемому методу следует, что притир находится в контакте с деталью, если выполняются неравенства

$$x_{\min}^u \leq R_x \leq x_{\min}^u \text{ или } x_{\max}^u \leq R_x \leq x_{\max}^u \\ |R_y| \leq y_{\max}^u \text{ и } |R_z| \geq 0,$$

где $x_{\min}^u, x_{\max}^u, x_{\min}^u, x_{\max}^u, x_{\min}^u, x_{\max}^u$ — координаты крайних точек инструмента, определяемые по формулам

$$x_{\min}^u = -\frac{L_u}{2} + S; \quad x_{\max}^u = \frac{L_u}{2} + S; \\ x_{\min}^u = -\frac{L_u}{2} + S; \quad x_{\max}^u = \frac{L_u}{2} + S; \quad y_{\max}^u = \frac{d_u}{2}.$$

В последних выражениях L_u, d_u – соответственно длина и ширина инструмента; $S = a \operatorname{tg} \Psi + e$ – смещение центра притира относительно центра детали; L_m – ширина центральной канавки на рабочей поверхности шлифовальника.

Используя приведенные выражения, с помощью ЭВМ были выполнены численные исследования закономерностей распределения путей трения вдоль образующей цилиндрической поверхности детали в различных ее сечениях в зависимости от наладочных параметров технологического оборудования.

В результате расчетов установлено, что при обработке сплошным притиром получается погрешность в виде седлообразности, для устранения которой на его рабочей части были предусмотрены продольные и диаметральные канавки, снизившие непрямолинейность образующей цилиндра. Помимо указанной, продольная канавка выполняет еще одну не менее важную функцию – служит для выравнивания эпюры давления в зоне обработки и обеспечивает полный контакт заготовки и шлифовальника по мере изнашивания последнего. Установлены также области оптимальных значений ширины и длины инструмента, числа и размеров канавок на его рабочей части, частоты вращения детали, а также амплитуды и числа двойных ходов выходного звена исполнительного механизма станка.

Проведенные экспериментальные исследования выявили достаточно высокую степень соответствия характера съема припуска с закономерностями распределения путей трения вдоль образующей обработанной цилиндрической поверхности, что указывает на адекватность разработанной математической модели реальным условиям процесса притирки.

На основании данных, полученных в ходе численных и экспериментальных исследований, разработаны рекомендации для определения режимов формообразования цилиндрических деталей с учетом исходной погрешности, благодаря чему можно с достаточной точностью прогнозировать отклонение формы обрабатываемой поверхности от заданной. В результате представляется возможным формализовать действия рабочего, в значительной мере механизировать процесс притирки и, в итоге, снизить трудоемкость изготовления указанных изделий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Орлов П.Н. и др. Доводка прецизионных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 256 с.
2. Козерук А.С., Маруга С.В., Филонов И.П., Климович Ф.Ф. Способ обработки прецизионных цилиндрических поверхностей. Заявка 970671. Решение ГПК РБ от 26.02.98: МКИ В 24 В 1/00 3. Preston F.W. The Theory and Design Plate Glase Polishing Machines // Journal of the Society Technology. – 1927. – № 1 – Р. 214 – 256
4. Филонов И.П., Климович Ф.Ф., Козерук А.С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов. – Мн.: ДизайнПРО, 1995. – 208 с.

ПОКАЗАТЕЛЬ СУЩНОСТНОЙ СЛОЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, КАК КРИТЕРИЙ ВЫБОРА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

*Полоцкий государственный университет, Новополоцк
Гомельский государственный технический университет, Гомель
Беларусь*

В условиях необходимости повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции выбор изделия для освоения его производства является важной и достаточно сложной задачей. Изделие, предлагаемое к выпуску, должно быть востребованным на рынке, но главной его особенностью, на наш взгляд, должна быть его сущностная близость к ранее выпускавшемуся данным предприятием изделию. Выполнение последнего требования обеспечивает быструю подготовку производства и выпуск изделий без существенных изменений в структуре, техническом потенциале и кадровом составе предприятия, что важно в современных условиях развития экономики Беларуси. Однако на сегодня отсутствует методика объективной оценки возможностей предприятий по освоению производства новых изделий.

В связи с этим и с целью оказания помощи специалистам предприятий Беларуси в выборе изделий разработана классификация изделий машиностроения, подразделяющая их по сложности, родственным характеристикам и служебному назначению (табл.1). Выделение в качестве основного признака классификации сущностной сложности изделий требует трактовки этой сложности и определения показателя сложности. Необходимо отметить, что в последнее время к понятию сложности обращаются многие исследователи, используя его, например, для нормирования работ при механической обработке [1], оценки эффективности производственной системы [2]. В этих работах сложность рассматривается как показатель трудоемкости и включает определение ряда характеристик, таких как число обрабатываемых поверхностей деталей, коэффициентов материала, размеры детали и заготовки, точность и время обработки и т.д. При таком подходе определение сложности является трудоемким процессом и требует применения методов математической статистики, что не всегда приемлемо для условий производства.

Поэтому предлагается определять показатель сущностной сложности по следующей формуле:

$$Q = G_{cc} \cdot K_{\kappa} \cdot K_{\mu} \cdot K_{\lambda} \cdot K_{\sigma} \cdot K_{\tau} \cdot K_{\eta}, \quad (1)$$

где $G_{\text{с}}$ – группа структурной сложности изделия; $K_{\text{х}}$ – коэффициент концептуальной сложности; $K_{\text{н}}$ – коэффициент новизны решений; $K_{\text{м}}$ – коэффициент изменения массы изделий; $K_{\text{в}}$ – коэффициент изменения габаритной высоты изделия; $K_{\text{э}}$ – коэффициент изменения эксплуатационных характеристик изделия; $K_{\text{т}}$ – коэффициент изменения условий испытательной технологии.

Для определения показателя Q вводятся следующие понятия и величины: новое изделие – изделие, принимаемое к производству; базовое изделие – изделие ранее выпускавшееся предприятием серийно; простейшее изделие – изделие рассматриваемого вида, имеющее такое минимальное количество структурных составляющих, что дальнейшее его уменьшение может вызвать затруднение при отнесении этого изделия к данному виду; условная деталь – деталь, имеющая наиболее массовое использование в большинстве машиностроительных изделий; приведенная деталь – деталь, структурная сложность которой выражается числом содержащихся в ней условных деталей; эквивалент структуры детали $Z_{\text{д}}$ (изделия $Z_{\text{и}}$ или его составной части $Z_{\text{ч}}$) – число условных деталей в структуре приведенной детали.

В качестве условной детали целесообразно использовать вал средней (среднестатистической) сложности, поскольку именно валы имеют наибольший процент применения в современных машинах, и токарные станки составляют большую часть производственного парка металлорежущих станков. В свою очередь среднестатистический вал выбирается из наиболее распространенной конфигурации в виде последовательной структуры вала (рис. 1, а), в которой при переходе от габаритного участка вала, имеющего наибольший диаметр, к концам вала радиальные габариты участков (диаметры их габаритных контуров) последовательно уменьшаются (до 65% валов имеют такую конфигурацию). Валы с непоследовательной структурой (рис. 1, б) встречаются реже (до 15% валов) и могут не приниматься во внимание. Другие варианты валов – от простых типа штифтов, пальцев, осей до сложных, например, ходовых валов, орудийных стволов, шпинделей станков учитываются как приведенные детали.

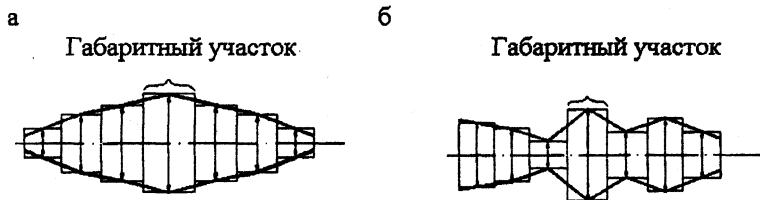


Рис. 1 Схемы последовательной (а) и непоследовательной (б) структуры вала

Таблица 1

Классификация и коды машиностроительных изделий

№ гр.	Наименование групп, номера и наименования видов изделий	Коды	№ гр.	Наименование групп, номера и наименования видов изделий	Коды
1	Группа стратегических изделий:	СР		5.5. Швейно-обувные	ШО
	1.1. Военно-орудийные	ВО		5.6. Оптико-визуальные	ОВ
	1.2. Авиационные	АВ		5.7. Прядильно-вязально-ткацкие	ПТ
	1.3. Космические	КС		5.8. Банковские	БА
	1.4. Ракетно-технические	РТ			
2	Группа станкомашинных изделий:	СМ	6	Группа сырьевых изделий:	СЫ
	2.1. Станкоинструментальные	СИ		6.1. Нефтегазовые	НГ
	2.2. Кузнечно-прессовые	КП		6.2. Горнорудные	ГР
	2.3. Лесодеревообрабатывающие	ЛД		6.3. Трубопроводно-транспортные	ТТ
	2.4. Дробильно-помольные	ДП			
	2.5. Пневмогидравлические	ПГ	7	Группа аппаратно-технических изделий:	АП
	2.6. Нормализованных узлов, деталей и запчастей	НД			
3	Группа автомобильных изделий:	АМ		7.1. Литейно-металлургические	ЛМ
				7.2. Нагревательно-холодильные	НХ
	3.1. Автотранспортные	АТ		7.3. Ванно-печные	ВП
	3.2. Сельскохозяйственные	СХ		7.4. Коммунальные	КМ
	3.3. Строительно-дорожные	СД		7.5. Сантехнические и вентиляционные	СВ
	3.4. Мелиоративно-ирригационные	МИ		7.6. Пищевые	ПИ
4	Группа грузоподъемно-транспортных изделий:	ГТ		7.7. Лакокрасочные	ЛК
				7.8. Химико-фармацевтические	ХФ
				7.9. Стеклотехнологические	СТ
	4.1. Грузоподъемные	ГП	8	Группа электронно-электрических изделий:	ЭЭ
	4.2. Внутритранспортные	ВТ		8.1. Электронные	ЭЛ
	4.3. Железнодорожные	ЖД		8.2. Электротехнические	ЭТ
	4.4. Плавающие	ПЛ		8.3. Электроэнергетические	ЭН
5	Группа изделий точной механики и оптики:	ТМ		8.4. Связи и сигнализации	СС
				8.5. Вычислительно-микропроцессорные	ВМ
	5.1. Хронометрические	ХМ		8.6. Приборные	ПР
	5.2. Медицинские	МД		8.7. Электросварочные	ЭС
	5.3. Печатающие	ПЧ		8.8. Электробытовые	ЭБ
	5.4. Полиграфические	ПГ			

Понятие «приведенная деталь» удобно распространять на такие типы деталей, трудоемкость изготовления которых либо превышает трудоемкость изготовления условной детали, либо составляет величину того же порядка. Те же детали изделия, трудоемкость изготовления которых составляет от трудоемкости изготовления условной детали величину второго и более высоких порядков малости, в структуре изделия могут быть учтены без дифференциации общим их количеством как одна приведенная деталь со значением эквивалента ее структуры равным отношению суммарной массы всех деталей $M_{\Sigma д}$, входящих в общую приведенную деталь, к массе условной детали $M_{уд}$. К таким деталям относятся мелкие и простые детали (пальцы, штоки, иглы и т.п.), крепежные и соединительные детали (болты, гайки, шайбы, шпонки, шпильки, штифты, шплинты, трубки, провода и т.п.), а также несложные штампованные, гнутые и витые детали (крышки, уголки, кронштейны, щитки, кожухи, пружины и т.п.).

Введение понятия эквивалента структуры детали дает возможность представлять структурную сложность всего изделия или любой его составной части (сборочной единицы) соответствующими безразмерными числами, выражающими количество условных деталей, содержащихся в структуре соответственно всего изделия или рассматриваемой его составной части (сборочной единицы). Тогда основной параметр G_{cc} в формуле (1) может быть представлен как отношение эквивалента структуры любого машиностроительного изделия к эквиваленту структуры простейшего изделия того же вида, т.е.

$$G_{cc} = \frac{Z_u}{Z_u^n} \quad (2)$$

Следовательно, группы структурной сложности базового изделия и изделия, принимаемого к производству, можно выразить соотношениями:

$$G_{cc}^{бу} = \frac{Z_u^b}{Z_u^n} \quad \text{и} \quad G_{cc}^{nm} = \frac{Z_u^{nm}}{Z_u^n} \quad (3)$$

При этом группа структурной сложности простейшего вида изделия равна 1, т.е. $G_{cc}=1$.

Для всех других изделий (узлов, деталей) того же вида группа структурной сложности будет представлять собой число, показывающее, во сколько раз структура данного изделия (узлов, деталей) сложнее структуры простейшего изделия, например, «сложный вал – 2,9», «станина – 12», «коробка скоростей – 65», «сверлильный станок – 137» и т.д.

Методику определения обобщенных оценочных коэффициентов сущностной сложности изделия K_n , K_m , K_{Σ} , K_n , K_n и в формуле (1) рассмотрим на примере станкоинструментальных изделий, для чего воспользуемся материалами работы [3].

Пересчет трудоемкостей работ при выполнении технических и рабочих проектов для всех сочетаний групп сложности и новизны (рис.2, а) позволил получить коэффициент увеличения трудоемкости проектирования и изготовления изделий по сравнению с начальной трудоемкостью этих работ (рис.2, б).

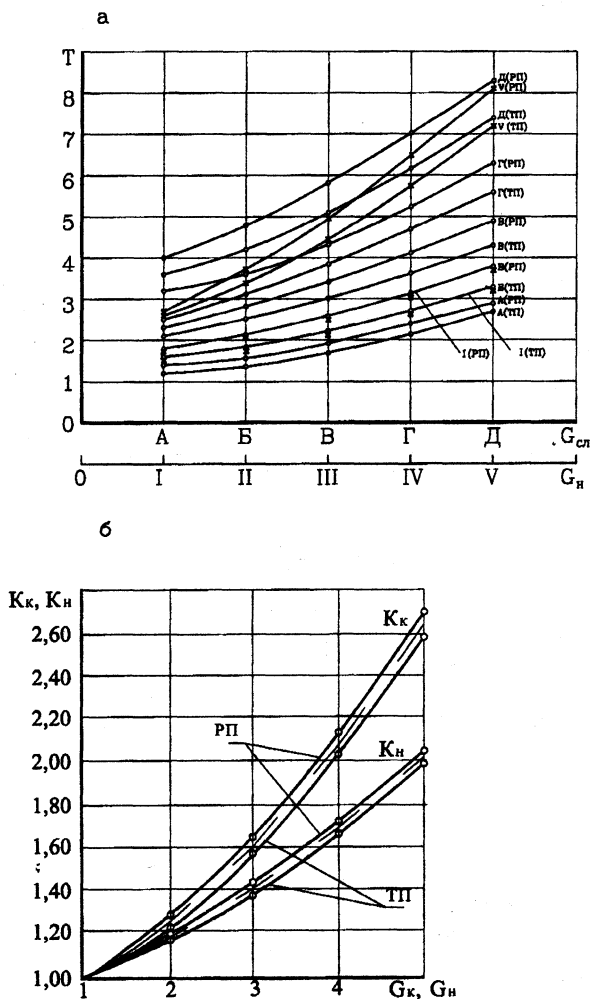


Рис. 2. Зависимость трудоемкости T (а) и коэффициентов K_k и K_n (б) от сложности и новизны изделий.

При этом учитывалось то обстоятельство, что трудоемкость изготовления изделия не равна трудоемкости его проектирования, но коэффициенты увеличения трудоемкостей проектирования и изготовления изделия с увеличением его существенной сложности (группы сложности и группы новизны) по сравнению с более простым изделием имеют весьма близкие численные значения.

Формулы для расчетов коэффициентов концептуальной сложности K_K и новизны K_H имеют следующий вид:

$$K_K = \left\{ 1 - 0,23 \cdot \sin \left[\frac{\pi}{4} \cdot (G_K - 1) \right] \right\} \cdot 0,425 \cdot (G_K - 1) + 1; \quad (4)$$

$$K_H = \left\{ 1 - 0,15 \cdot \sin \left[\frac{\pi}{4} \cdot (G_H - 1) \right] \right\} \cdot 0,263 \cdot (G_H - 1) + 1. \quad (5)$$

Остальные коэффициенты, входящие в формулу (1), могут быть определены по следующим выражениям:

$$K_M = 1 + 0,0000225 \cdot S \cdot M, \quad (6)$$

где S – размер годовой серии выпуска (годовая программа выпуска), шт/год; M – масса изделия, т.

$$K_{\epsilon} = C \cdot \frac{H}{H_{\epsilon}}, \quad (7)$$

где C – корректировочный коэффициент для учета частной специфики предприятия и сборочного цеха (рекомендуется для начала принимать $C=1$); H_{ϵ} – высота изделия, предполагаемого для освоения предприятием, м; H – высота вертикального просвета (размера) пролета выездных ворот и т.п., цеха, м.

$$K_3 = K_{31} \cdot K_{32} \cdot \dots \cdot K_{3i} \cdot \dots \cdot K_{3n} \text{ или } K_3 = \prod_{i=1}^n K_{3i}, \quad (8)$$

где K_{31} , K_{32} и т.д. – частные эксплуатационные характеристики изделия, например, тропическое исполнение (K_{31}), экспортное исполнение (K_{32}), исполнение, стойкое по отношению к агрессивной среде (K_{33}) и т.д.;

Π , i и n – символы соответственно произведения, любой и последней из всех учитываемых эксплуатационных характеристик изделия.

Для каждой частной эксплуатационной характеристики изделий станкостроения в работе [3] приводятся рекомендуемые их численные значения в пределах 1,1...1,25.

Численные значения коэффициента изменения испытательной технологии K_{π} устанавливаются в зависимости от необходимости проведения как поэтап-

ных испытаний в процессе изготовления изделия, так и завершающих испытаний собранного изделия, а также от тонкостей самой испытательной технологии, сложности испытательных стендов, наличия испытательного полигона и его оснащения и т.д.

Таким образом, степень сложности нового изделия, предполагаемого к производству на данном предприятии, по сравнению со сложностью базового изделия, прежде выпускавшегося предприятием серийно, может быть легко определена в целом (по формуле (1)) или оценена отдельно по каждой составляющей этой сложности. В последнем случае при сопоставлении между собой значений каждого из обобщенных оценочных коэффициентов нового и базового изделий предприятие получает возможность определить, в каком направлении и в каком относительном объеме ему придется концентрировать свои усилия (в том числе и финансовые) для организации производства этого нового изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарин Ю.С., Старцева Т.В. Новый метод нормирования мехобработки // Машиностроитель. – 1999. – №1. – С. 35–36.
2. Якимович Б.А., Коршунов А.И. Экспертные методы оценки структурно-параметрической сложности деталей // Информатика – Машиностроение – М.: Машиностроение. 1997. – № 3. – С.28-32.
3. Нормирование конструкторских работ, выполняемых в организациях и на предприятиях Минстанкопрома СССР. Нормы времени. Утв. Минстанкопромом СССР 18.08.89. – М.: ВНИИТЭМР, 1989.- 288 с.

УДК 621.658.512. (075.8)

В. И. Серебряков

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА И РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

*Политехнический институт
г.Зелена Гура, Польша*

Требуемые характеристики точности размеров, формы и взаимного расположения поверхностей достигаются в процессе механической обработки, как известно, двумя методами: автоматическим – на настроенных станках и индивидуальным – с настройкой технологической системы для обработки каждой заготовки.

Настройка технологической системы при механической обработке предлагает осуществление одного из важнейших этапов – установку заготовки в приспособле-

нии, которая связана с ограничением всех шести степеней свободы и может сопровождаться возникновением статической погрешности. В отличие от «установа» как структурной части технологического процесса установка – это процесс, состоящий из двух этапов: базирование (ориентирование) заготовки в прямоугольной системе координат технологической системы и закрепление. Каждый из двух этапов сопровождается ограничением определенного количества степеней свободы (движений) заготовки в прямоугольной системе координат и появлением погрешностей (базирования и закрепления). Поэтому выбор технологических баз для осуществления процесса установки связан с решением двух задач:

- 1 – ограничение необходимого и достаточного количества степеней свободы (движений) заготовки в процессе базирования и ограничение оставшихся закреплением;
- 2 – анализ и расчет допускаемых погрешностей базирования и закрепления.

Согласно ГОСТ 21495-76 г. по количеству ограничиваемых степеней свободы различают базы установочную, направляющую, опорную, двойную направляющую, двойную опорную. При этом не уточняется, какие движения и в каких направлениях ограничиваются этими базами, что не позволяет четко распределить, какое количество степеней свободы (движений) заготовки должно быть ограничено базированием, а какое – силовым замыканием.

Элементами заготовки (детали) являются поверхности, линии, оси и точки. Этими элементами можно конструктивно изобразить любые детали, ими же заготовка контактирует с установочными элементами приспособлений. Некоторые из них являются реальными, например поверхность (плоскость), линия (ребро призматического тела), точка (вершина конуса); другие – воображаемыми, например ось вращения цилиндра, точка – место пересечения двух осей. Очевидно, что контакт с установочными элементами приспособления может быть осуществлен только реальными элементами заготовки.

Исходя из требований достижения основной цели процесса установки – обеспечения заданной точности обрабатываемых поверхностей заготовки – к этому процессу предъявляют следующие требования:

- 1 – процесс установки (базирование и закрепление) должен ограничивать все шесть степеней свободы заготовки;
- 2 – процесс базирования должен ограничивать необходимое и достаточное количество степеней свободы (движений) заготовки в зависимости от точностных требований обрабатываемой поверхности;
- 3 – положение каждой заготовки, достигнутое при базировании, должно быть зафиксировано закреплением с ограничением оставшихся свободными движений;
- 4 – возникающая погрешность при базировании должна быть в пределах допустимой, а погрешность закрепления не должна оказывать существенного влияния на заданную точность.

При выборе технологической базы необходимо четко представлять, какие движения заготовки должны и могут быть ограничены этой базой, а какие из остав-

шихся должны быть ограничены другими базами, или силовым замыканием. При этом на каждом этапе базирования с использованием конкретной выбранной базы должно выполняться требование условия равновесия всех сил и моментов сил, действующих на заготовку. Кроме того, во всех случаях установки заготовки в приспособлении для обеспечения ее неизменного положения в процессе резания должно соблюдаться основное условие статики: сумма сил и моментов сил, действующих на заготовку после ее установки, должна равняться нулю.

Как известно, любое тело в прямоугольной системе координат имеет шесть степеней свободы, которые можно представить в виде поступательных и вращательных движений, имеющих знак направления движения – положительный или отрицательный. Условимся, что положительным направлением поступательного движения тела будет то, которое совпадает с направлением перемещения по стрелке вдоль оси координат, а отрицательным – в обратном направлении. Движение вращения по часовой стрелке вокруг оси координат для наблюдателя, смотрящего вдоль этой оси по направлению к центру системы координат, имеет положительный знак, против часовой стрелки – отрицательный. Все отмеченное в количественном и качественном виде представлено на рис.1. Каждая пустая клетка в таблице должна характеризовать вид и направление движения, ограничиваемого в процессе базирования. Эта таблица будет использоваться при анализе процесса ограничения движений базированием заготовки в прямоугольной системе координат с последовательным выбором баз. Для осуществления этого процесса примем следующие условия ограничения движений заготовки последовательным использованием баз при контакте их с опорами [1].

1. Движение заготовки при базировании считается ограниченным, если:

- 1 – этому движению препятствует опора;
- 2 – при движении изменяется характер односторонней или двухсторонней контактной связи (количественный) между базой и опорами, сопровождающийся постепенным уменьшением точек контакта.

II. Движение заготовки при базировании считается неограниченным, если:

- 1 – при движении связь между базой и опорой теряется мгновенно (прерывается с нарушением контакта между ними);
- 2 – при движении характер связи между базой и опорами количественно не изменяется. Характер связи между базой и опорами определяется количеством опорных точек, контактирующих с базой: одно-, двух- или трехопорный. Так, если тело, лежащее на горизонтальной плоскости XOY и имеющее трехопорный контакт своей установочной базой с опорами, перемещать вдоль оси Z вверх, то происходит мгновенная потеря контакта по всем трем точкам. Если это тело постепенно поворачивать вокруг оси OX или OY , то при этом происходит изменение характера связи путем постепенного нарушения контакта с переходом от 3-х до 2-точечного и далее – к одноточечному контакту.

Разберем вышесказанное на примере базирования призматического тела (рис. 1, а). Когда тело плоскостью основания (установочная база) лежит на трех опорах в плоскости XOY , то ограничиваются вращения вокруг осей X и Y в двух направлениях ($\pm V_x$) и ($\pm V_y$) согласно п. 1.2. Перемещение вдоль оси Z вниз ($-P_z$) ограничено опорой. Таким образом, базирование тела на плоскости $OXYZ$ ограничивает движение по 5-ти направлениям, оставляя остальные движения свободными. Результаты этого анализа базирования заносим в таблицу (рис. 1, б, диагонали в соответствующих клетках).

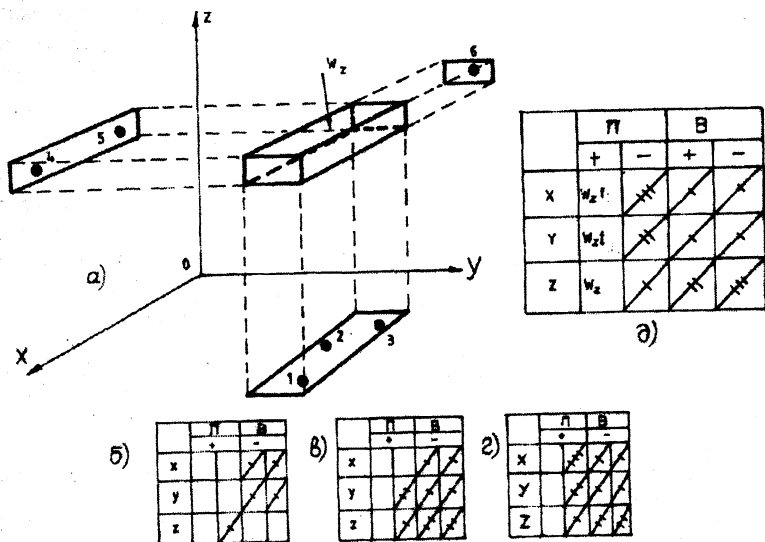


Рис. 1. Анализ процесса базирования призматической заготовки в прямоугольной системе координат.

Продолжая процесс ограничения степеней свободы тела, в качестве следующей базы выбираем ее боковую поверхность с двумя точками опоры (направляющая база). Исходя из вышеперечисленных определений, у тела будут ограничены: движения вращения в двух направлениях вокруг оси Z ($\pm B_z$) и перемещение в одном направлении вдоль оси X ($-P_x$), что дополнительно отмечено соответствующими диагоналями (рис. 1, в).

Использование в качестве третьей базы торцевой поверхности призматического тела с одной опорой позволяет ограничить перемещение в одном направлении к центру системы координат вдоль оси Y ($-P_y$), как показано на рис. 1, г. Перемеще-

ния тела вдоль осей X, Y, Z ($+P_x, +P_y, +P_z$) связаны с мгновенной потерей связи между телом и опорами, и поэтому эти движения не могут считаться ограниченными выбранными базами. Если на призматическое тело в данном положении не действуют другие силы, кроме силы тяжести, то оно находится в равновесии при данном количестве ограниченных движений (шести степеней свободы по девяти направлениям движений). Однако под воздействием сил резания это равновесие будет нарушено, поэтому необходимо приложить силовое замыкание в виде сил зажима, ограничивающих оставшиеся три направления движения, например, силой W_z . При этом сила зажима W_z ограничит перемещение $+P_z$, а силы трения $F_1 = W_z f_1$ и $F_2 = W_z f_2$ ограничат перемещения вдоль осей X и Y соответственно. В этих формулах f_1 и f_2 – коэффициенты трения базовых поверхностей по плоскостям установочных элементов вдоль осей X и Y . Процесс установки завершен (рис. 1, д), все шесть степеней свободы (двенадцать направлений движений) ограничены базированием и силовым замыканием.

Аналогичным образом можно проанализировать процесс ограничения движений выбранными базами любых тел в прямоугольной системе координат с последующим закреплением. Например – базирование шаровой поверхности и контактом ее с тремя плоскостями системы координат по трем точкам с ограничением трех перемещений ($P_x; P_y$ и P_z), когда шаровая поверхность выступает в качестве тройной опорной базы.

Таким образом, используемые поверхности заготовки в качестве технологических баз, возможности которых по ограничению степеней свободы рассмотрены выше, можно охарактеризовать качественно и количественно следующим образом:

- **установочная** – три степени свободы или ограничение движения вращения вокруг двух осей по двум направлениям и одно перемещение в одном направлении;
- **направляющая** – две степени свободы или ограничение одного вращения по двум направлениям и одного перемещения в одном направлении;
- **опорная** – одна степень свободы с ограничением одного перемещения;
- **двойная направляющая** – четыре степени свободы или два вращения по двум направлениям каждое и два перемещения (в одном и двух направлениях);
- **двойная опорная** – две степени свободы или два перемещения;
- **тройная опорная** (не предусмотренная ГОСТом) – три степени свободы с ограничением трех перемещений по трем направлениям.

Одновременно с выбором технологических баз и анализом процесса базирования необходимо проанализировать возникающую погрешность базирования. В сущности, эта погрешность возникает при несовпадении баз – измерительной и технологической и может быть определена как разность предельных расстояний размера (A), соединяющего эти две базы [2, 3]. Независимо от характера проявления измерительной базы (скрытой или явной) постоянство положения ее в пространстве достигается подбором соответствующей явной технологической базы, контактирующей с установочными элементами приспособления. Так, при фрезерова-

нии шпоночного паза в шаре (рис.2, а) требуется обеспечить симметричное его расположение по ширине относительно плоскости симметрии ZOY с одновременным обеспечением требования параллельности плоскости паза поверхности A . Измерительными базами являются: плоскость симметрии XOY (скрытая) и плоскость A (явная). Постоянство положения измерительной базы осуществляется выбором следующих явных технологических баз: шаровой поверхности и плоскости основания A . Однако анализ ограничения движений этими базами показывает, что перемещение вдоль оси Z ($-P_z$) ограничивается дважды одновременно этими двумя базами, что приведет к статической неопределенности системы. Исключить это можно конструкцией установочного элемента (2), перемещающегося вдоль оси Z . В этом случае «возвращено» движение $-P_z$ технологической базе A . Этим ликвидируется неопределенность положения при базировании и погрешность базирования, влияющая на точности симметричного положения паза в плоскости YOZ . Ограничение оставшихся свободными вращения вокруг оси Z ($\pm B_z$) и перемещения вдоль оси Z осуществляется силой W_z . Погрешность закрепления в этом случае зависит от шероховатости поверхностей – шаровой (базовой) и установочного элемента 1.

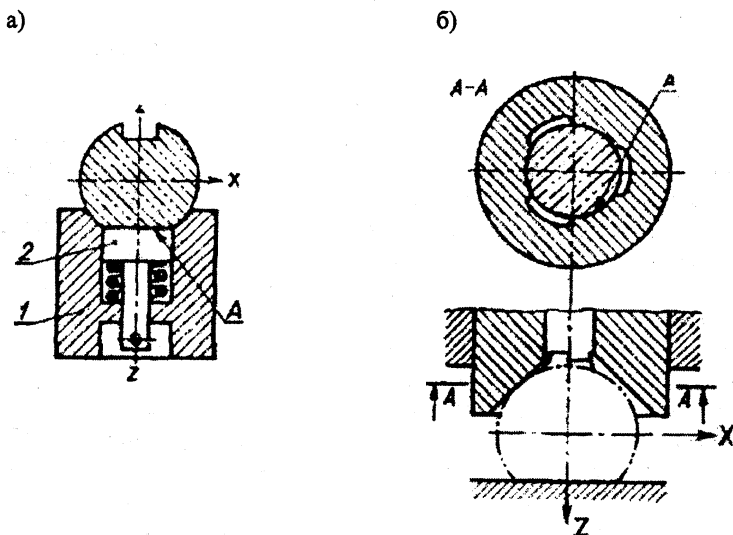


Рис. 2. Применение самоустанавливающихся установочных элементов в зависимости от выбранных технологических баз и возникающей погрешности базирования.

В практике машиностроения она, как правило, не превышает 0,1 погрешности базирования, а суммарная погрешность установки не должна быть более 0,25 до-

пуска размера при обработке заданной поверхности. Погрешность базирования при фрезеровании шпоночного паза в размер h определяется согласно методике [3]: – при несовпадении баз измерительной (пов. А) и технологической (сечение шаровой поверхности по окружности В с тремя точками касания) дает погрешность базирования равную $St_{ax} - St_{in}$ или сумме отклонений указанных баз по оси Z ($T_n + 0,2T_D$). Устранить эту погрешность можно с помощью другой конструкции установочных самоцентрирующих элементов (рис.2, в).

На основе проведенного анализа процесса базирования можно сделать следующие выводы:

1. Погрешностью базирования можно управлять выбором технологических баз, уменьшая ее до нуля достижением постоянства положения измерительной базы (при обработке на концентрированных многоинструментальных операциях или с программным управлением), либо изменением конструкции установочного элемента с жесткой на самоустанавливающуюся.

2. В связи с усложнением конструкции приспособления при использовании самоустанавливающихся опор перед их применением необходимо проводить анализ и расчет возникающей погрешности базирования с оценкой степени ее влияния на достигаемую точность при обработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.Samek. Projektowanie uchwytów obrobkowych. – Krakow, 1971. – 132 s. 2. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений. – М.: Машгиз, 1983. – 277 с. 3. Ансеров М.А. Приспособления для металлорежущих станков. – Л.: Машиностроение, 1975. – 654 с.

УДК 621.85.052.44

А. Т. Скойбеда, А. Г. Баханович, И. Г. Баханович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИВОДНЫХ ЗУБЧАТЫХ РЕМНЕЙ С ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ ЗУБЬЕВ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Технология производства приводных зубчатых ремней сводится к следующим комплексам технологических операций: а) сборка заготовки ремня из кордных, тканевых и невулканизированных эластомерных материалов; б) вулкани-

зация заготовок; в) резка заготовок (викеля) на отдельные ремни; г) контроль качества ремней.

Сборка заготовок замкнутых ремней заключается в наложении на сборочный профильный барабан одного или нескольких слоев обкладочной ткани, наливки по винтовой линии нити корда, укладки и прикатки требуемого количества эластомера. Надеваемая на сборочный барабан ткань имеет вид цилиндрического рукава, сшитого или склеенного по образующей.

Операция наливки кордшнура является наиболее важной на данном технологическом этапе. От качества ее выполнения во многом зависят равномерность нагружения отдельных витков кордшнура и несущая способность ремня в целом.

Равномерность наливки кордшнура обеспечивается при выполнении как минимум двух требований: постоянных шага и натяжения наливки. Стабильный шаг наливки обеспечивается применением одного или нескольких роликов для наводки корда. Зазор между роликом и сборочным барабаном выбирается минимальным (2...10 мм).

Заданное усилие натяжения обеспечивается с помощью тормозных механизмов, воздействующих на бобину с кордшнуром. Натяжение кордшнура поддерживается постоянным периодической регулировкой тормозного момента, осуществляемой вручную.

При наливке на сборочный барабан кордной нити происходит ее дополнительное закручивание или раскручивание, в результате чего шаг свивки нити изменяется. Ремни с металлокордом, получившим дополнительную скрутку, в свободном состоянии самопроизвольно деформируются, приобретая вид «восьмерок». Работа таких ремней в передаче сопровождается их интенсивным трением о реборды. Для устранения этого явления сборочный станок оснащается дополнительным приспособлением, осуществляющим при наливке корда вращение узла крепления бобины вместе с самой бобиной в сторону, противоположную направлению вращения сборочного барабана [1].

После разрезки викеля возникают определенные трудности с заделкой концов выступающего с торцов ремня кордшнура. Особенно проблема актуальна для ремней с металлокордом, концы которого способны вызывать травмы и повреждать детали передачи. Наиболее простой путь устранения подобного явления заключается в придании нити корда увеличенного угла наливки в местах будущей разрезки. Такая наливка осуществляется с помощью дополнительного суппорта, установленного на основном суппорте сборочного станка и несущего наводочный ролик. Дополнительному суппорту сообщается прерывистое движение, в результате чего в местах будущей разрезки викеля скорости обоих суппортов складываются. Результатом является увеличенный угол наклона спиралей корда. На участках обычной наливки дополнительный суппорт неподвижен относительно основного [2].

Вулканизация приводных ремней осуществляется в автоклавах. Такой метод вулканизации характерен для длинномерных (до 3150 мм) зубчатых ремней. Более

длинные ремни вулканизуют в челюстных прессах или вулканизаторах периодического действия, выполняющих вулканизацию ремня по участкам.

Зубчатые ремни небольшой длины, лишенные тканевой обкладки, изготавливают методом литья в пресс-формах на гидравлических прессах с плоскими обогреваемыми плитами. Литые ремни отличаются точными размерами и высоким качеством поверхностей. Однако, будучи лишены тканевой обкладки рабочей части, такие ремни недостаточно долговечны. Напротив, ремни, изготовленные в автоклаве, оснащены тканевой обкладкой, и их долговечность в 5–7 раз превышает долговечность аналогичных литых ремней.

Вместе с тем технология вулканизации в автоклаве имеет свои недостатки, не позволяющие в полной мере реализовать максимальную долговечность изготавливаемых ремней. Прежде всего, это связано с низкими давлениями прессования (до 0,6...1,5 МПа) в отличие от предыдущего метода (свыше 15...25 МПа). Низкие давления прессования обуславливают невысокие показатели прочности адгезии корда к эластомеру, а также наличие пористостей, раковин и т.д. в готовом изделии. Кроме того, прессование в автоклаве осуществляется гибким прессующим органом – резинокордной диафрагмой. Наличие нежесткого прессующего органа не позволяет получать требуемую толщину ремней, для достижения которой их приходится шлифовать.

Объединение положительных свойств обеих технологий реализовано в новой технологии изготовления приводных зубчатых ремней, разработанной с нашим участием. Технология основана на прессовании заготовки ремня жесткими прессующими секторами, синхронно сближающимися в радиальном направлении. Течение вулканизируемого эластомера в радиальном направлении обеспечивает качественное оформление тканевой обкладки на рабочей части ремня, исключая складкообразование. Наличие жестких прессующих секторов позволяет получать ремни заданной толщины и с требуемым качеством поверхностей непосредственно в пресс-форме [3, 4]. Технология запатентована в ведущих развитых странах [5, 6].

Изготовление приводных зубчатых ремней по методу прессования жесткими секторами или прессующими элементами (ПЖЭ) осуществляется на стандартных вулканизационных гидравлических прессах с плоскими обогреваемыми плитами. Для реализации метода используются 2 разновидности пресс-форм. Первая, с вертикальной осью профильного барабана и комплектом секторов и конусов (секторная), предназначена для изготовления сравнительно больших ремней, длиной 700...1500 мм. Вторая, с горизонтальной осью профильного барабана и двумя прессующими секторами (полуформами), позволяющая изготавливать ремни длиной 100...800 мм. Во избежание изготовления дорогостоящих комплексов полуформ, для близких по размерам ремней изготавливают один унифицированный корпус, оснащенный комплектом упругих сменных втулок, внутренняя поверхность которых выполняет формообразующие функции.

Проведенные исследования показали, что применение метода ПЖЭ позволяет обеспечить более высокие показатели механических свойств ремня по сравнению с вулканизацией в автоклаве благодаря получению повышенного давления прессования и, как следствие, повысить несущую способность и долговечность производимых приводных зубчатых ремней.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1 761 541, МКИ В 29 С 29/08. Устройство для сборки бесконечных резиновых лент. 2. А.с. 1 431 956, МКИ В 29 С 29/08. Устройство для сборки резиновых лент. 3. А.с. 1 248 167, МКИ В 29 С 35/02. Устройство для изготовления кольцевых полимерных изделий. 4. А.с. 1 481 076, МКИ В 29 С 35/02. Устройство для изготовления резиновых зубчатых ремней. 5. Пат. 4 867 661 США, МКИ В 29 С 33/02. Mould for Making annular articles / A.T. Skoybeda et al. 6. Пат. 2 191 974 (Великобритания), МКИ В 29 С 33/10. Mould for Making annular articles / A.T. Skoybeda et al.

УДК 621.75.002:51

И. П. Филонов, Л. В. Курч, Е. Б. Вериги, И. А. Политов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГИЙ В СФЕРАХ ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В последнее время развитие всемирной компьютерной сети Интернет затронуло почти все сферы общественной деятельности, включая образование и производство.

В связи с этим появились потребности в соответствующих Интернет-приложениях и базах данных, повышающих эффективность использования всемирной компьютерной сети на практике.

На кафедре «Технология машиностроения» БГПА создана база данных по электрофизическим и электрохимическим методам обработки, имеющая цель применения ее в сети Интернет в качестве учебно-методического пособия, а также в качестве справочного руководства при подготовке производства.

Еще не так давно совместный доступ к информации был возможен только в пределах территориально нераспределенного учреждения. В настоящее время информация может быть получена с компьютера, находящегося на расстоянии нескольких тысяч километров. Такая возможность появилась вследствие бурного развития сетевых информационных технологий, приведшего к созданию глобальной компьютерной сети Интернет. При этом компьютеры, подключенные к сети, работают под различными операционными системами (Windows 98, Macintosh System, Unix, Windows NT и др.), что не имеет значения при обмене данными между компьютерами в Интернете.

Миллионы пользователей во всем мире получили возможность обмениваться сообщениями с помощью средств электронной почты и получать доступ к огромному объему разнообразной информации благодаря WWW-технологии (технологии представления электронной информации в Интернет).

Интернет и WWW коренным образом изменили методы передачи и представления электронной информации, оказали значительное влияние на трудовые процессы.

По существу, это новый виток в области информационных технологий.

Интернет активно используется и в образовательном процессе.

В соответствии с проектом «Internet – БГПА» на территории БГПА создана локальная вычислительная сеть, объединяющая большинство корпусов и подразделений на основе оптоволоконна.

Локальная вычислительная сеть БГПА подключена к оптическому кольцу Unibel Министерства образования наряду с другими вузами и организациями. Выход во внешний канал Интернет осуществляется компанией «Белтелеком».

Для управления локальной вычислительной сетью создан центральный коммуникационный узел в составе Web-сервера, сервера электронной почты и Guardian FireWall. Для повышения скорости получения информации используется кэширование с помощью Proxy-сервера.

Все вышеперечисленное показывает, что на сегодняшний день есть реальные возможности для создания такого вида обучения, как дистанционное. Наряду с традиционными видами обучения (дневное, вечернее, заочное) оно способно кардинальным образом изменить уровень образования [1].

Не менее важную роль сыграло использование сети Интернет в промышленности. Она открывает доступ к огромным базам данных технической и патентной документации. Любое техническое решение может быть в кратчайшие сроки доведено до широкого круга пользователей.

Протоколы, используемые для передачи информации в сети Интернет, могут использоваться и для внутренней сети Интранет предприятия или организации, что предусматривает совместный доступ к информации и базам данных.

Перечисленные выше преимущества использования всемирной компьютерной сети невозможны без наличия соответствующего программного обеспечения и доступной, структурированной информации, касающейся новейших научных разработок, представленной в виде HTML-документов.

Возможен также перевод существующей информации из текстового формата в формат языка гипертекстовых ссылок при помощи современных программных средств (MSWord, Front Page, Dreamweaver и т.д.) Информационные технологии, и в частности Интернет, являясь, пожалуй, самыми быстроразвивающимися технологиями, и не исключено, что формат HTML, а также язык текстовой разметки XML (eXtensible Markup Language) станут стандартом в области представления информации [2], [3].

Использование сети Интернет в сферах производства и образования требует наличия структурированной и доступной информации.

В условиях рыночной экономики устойчивость предприятия на рынке и конкурентоспособность продукции зависит от степени внедрения на предприятии современных наукоемких технологий, к которым можно отнести WWW-технологии.

Эффективное образование также предусматривает применение современных технологий передачи и усвоения информации.

Для этого на кафедре «Технология машиностроения» и были начаты работы с целью их дальнейшего использования в сети Интернет или локальной сети Интранет.

Первым примером такого рода издания стал электронный справочник по ЭФХМО (электрофизическим и электрохимическим методам обработки). За основу был взят ряд справочников по нетрадиционным видам обработки, представленным в традиционном (бумажном) варианте.

При создании базы данных использовались современные Интернет-технологии, такие как Java-апплеты, DHTML, что позволило максимально упростить интерфейс управления и сделать его в интуитивно понятной форме, не требующей специальных навыков при использовании. Пользователь при работе с электронным справочником может переходить из одного раздела в другой, нажимая соответствующие ссылки выпадающего меню.

Исходный материал, наполняющий базу данных выбран исходя из того, что использование нетрадиционных методов обработки в проектируемых технологиях позволяет во многих случаях сократить количество используемых дорогостоящих инструментальных материалов, и, как правило, они являются более технологичными по сравнению с аналогичными операциями с использованием режущего инструмента, которые основаны преимущественно на силовом (контактном) воздействии инструмента на заготовку.

Эффективность применения ЭФХМО тем выше, чем:

- сложнее форма обрабатываемой поверхности;
- выше физико-механические свойства материала заготовки, особенно твердость и вязкость;
- больше технологических трудностей, возникающих при выполнении обработки традиционными методами, например резанием.

В настоящее время разработано большое количество нетрадиционных видов обработки. В справочник включены пока только 9 основных видов ЭФХМО:

- 1) электрохимическая обработка;
- 2) электроэрозионная обработка;
- 3) ультразвуковая обработка;
- 4) электронно-лучевая обработка;
- 5) светолучевая обработка;
- 6) плазменная обработка;
- 7) электровзрывная обработка;
- 8) магнито-импульсное формообразование;
- 9) гидроструйная резка.

По каждому виду приведены режимы обработки, описаны физические явления, протекающие при обработке, дано подробное описание основного и вспомогательного оборудования. Вся информация снабжена схемами, иллюстрациями и графиками, позволяющими глубже вникнуть в суть происходящего процесса.

Дана краткая информация об отечественных и зарубежных предприятиях, использующих в своём производстве нетрадиционные виды обработки, их адреса и телефоны, а также ссылки на Интернет-сайты.

В конце описания каждого метода приведен список литературы, где каждый желающий может почерпнуть дополнительные сведения по заинтересовавшей его теме.

В будущем планируется расширять существующую базу данных последними разработками в этой области научных коллективов БГПА.

В заключение хотелось бы сказать, что данный справочник является очередным шагом на пути к созданию единой компьютерной сети, в которую был бы включен ряд предприятий, организаций и институтов, что позволит значительно ускорить внедрение в производство новейших научных разработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гриценко В.И., Довгяло А.М., Кудрявцева С.П., Цыбенко Ю.В. Дистанционное обучение: современное состояние и перспективы // Управляющие системы и машины. № 2, 1998. 2. Оськин А.Ф., Оськина Л.Д. Технология интерактивного обучения, использующая IntraNet // Материалы конференции «Новые информационные технологии в науке и производстве». – БГУИР, 1998. 3. Кривошеев А.О. Разработка и использование компьютерных обучающих программ // Информационные технологии. № 2, 1996.

И. П. Филонов, Л. В. Курч, А. В. Кучеров

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ CAD-CAM-CAE ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Специфика современной жизни диктует свои правила в отношениях между человеком и техникой. В человеческом быту появляются различные средства автоматизации, снабженные электрическими и электронными системами управления. Компьютерные технологии все шире входят в нашу жизнь, значительно облегчая и упрощая ее.

Особенно успешно развиваются технологии, связанные с созданием компьютерных приложений, облегчающих работу инженерно технического персонала в области разработки или испытаний различных объектов, – CAD-CAM-CAE – системы. В большинстве случаев в основу таких приложений положено компьютерное моделирование исследуемых объектов с применением развернутого математического аппарата, возможность отображения их в 2D и 3D проекциях, а также применение расчетных модулей, способных проверять работоспособность изделия еще на стадии проектирования.

В настоящее время на большинстве заводов нашей республики сделаны первые шаги по внедрению CAD-CAM-CAE-пакетов в процесс проектирования, расчета и математического моделирования различных изделий. Особенно заметен этот процесс в области машиностроения, так как на территории Беларуси очень много предприятий этой отрасли.

Какие же CAD-CAM-CAE-пакеты используют наши предприятия? Точный ответ на этот вопрос дать сложно, так как у многих заводов своя специфика работы, направленная на изготовление того или иного изделия. Приблизительный ответ можно получить, проанализировав обстановку на ряде крупных машиностроительных предприятиях города Минска.

МАЗ – головное предприятие производственного объединения «БелавтоМАЗ» – крупнейшее промышленное предприятие Республики Беларусь.

Минский автомобильный завод является одним из лидеров современного белорусского машиностроения. Продукция данного предприятия и в настоящее время востребован и пользуется спросом на внутреннем и внешнем рынках. МАЗ не ос-

танавливается в развитии и представляет ежегодно новые модели грузовых автомобилей и шасси.

МАЗ сегодня – это более 20 моделей и модификаций автомобилей, прицепов и полуприцепов, сходящих с его конвейеров. Специализирующийся на выпуске различного типа автомобилей и автопоездов грузоподъемностью от 8 до 35 тонн, предназначенных прежде всего для международных и междугородных перевозок грузов, автозавод в Минске наряду с бортовыми машинами и автопоездами производит самосвалы, лесовозы, автомобили-шасси, идущие на комплектацию.

Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что наладить выпуск такого ассортимента продукции невозможно было бы без применения новейших компьютерных технологий, и в том числе CAD-CAM-CAE-приложений.

Основным пакетом, используемым для проектирования и расчета на производственном объединении «БелавтоМАЗ», является Unigraphics. Это приложение дает возможность не только проектировать всевозможные механизмы и узлы, но и рассчитывать их еще на стадии компьютерного варианта. Компьютерное моделирование ведется с применением математических методов [1].

На рис.1 показана схема нагружения поршня двигателя внутреннего сгорания различными силами. В Unigraphics возможным становится исследование динамики объекта, моделирование в условиях лаборатории реальных процессов, происходящих в той или иной конструкции. Так, на примере данной модели можно исследовать распределение напряжений и температур по гильзе цилиндра с представлением результатов в виде объемных картинок.

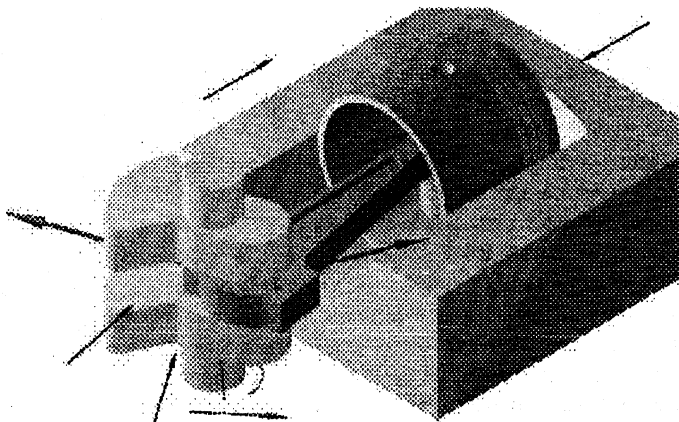


Рис. 1. Схема нагружения поршня.



Рис. 2. Схема распределения напряжений.

На рис.2 представлены объемные изображения распределения напряжений при динамических процессах, происходящих в ДВС.

Таким образом, применение этого САЕ-пакета значительно облегчает и ускоряет работу инженеров–конструкторов и технологов, увеличивает производительность разработок, что, в свою очередь, сказывается на престиже предприятия на мировом рынке.

Unigraphics имеет модульную структуру, которая позволяет использовать его в любой отрасли машиностроения. Так, к примеру, подсистема проектирования поверхностей предлагает пользователю мощный инструмент построения, анализа качества и оптимизации сложных форм, что обеспечивает эстетичность и высокие потребительские характеристики проектируемого изделия.

Однако не только МАЗ является лидером по внедрению CAD-CAM-САЕ-пакетов на производстве. В этом также преуспевает и ряд других минских предприятий. Одним из таких заводов является Минский подшипниковый завод (МПЗ). На нем уже давно стали использовать одну из лучших программ для разработки инженерных расчетов – Pro/Engineer. Эта САПР применима во всех отраслях современного машино- и приборостроения. Эта система отличается от имеющихся аналогов высокой скоростью полигональной обработки и высокой эффективностью в инженерном проектировании. В 1998 году этот продукт был удостоен специального приза среди САПР-обеспечения лабораторий и исследовательских институтов.

В системе Pro/Engineer очень удобный интерфейс, имеется возможность как 2D, так и 3D проектирования, а также возможность подключения дополнительных модулей и библиотек для более расширенного дизайна.

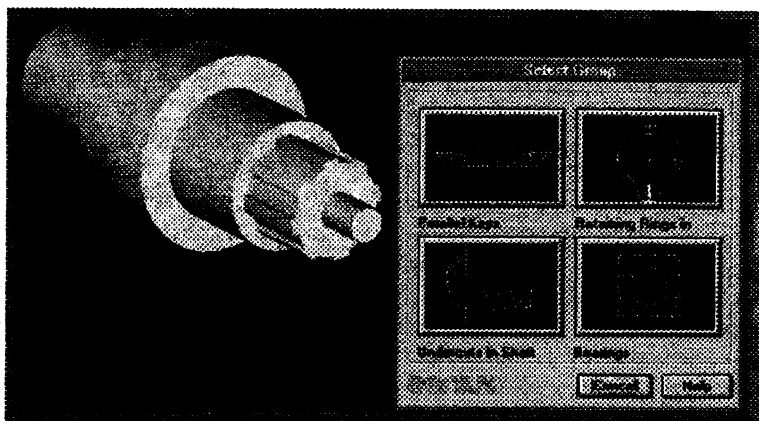


Рис. 3. Модель шлицевого валика, спроектированная в Pro/Engineer.

На рис.3 показан пример трехмерной модели, разработанной в Pro/Engineer.

Как можно видеть по этому рисунку, спроектированные детали почти приближаются своим внешним видом к реальным образцам.

Однако не только от применения САЕ-приложений зависит успех инженерной работы. Важную роль здесь играет методика и характер отображения проектируемых объектов. Эти функции на себя берут так называемые CAD-продукты. Наилучшим вариантом здесь является трехмерное отображение, хотя для наглядного отображения детали и корректного проектирования технологического процесса ее изготовления важным остается и двумерное отображение.

На большинстве предприятий Республики Беларусь свои разработки в этой отрасли САПР представляет шведская компания EMT AB – Авторизованный Системный Интегратор Autodesk в области сквозных CAD/CAM/CAE-технологий.

Наилучшим представителем в семействе AutoCAD является AutoCAD-2000. Этот CAD-продукт предназначен для автоматизации 2-3-мерного проектирования широкой номенклатуры изделий. Основным отличием от предыдущих версий является возможность одновременной работы группы специалистов, расположенных в различных точках земного шара, над одним чертежом с использованием INTERNET. Причем алгоритм совместной работы, заложенный в данной версии программного продукта, позволяет избежать многих накладок и противо-

речий, возникающих при совместной работе. Еще одной существенной особенностью обладает эта версия AutoCAD. В ней имеется встроенный модуль языка AutoLisp, с помощью которого можно программировать чертежи, добиваясь при этом максимальной производительности в процессе разработки того или иного узла.

AutoCAD применяется на таких машиностроительных заводах Минска, как МТЗ, МАЗ, МПЗ, МЗАЛ, МЗОР, «Ударник» и др.

Не только зарубежные компании занимаются разработкой CAD-CAM-CAE-пакетов. Существует и ряд белорусских и российских компаний, преуспевших в этой отрасли. Российская компания АО «Топ Системы» разработала прекрасный продукт в области CAD-проектирования – T-FLEX, который устанавливает стандарт в области систем параметрического автоматизированного проектирования и черчения для компьютеров IBM PC и совместимых с ними. Система T-FLEX CAD очень проста в использовании. При этом она обеспечивает высокую степень гибкости и возможность изменения изображения при сохранении соотношений между элементами, предусмотренных разработчиком. Уникальный механизм параметризации и полный набор профессиональных инструментов компьютерного проектирования позволяют существенно упростить процесс конструирования и оформления графической документации.

Уникальными по своим возможностям являются средства создания сборочных параметрических чертежей. T-FLEX CAD позволяет получать сложные чертежи, в которых его отдельные части могут быть взаимосвязаны. Связь можно задать как через геометрическую зависимость, так и через значения параметров. При этом обеспечивается удаление невидимых линий в случае, если отдельные части чертежа перекрывают друг друга. Уровень вложенности отдельных частей чертежа не ограничен. Меняя параметры сборочного чертежа, можно за считанные секунды получить готовые чертежи нового проектируемого изделия. Одновременно с измененным сборочным чертежом вы получите и чертежи его составных частей (деталей), а также другие сопутствующие документы.

Удобство этой CAD-системы заключается в том, что она полностью поддерживает стандарты, действующие как на территории нашей республики, так и в остальных странах СНГ.

CAD-системы, используемые в настоящее время в промышленном проектировании, являются очень мощными программами с огромным количеством функций. При этом они обычно сложны для применения и требуют как минимум наличия мощного процессора и большого объема памяти. T-FLEX CAD может работать практически на любом IBM PC-совместимом компьютере, обеспечивая высокую степень гибкости и простоты использования для любого разработчика.

Многие белорусские предприятия, такие как АО «Атлант», МАЗ, и другие используют в своем арсенале эту CAD-систему. Ее высокая производительность и невысокие системные требования позволяют использовать ее даже на маломощных компьютерах.

Из всего вышесказанного в этой статье можно сделать следующие выводы, касающиеся применения CAD-CAM-CAE-продуктов на промышленных предприятиях нашей республики:

1. Применение CAD-CAM-CAE продуктов является необходимым составляющим звеном для получения максимальной прибыли на наших предприятиях.

2. Такого рода приложения значительно ускоряют и облегчают процесс проектирования изделий.

3. У инженеров, занимающихся компьютерным проектированием и анализом различных объектов машиностроения, появляется больше времени на творчество, чем при проектировании новых изделий традиционным бумажным методом, постепенно начинающим себя изживать из-за своей трудоемкости и недостаточной гибкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Factory automation. Journal. № 1. Prof. Dr. Klaus E. Goerhmann. CAD-CAM-CAE // Henrich Publicationen GmbH. Germany. – 2000. – P.38–43.

УДК 621.75.002:51

И. П. Филонов, Л. В. Курч, В. С. Ревяко, А. В. Шавель

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И АНАЛИЗЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Основные направления развития машиностроения предусматривают дальнейшее повышение его эффективности, интенсификации, уменьшение сроков освоения и производства новой, прогрессивной техники.

Решение данных задач на сегодня невозможно без широкого использования ЭВМ, обеспечивающего оперативный многовариантный анализ и поиск наиболее перспективных конструкторских и технологических решений, а также без организации широкого обмена опытом в области создания технологичных конструкций между различными отраслями машиностроения.

Таким образом, генеральной линией развития машиностроения, на наш взгляд, должна быть комплексная автоматизация проектирования и производства.

В настоящее время уже трудно себе представить работу инженера без помощи компьютера со всем многообразием прикладных программ. Использование различных программных пакетов позволяет не только повысить эффективность труда и снизить его трудоемкость, но и приводит результаты работы к единой форме их представления (единому стандарту). Это существенно облегчает сотрудничество и обмен информацией как внутри предприятия, так и между различными субъектами хозяйствования.

При проектировании нового техпроцесса или внесения изменений в уже действующий важно точно определить экономическую эффективность внедрения предлагаемых нововведений.

На кафедре «Технология машиностроения» БГПА разработан ряд программ, позволяющих производить экономическую оценку предполагаемых изменений базового технологического процесса. Самая последняя из них – ECONOMIC`2000.

Программа позволяет производить расчет экономической эффективности за 30–40 мин., в то время как при расчетах вручную это обычно занимает не менее 3–4 часов. Также повышается точность и качество расчетов. Алгоритм функционирования программы реализован в соответствии с методиками, изложенными в [1] и [2].

Программа создана на объектно-ориентированном языке Delphi 4. Пользователю предлагается с помощью удобно организованного интерфейса ввести исходные данные. Для инициализации клавиши «Ввод» используется левая клавиша мыши. Также левая клавиша мыши используется для выбора поля ввода исходных данных.

При отсутствии информации на поставленный вопрос в графу необходимо ввести ноль или оставить ее незаполненной. Также пользователю могут предлагаться уже введенные данные, которые можно оставить без изменения

По окончании расчета в верхней части экрана программы появляется падающее меню. Используя его, пользователь имеет возможность выбрать необходимое действие: просмотр результатов расчета, вывод на печать, повтор расчета, корректировка исходных данных, окончание работы (см. рис.1).

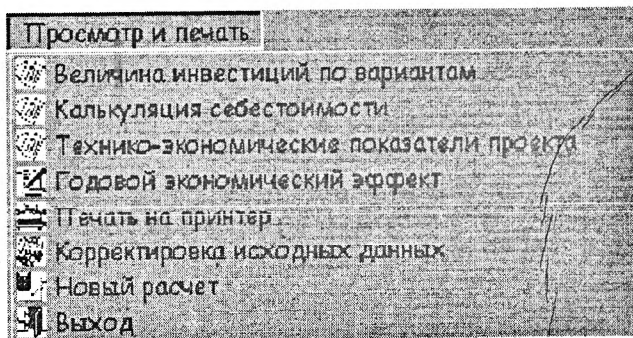


Рис. 1. Состав падающего меню.

Также пользователю предлагается к использованию контекстно-зависимая справочная система, позволяющая в интерактивном режиме проследить ход расчета, определить расчетные формулы и форму представления экономического отчета. Вызов ее осуществляется на любом компоненте программы с помощью клавиши F1.

Разработка технологического процесса и заполнение всей необходимой документации реализована на данный момент во многих CAD-CAM-системах и ECONOMIC'2000 может органично дополнять многие из них.

Так, к примеру, «Белоргстанкинпром» разработал систему автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки «САРМЕCH».

Работа в системе «САРМЕCH» позволяет решать задачи технической подготовки машиностроительных производств и направлена на автоматизацию инженерного труда, сокращение сроков и трудоемкости разработки технологической документации – маршрутных и операционных карт на предприятиях. В системе особое внимание уделено обеспечению ее универсальности – возможности привязки к условиям предприятия и возможности расширения номенклатуры деталей, охватываемых автоматизированным проектированием.

Компонентами системы «САРМЕCH» являются система автоматизированного проектирования ТП и система формирования сводных документов, объединенные информационно-справочной подсистемой накопления, хранения, поиска и выдачи конструкторско-технологической информации.

При однократной подготовке исходных данных обеспечивается:

- 1) проектирование технологических процессов механической обработки деталей;
- 2) хранение, сопровождение и тиражирование ТП;
- 3) формирование на базе архива ТП сводных документов по материальному и трудовому обеспечению производства: ведомостей материала, заготовок и оснастки, сведений о трудоемкости и загрузке оборудования, маршрутов прохождения деталей по цехам и др.

Ввод исходных данных происходит следующим образом. В начале производится задание общих сведений о детали (комплексный техпроцесс, масса, шероховатость остальных поверхностей, материал, термообработка, покрытие и т.д.), затем идет кодировка основных поверхностей детали (задаются габаритные размеры поверхностей, привязочные размеры поверхностей друг относительно друга, шероховатость и т.д.). Далее, при наличии, кодируются дополнительные поверхности (отверстия, проточки, зубья и т.д.), (см. рис.2).

По окончании кодирования детали можно произвести графический контроль, который позволит оценить правильность описания поверхностей, и при необходимости имеется возможность откорректировать исходные данные.

Убедившись в правильности описания детали, переходим к формированию технологической документации в режиме автомат (тип получаемой документации, ее вид задается при настройке системы).

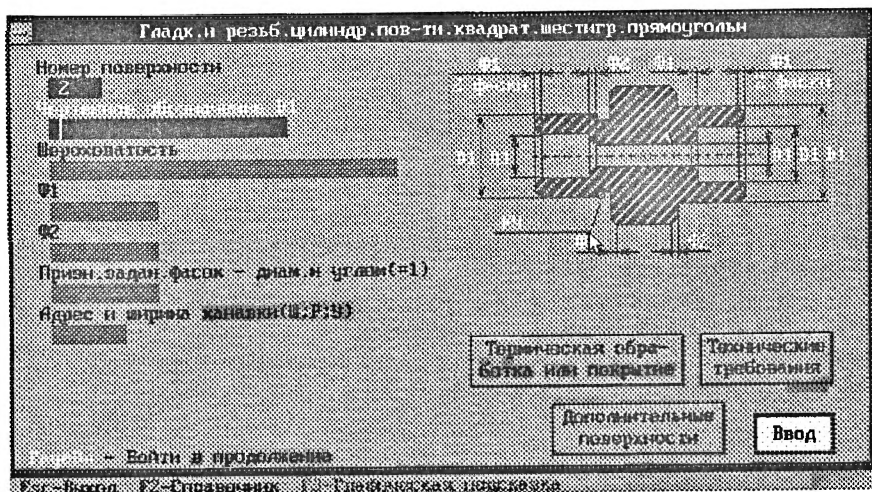


Рис. 2. Кодирование основных поверхностей детали.

По окончании получаем готовый технологический процесс, который может с успехом использоваться при некоторой ручной корректировке на производстве.

Разработанная на кафедре программа экономического расчета ECONOMIC' 2000 органично дополняет «САРМЕСН», и их совместная работа уже апробирована при дипломном проектировании. Однако на данный момент не существует единого интерфейса, позволяющего производить автоматический обмен данными между этими двумя программными продуктами на системном уровне.

Несмотря на имеющиеся проблемы, описанные выше программные пакеты уже и сейчас позволяют существенно облегчить разработку маршрутных и операционных карт, заполнение всей необходимой документации и произвести экономическую оценку разработанного техпроцесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабук И.М., Гусаков Б.И. Методическое пособие по расчету экономической эффективности внедрения новых технологических процессов для студентов машиностроительных специальностей (дипломное проектирование). - Мн.: БГПА, 1993. - С.1-38.
2. Сачко Н.С., Бабук И.Н. Организация и планирование машиностроительного производства (курсовое проектирование). - 2-е изд., перераб. и доп. - Мн.: Выш. школа, 1985. - С. 22-50.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.3:621.382:519.68

В. М. Колешко

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАШИН, ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В настоящее время практически все передовые страны мира придают огромное значение развитию инженерии интеллектуальных систем («Intelligent System Engineering»), проводя крупномасштабные исследования, обучение и разработки в рамках своих государственных программ. Такое внимание к новым интеллектуальным технологиям в информатизации общества обусловлено тем, что в отличие от традиционных формальных моделей и компьютерных систем такие технологии способны эффективно решать широкий круг трудно формализуемых задач, недоступных обычным системам.

Решение многих актуальных задач развития промышленного и сельскохозяйственного производства, топливно-энергетического комплекса, жилищно-коммунального хозяйства, энерго- и ресурсосбережения, транспорта, экологического мониторинга и здоровья человека, общественной и национальной безопасности, построение нового информационного общества требует междисциплинарного подхода и непосредственно связано с разработкой, изготовлением и эксплуатацией интеллектуальных систем мониторинга и управления, элементной базой и техническими звеньями которых являются интеллектуальные сенсоры, сенсорные системы и технологии, микропроцессорная техника, информационные мультимедиа системы, системы защиты информации, микроэлектромеханические системы, исполнительные механизмы, способные работать в составе иерархических гибких производственных систем в реальном масштабе времени благодаря интеллектуальному интерфейсу сопряжения (рис. 1). Это соответствует новому облику компьютерно-интегрированного распределенного производства и новым условиям их применения в составе локальных и глобальных интеллектуальных систем, включая всемирную паутину Интернет. Интернетовский «допинг» не только ведет к бурному информационному, образовательному и экономическому росту, но и создает миллионы новых рабочих мест. Опыт показывает, что только один год коммерческой деятельности в интернетовском пространстве равен по своей отдаче десяти годам

работы традиционными методами. Прикладные системы машинного разума (искусственного интеллекта), а также инструментальные средства для их проектирования не только стали коммерческим продуктом в цивилизованных странах, но и приносят даже сейчас значительный доход.

В настоящее время существует несколько путей развития данного направления, каждый из которых требует для достаточно полной проработки вложения огромных сил и средств. Каким же образом можно прояснить и выбрать наиболее перспективное направление образования, научно-технологических исследований и инженерных разработок? В этом случае имеется безошибочное направление развития – интеллект человека и машины.

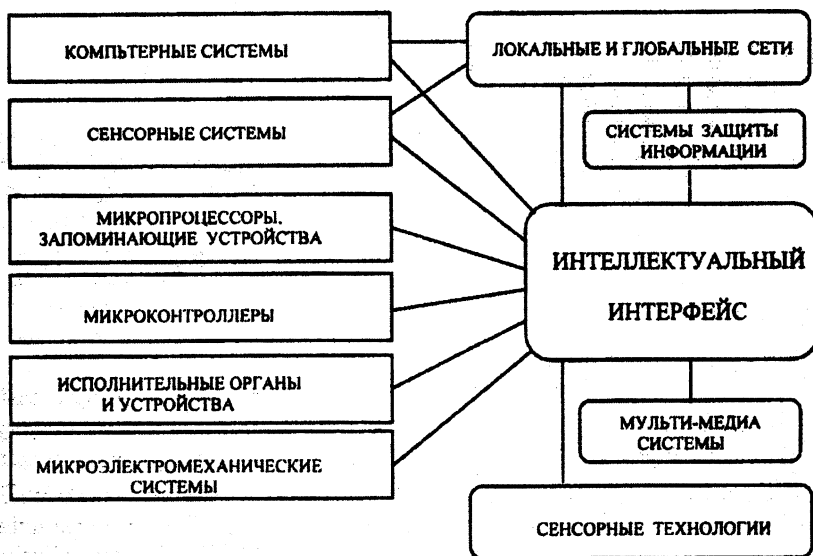


Рис. 1. Интеллектуализация технических систем и технологических процессов.

Развитие информатики, когнитивной науки, интегральной электроники и сенсорики, искусственного интеллекта должно быть неразрывно связано с исследованиями информационных процессов человека и других живых объектов. Общеизвестно, что интеллектуальные способности человека во многом зависят от способности воспринимать и обрабатывать информацию. Сегодня появилась возможность не только использовать методы информатики для анализа интеллекта человека, но и, наоборот, узнать, какие концепции организации компьютерных систем и обработки знаний помогут наиболее естественно описать как работу мозга, так и информатику человека в целом.

Развитие компьютеров оказалось столь стремительным, что первый человеко-эквивалентный компьютер (ЧЭК) был создан фирмой «Intel» (США) в 1996 году и используется пока только для очень сложных расчетов виртуальных ядерных взрывов, генома человека и стоит очень дорого (55 млн. долларов). Ведется интенсивная работа по созданию суперкомпьютера до 10 терафлоп (1 терафлоп – тысяча миллиардов операций в секунду). Мощность и память персональных компьютеров растут в геометрической прогрессии – последние два года удваиваются, и, вероятно к 2030–2050 году будет создан суперкомпьютер, мощность которого превзойдет мощность мозгов всего человечества.

Уже сейчас амбициозный план фирмы IBM (США) предусматривает разработку нового компьютера семейства RS/6000, способного выполнять свыше одного квадриллиона операций в секунду, что в 1000 раз превышает производительность машины, победившей в 1997 году чемпиона мира по шахматам. Представители IBM сообщают, что компьютер будет работать на основе более миллиона микропроцессоров, каждый из которых способен совершать миллиард операций в секунду. Ученые, занимающиеся генной инженерией, уже весьма заинтересованно поглядывают на эти разработки, мысленно развивая клонирование и генетически модифицированные продукты питания.

Известно, что человеческий мозг имеет 10+100 миллиардов нейронов, которые легко моделируются на компьютере. Когда мы сможем смоделировать все нейроны и нейронные сети и научимся переписывать их связи в кристаллы-чипы, человек как личность перейдет в электронный вид существования, а это значит все свое время будет расходовать не только на развитие науки, технологии, образования, но и на создание суперкомпьютеров на основе ДНК. Молекулярные ДНК-чипы размером не более бактерии (0,5–5,0 мкм) приведут к созданию ДНК-процессоров с генетическим кодированием информации и с ячейками суперпамяти на генетических молекулах. Объем информации, который можно будет вводить в нее, огромен и сравним с генетической памятью. Например, один кубический миллиметр такой суперпамяти способен заменить винчестеры всех существующих в мире компьютеров, а это основа для создания генокомпьютеров новых поколений, реально приближенных к мозговой памяти и мышлению. И такие процессоры можно будет встраивать не только в технику, ткани одежды, но и в тело человека и животного.

Сенсоризация производственной деятельности, то есть замена органов чувств человека на микросенсоры и микроэлектромеханические системы (МЭМС) должна рассматриваться в качестве следующей промышленной революции передовых стран вслед за первыми двумя – машинно-энергетической и информационно-компьютерной. Многообещающей тенденцией развития сенсорики в настоящее время представляется разработка интеллектуальных микроэлектромеханических сенсорных систем на основе функциональной интеграции сенсорных, процессорных и исполнительных элементов в микроэлектронном исполнении (рис. 2).

Органы чувств человека способны воспринимать и преобразовывать сигналы нескольких модальностей: электромагнитные поля в видимой (зрение) и инфра-

красной (температурная чувствительность) областях спектра; механические возмущения – звуковые волны (слух), силу тяжести (гравитационная и вестибулярная чувствительность), механическое давление (осязание); химическое восприятие-обнаружение веществ в жидкой фазе (вкус) и газовой фазе (обоняние).

Микро- и нанoeлектроника уже сегодня способны создавать новые органы чувств человека и машины, например, регистрировать магнитные поля как в видимом диапазоне, так и в области ультрафиолетового, рентгеновского или радиационного излучений. Успешно создается «внутреннее биохимическое, электронное и оптическое зрение» для обнаружения, регистрации и контроля ключевых метаболитов, определяющих согласованность биохимических и электроакустических механизмов в норме и места их нарушения при различных патологиях. Будут применены современные знания о принципах организации и функционирования сенсорных систем для создания новых сенсорных технологий.

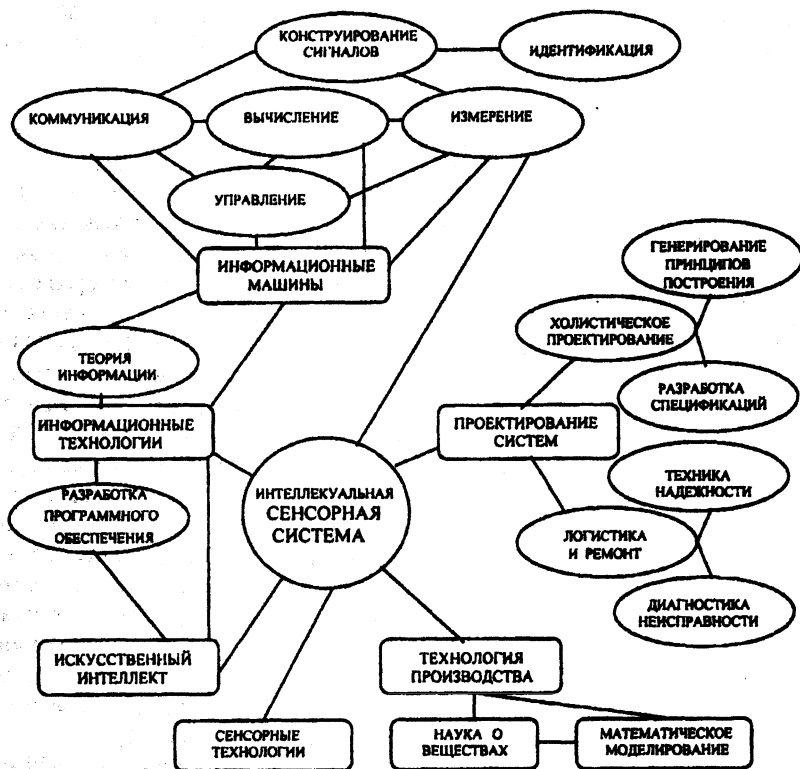


Рис. 2. Инженерия знаний при проектировании интеллектуальных сенсоров.

Сенсорные системы живых организмов удовлетворяют самым строгим информационным требованиям: с высокой точностью различают воздействия различных модальностей, воспринимают силы воздействий в широких диапазонах, обладают предельно высокой чувствительностью, каждую только допускают законы физики, химии, информатики, и при этом способны адаптировать свою чувствительность. Специализированные рецепторные клетки непосредственно либо через промежуточные нейроны кодируют, включая и генетически, и передают сенсорную информацию в мозг электрическим (электроакустическим) способом нервных импульсов. После обработки мозгом сенсорной информации немедленно формируются выходные команды или производится «запись» в память мозга для будущего использования.

Техническая реализация сенсорных систем основана на доведении степени интеграции до уровня функциональной, что в принципе позволяет реализовать такие интеллектуальные свойства МЭМС, как самоконтроль и адаптация текущего состояния системы к состоянию ее внешней и внутренней среды (рис. 3).

Обычно работа МЭМС описывается тройкой изолированных преобразований:

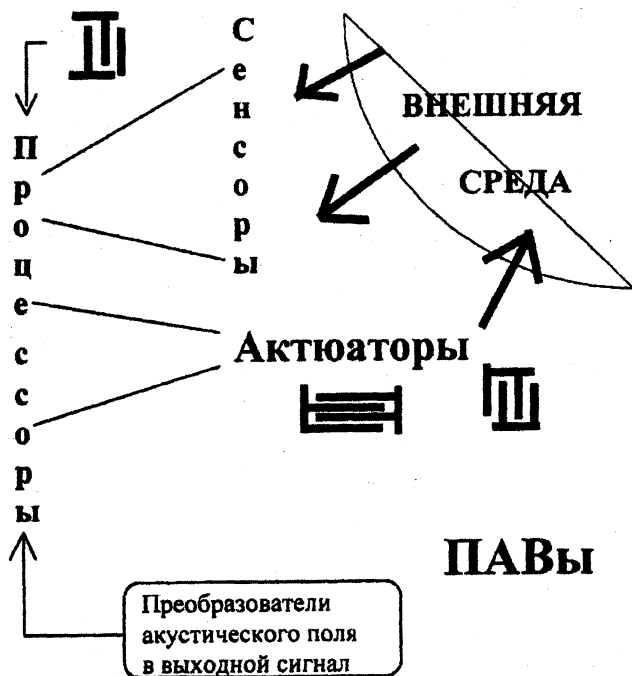


Рис. 3. Интеллектуальная МЭМС на поверхностных акустических волнах.

- 1) сенсорное преобразование внешних и внутренних характеристик системы в электрические сигналы;
- 2) микропроцессорную переработку сигналов в управления;
- 3) исполнение действий под заданным управлением.

Системный подход к интеллектуализации МЭМС основывается на введении многоуровневой иерархии переменных, в которой переменные верхнего уровня представляют свойства нижнего уровня в интегральной форме, достаточной для принятия обоснованного решения.

Наиболее информативными интегральными характеристиками МЭМС являются межканальные кросс-корреляции вида $F_{\alpha 1 \dots \alpha j}(\omega_1, \dots, \omega_{j-1}, t)$ (где α – номера каналов), в которых интегрируется информация о температуре, влажности, деформации, механических напряжениях, крутящем моменте, ускорении, давлении, электрическом и магнитном полях, массовом нагружении поверхности, адсорбции и абсорбции химических веществ и т.п.

Коммерческие интеллектуальные сенсорные системы и приборы уже появились на рынке, например, электронный нос для распознавания запахов или электронный язык для распознавания вкуса. Через некоторое время, однажды утром электронный нос приготовит Вам, а электронный язык обеспечит Вашей чашечке кофе чудесный вкус. Интеллектуальные приборы и машины отбракуют качество сырьевых материалов, осуществят мониторинг за процессом производства, определяют употребление наркотиков, алкоголя, никотина, определяют состояние здоровья человека и животного, осуществят индивидуальный и глобальный мониторинг безопасности жизнедеятельности.

В настоящее время любая конкретная технологическая продукция примитивнее своего творца – человека. Но в масштабе времени естественной эволюции и усилий мирового сообщества прогресс интеллектуальных технологий идет быстрыми темпами (рис. 4), и определяющими были разрешающая способность технологии и степени прогресса, где:

I_0 – «проектная норма», мера разрешающей способности;

G – ежегодная мировая мощность технологии, выраженная в количестве производимых изделий с минимальными для своего времени проектными нормами;

F – типичная (максимальная) производительность компьютерных машин (операции в секунду);

M – соответствующая емкость машинной памяти.

В известном смысле технологический опыт накапливается не только в традициях общества, но и в структуре мозга создателя, а следовательно, в генетическом аппарате и анатомии человека. Разумеется, генетически накапливается не опыт конкретных технологий, а универсальный опыт решения сложных задач во все время обновляющихся условий. Таким образом, формируется интеллектуальный аппарат, древо развития интеллектуальных систем для целей близкого и далекого будущего развития общества.

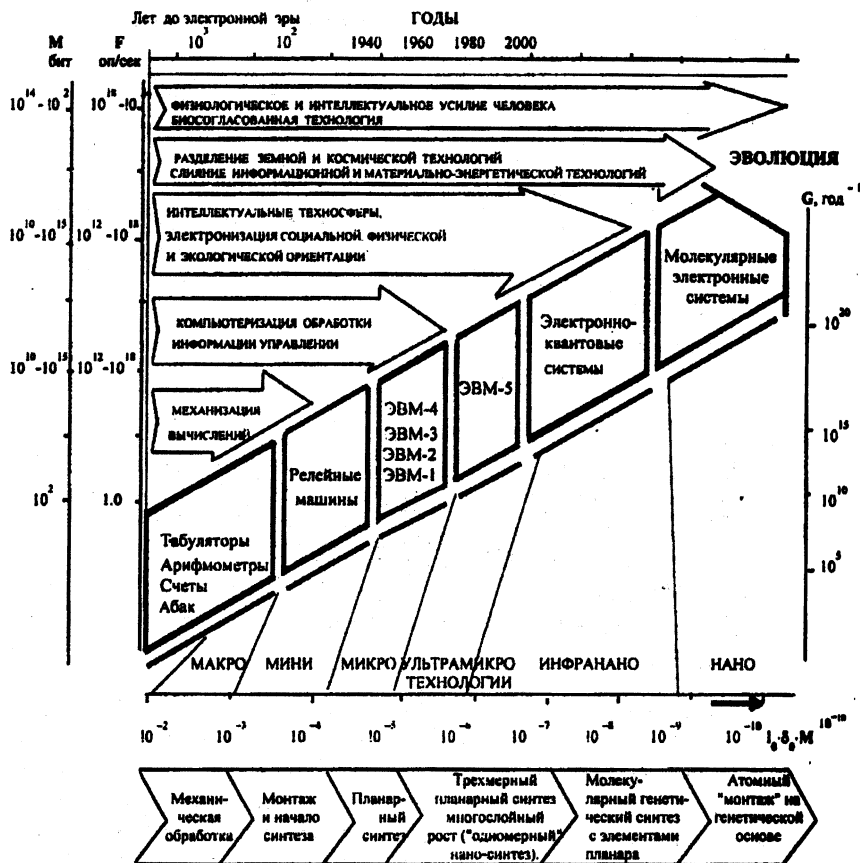


Рис. 4. Эволюция интеллектуальных технологий.

Развитие интеллектуальных систем с генетическим кодированием информации откроет большие перспективы для человечества:

- будут решены вопросы омоложения и продления жизни человека;
- будут решены вопросы волновых принципов лечения практически всех заболеваний;
- будут созданы невиданные гибриды растений и животных, а также новые поколения инструментальных и технических средств с искусственным интеллектом;
- будут созданы суперкомпьютеры, близкие человеческому мозгу, что обеспечит выход на супертехнологии;

– будут созданы условия извлечения из подсознания человека информации, что позволит человеку войти в новые общественно-экономические, социальные и биологические измерения.

Поэтому формирование инженера, технолога, ученого, будущего руководителя следует начинать сегодня [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Образовательный стандарт РД РБ 02100.5 XXX-99 высшего образования по специальности «Интеллектуальные приборы, машины, технологии и производства».
2. Образовательный стандарт РД РБ 02100.5 XXX-99 по специальности «Интегральные сенсорные системы».

УДК 621.37.39:534

В. М. Колешко, В. В. Баркалин, Е. В. Польшкова

УПРАВЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМАХ

*Белорусская государственная политехническая академия
Беларусь, Минск*

Наиболее многообещающей тенденцией в развитии сенсорики в настоящее время представляется разработка интеллектуальных микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе функциональной интеграции сенсорных, процессорных и исполнительных акустоэлектронных элементов в микроэлектронном исполнении.

Переход к микро- и наноразмерным структурам приводит к расширению списка существенных физико-химических процессов, которые необходимо учитывать при определении управлений и можно использовать при разработке новых типов МЭМС. Интегрирующим уровнем МЭМС может являться акустическое поле поверхностных акустических волн (ПАВ).

Вследствие микронных размеров элементов МЭМС обсуждаются ПАВ в частотном диапазоне 100 МГц – 1 ГГц, что соответствует длинам ПАВ 3–30 мкм и площади ПАВ-структур 0,1–10 мм², попадающей в размерную область технологии микроэлектроники.

Задача управления полем ПАВ сложна и должна ставиться уже на этапе проектирования МЭМС на ПАВ. В табл. 1 сведены основные управляющие параметры ПАВ-систем, влияние которых определяет характеристики качества последних. Проектирование МЭМС на ПАВ включает этап компьютерного моделирования, который лучше всего интегрировать в САПР МЭМС на ПАВ.

Таблица 1.

Параметры, учитываемые при проектировании МЭМС на ПАВ

Управляющий параметр	Формальный параметр ПАВ
Материалы подложки и слоев	Химический и фазовый состав материала звукопровода, материальные константы C_{MN} C_{MNK} , ϵ_{IN} , ϵ_{INK} , ϵ_M , ϵ_{IN} , f_{MN} , плотность ρ
Ориентация подложки и слоев	Углы Эйлера $\lambda^{(s)}$, $\mu^{(s)}$, $\theta^{(s)}$, $\lambda^{(n)}$, $\mu^{(n)}$, $\theta^{(n)}$...
Толщины слоев	Нормированные толщины слоев kN_1 , kN_2 , ..., $k=2\pi/\lambda$
Внутренние механические напряжения в слоях	σ^0
Неоднородность звукопровода ПАВ	Коэффициенты отражения и преобразования ПАВ в объемные волны
Металлизация поверхности звукопровода	Коэффициент электромеханической связи
Температура	Температурные зависимости материальных констант, толщин слоев, температурные напряжения в слоях. Температурный коэффициент фазовой скорости ПАВ TCV_R
Деформации звукопровода	Коэффициент деформационной чувствительности фазовой скорости ПАВ DCV_R
Вращения в звукопроводе	Коэффициент чувствительности фазовой скорости ПАВ к вращениям в звукопроводе RCV_R
Внешнее электрическое поле	Коэффициент чувствительности фазовой скорости ПАВ к электрическому полю ECV_R
Влияние адсорбции из газового окружения	Коэффициенты чувствительности фазовой скорости ПАВ к изменению концентраций CCV_R
Затухание ПАВ	Коэффициент затухания ПАВ
Усиление ПАВ электронным ветром	Коэффициент увлечения ПАВ
Поглощение ПАВ	Коэффициент поглощения
Акустическое и электромагнитное излучение ПАВ во внешнюю среду	Коэффициент потерь на излучение
Генерация гармоник ПАВ и другие нелинейные эффекты взаимодействия	Амплитудные коэффициенты нелинейных взаимодействий
Преобразователи для возбуждения и приема ПАВ	Частотные характеристики преобразователей
Электрические схемы согласования ПАВ-структур с внешними цепями	Параметры элементов схем согласования
Напряжение питания ПАВ – структуры	Режимная неустойчивость ПАВ-генераторов
Шумы	Уровень шумов, отношение сигнал/шум
Характеристики микропроцессорной подсистемы	Электрические и информационные характеристики сигнала ПАВ-структур

При использовании ПАВ-структур в качестве сенсорных элементов МЭМС основное значение имеет правильный выбор материалов и параметров звукопровода с точки зрения характеристик чувствительности ПАВ к внешним воздействиям. Воздействия, затрагивающие весь объем звукопровода ПАВ, будем относить к *объемным управлениям*, а воздействия, локализованные у поверхности звукопровода – к *поверхностным управлениям*.

Одной из важнейших характеристик поля ПАВ является ее фазовая скорость V_R , играющая ключевую роль в формировании частотных характеристик ПАВ-структур. V_R определяется как неявная функция квазистатических градиентов смещений, электрического поля, температуры, толщин слоев, ориентации слоев и подложки, внутренних механических напряжений в слоях:

$$V_R = V_R(\hat{U}_{k,l}^{(Q)}, \hat{E}_k^{(Q)}, T, \sigma_{ii}^{(Q)}, H^{(Q)}, \lambda^{(Q)}, \mu^{(Q)}, \theta^{(Q)}). \quad (1)$$

Эти же величины определяют фактор подложки в чувствительности V_R к массовому нагружению поверхности:

$$f_M = 2\pi \frac{A+B+C}{\rho V_R}, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала подложки, A, B, C – параметры звукопровода ПАВ, характеризующие распределение энергии ПАВ по глубине подложки. Величины V_R и f_M составляют основу алгоритмов управления и оптимизации МЭМС на ПАВ и определяются в результате численного моделирования.

Для объемных воздействий V_R может рассматриваться как термодинамическая функция состояния приповерхностного слоя материала звукопровода толщиной в несколько длин ПАВ. Используя алгебраические свойства V_R как функции эффективных модулей упругости, через нормированные частные производные (НЧП) этой функции по модулям упругости можно определить ее полный дифференциал.

Наибольшими значениями НЧП обладают кристаллы со степенью ионности, близкой к критической ($f_i^{\text{кр}}=0,785$). К ним относятся галогениды меди CuI, CuBr, CuCl, соединения ZnTe, β -ZnSe, CdTe, CdS, CdSe.

Для ковалентных кристаллов с решеткой типа алмаза ($f_i=0$) НЧП определяются степенью металличности связей, которую можно характеризовать главным квантовым числом n валентной оболочки атомов, образующих кристалл. С ростом n коэффициент анизотропии растет, поэтому растут и величины НЧП в ряду (C, -SiC, Si, Ge, α -Sn).

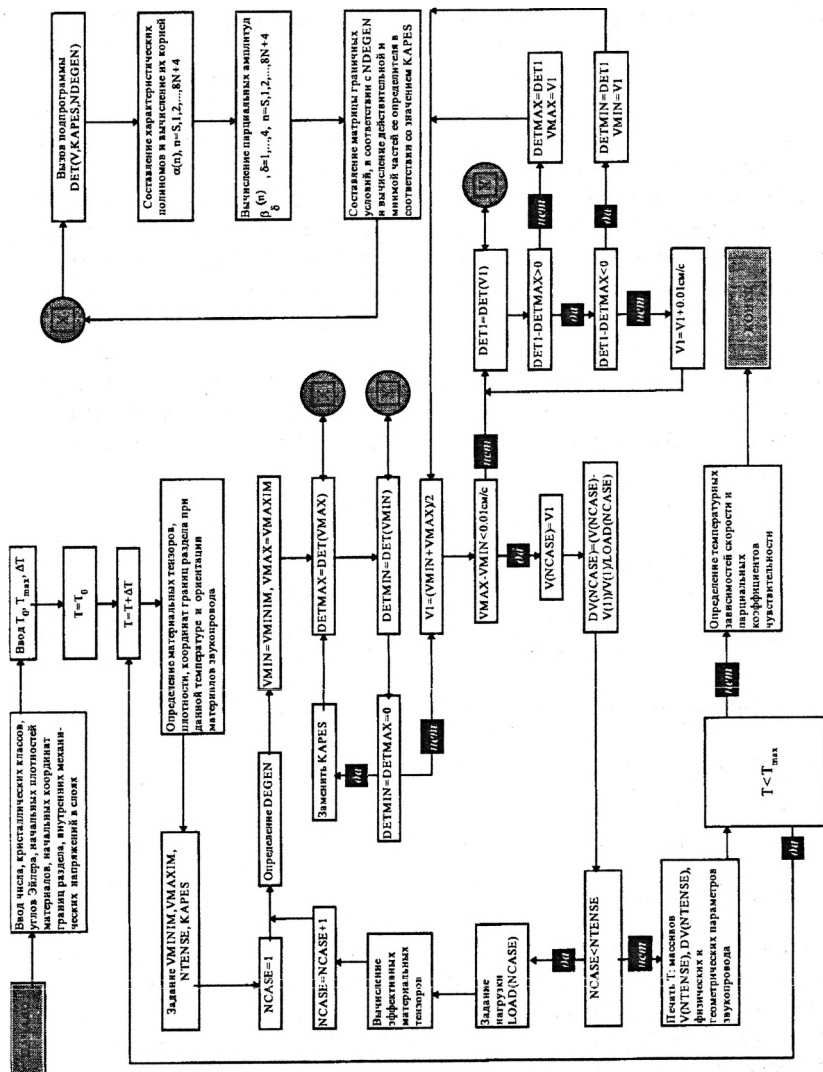


Рис. 1. Алгоритм расчета фазовой скорости ПАВ, парциальных коэффициентов чувствительности фазовой скорости ПАВ к объемным воздействиям и фактора подложки в чувствительности резонансной ПАВ-структуры к поверхностному массовому нагружению.

Для исследования влияния кристаллографической ориентации звукопровода на характеристики ПАВ необходимо использовать алгоритм рис. 1. Полученные результаты свидетельствуют о том, что DCV обладают собственными экстремумами, не сводящимися к экстремумам V_R и поэтому информационно более емки.

В табл. 2 представлены данные об ориентационной зависимости TCV для монокристаллического кремния в нескольких температурных диапазонах.

Полученные данные в совокупности свидетельствуют об эффективности управления характеристиками ПАВ посредством выбора ориентации звукопровода, вида и формы налагаемого внешнего воздействия.

Многослойные ПАВ-структуры характеризуются наличием нескольких мод ПАВ и дисперсией, определяемой зависимостью V_R от нормированных толщин слоев, влияние слоя на характеристики ПАВ зависит от частотного диапазона ПАВ-структуры, толщина слоя является эффективным параметром управления характеристиками ПАВ в узком диапазоне изменений.

Температура влияет на характеристики ПАВ как вследствие температурной зависимости материальных констант и геометрических параметров ПАВ-структур, так и вследствие температурных напряжений в слоях. В целом температура оказывает на параметры ПАВ влияние, достаточное для его использования в ПАВ-преобразователях температуры.

Таблица 2

Коэффициент температурной чувствительности фазовой скорости ПАВ TVC (K^{-1}) в монокристаллическом кремнии

Ориентация звукопровода	Температурный диапазон, К			
	293–373	373–473	473–573	573–673
{001}<100>	$-2,956 \cdot 10^{-5}$	$-2,775 \cdot 10^{-5}$	$-3,195 \cdot 10^{-5}$	$-3,256 \cdot 10^{-5}$
{001}<110>	$-3,049 \cdot 10^{-5}$	$-2,607 \cdot 10^{-5}$	$-3,152 \cdot 10^{-5}$	$-3,280 \cdot 10^{-5}$
{111}<011>	$-3,015 \cdot 10^{-5}$	$-3,136 \cdot 10^{-5}$	$-2,919 \cdot 10^{-5}$	$-2,977 \cdot 10^{-5}$
{111}<112>	$-3,031 \cdot 10^{-5}$	$-2,884 \cdot 10^{-5}$	$-3,030 \cdot 10^{-5}$	$-3,124 \cdot 10^{-5}$
{110}<110>	$-2,995 \cdot 10^{-5}$	$-3,133 \cdot 10^{-5}$	$-2,922 \cdot 10^{-5}$	$-2,922 \cdot 10^{-5}$

Влияние внутренних механических напряжений в слоях ПАВ-структуры исследовалось для структуры $\text{Si/SiO}_2/\text{ZnO}$ как наиболее перспективной для использования в интегральных многофункциональных сенсорных элементах с микропроцессорной обработкой информации. Указанное влияние можно использовать для контроля внутренней среды звукопровода ПАВ.

В большинстве случаев влияние поверхностных воздействий сводится к изменению геометрических, электрических и упругих характеристик поверхностного

слоя ПАВ-структуры, приводящих к локальному изменению V_R . Например, в случае массового нагружения фактор подложки (3) в изменении резонансной частоты f автогенератора на ПАВ определяется соотношением

$$\Delta f / f = -f \cdot f_M \cdot \Delta m \quad (4),$$

где m – поверхностная плотность слоя.

При прочих равных условиях максимальной чувствительностью к массовому нагружению поверхности обладают ПАВ в звукопроводах из монокристаллического кварца Y,Z-, X,Z-, X,Y-ориентаций. Наименее чувствительны ПАВ в звукопроводе из сапфира X,Y-ориентации.

Знание f_M позволяет просто оценивать изменение чувствительности VR к массовому нагружению поверхности при замене материала и ориентации подложки. В табл. 3 представлены данные по чувствительности ПАВ-преобразователей концентраций NO_2 , NH_3 , CO_2 , CO , H_2O , CH_4 с чувствительным слоем из фталоцианина толщиной 3 мкм и рабочей частотой ПАВ 78,95 МГц, полученные на основе данных по чувствительности аналогичного преобразователя из кварца ST,X-ориентации.

Таблица 3.

Чувствительность ПАВ-преобразователей концентрации газов в воздухе $\Delta f / \Delta C$ (Гц/млн.часть) на частоте ПАВ 78,95 МГц при толщине чувствительного слоя фталоцианана 3 мкм

Материал подложки	Ориентация	ΔC					
		100 млн. частей NO_2	200 млн. частей NH_3	3500 млн. частей CO_2	1200 млн. частей CO	8000 млн. частей H_2O	400 млн. частей CH_4
Кварц	ST,X	-4.900	0.800	-0.01	0.03	0.02	0.200
	Z,X	-2.97	0.49	-0.006	0.018	0.012	0.12
	Y,Z	-8.15	1.33	-0.017	0.05	0.033	0.33
Сапфир	Z,X	-1.65	0.27	-0.003	0.01	0.007	0.07
	X,Z	-1.981	0.323	-0.004	0.012	0.008	0.081
	Y,X	-1.378	0.225	-0.003	0.008	0.006	0.056
Ниобат лития	Z,X	-3.235	0.528	-0.007	0.020	0.013	0.132
	Y,X	-3.467	0.566	-0.007	0.021	0.014	0.142
	X,Y	-3.213	0.525	-0.007	0.020	0.013	0.131
Кремний	X,Z	-6.048	0.988	-0.012	0.037	0.025	0.247
SiO_2 (пл.)		-8.451	1.380	-0.017	0.052	0.034	0.345
Германий	X,Z	-4.599	0.751	-0.009	0.028	0.019	0.188
Оксид цинка	Y,Z	-2.022	0.330	-0.004	0.012	0.008	0.083
	Z,X	-2.567	0.419	-0.005	0.016	0.010	0.105

ЛИТЕРАТУРА

1. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) – авторское свидетельство СССР N 1634063. 2. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) – авторское свидетельство СССР N 1634111. 3. Преобразователь давления (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) – авторское свидетельство СССР N 1572187. 4. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) – авторское свидетельство СССР N 1378721. 5. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) – авторское свидетельство СССР N 1426400. 6. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) – авторское свидетельство СССР N 1410642. 7. Устройство на поверхностных акустических волнах (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) – авторское свидетельство СССР N 1436831.

УДК 621.37.39:534

В. М. Колешко, В. В. Баркалин, Е. В. Полинкова

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

*Белорусская государственная политехническая академия
Беларусь, Минск*

Созданные к настоящему времени преобразователи информации на поверхностных акустических волнах (ПАВ) можно определить как в основном однофункциональные (по принципу контроля внешнего воздействия) и как дискретные (по структуре размещения их акустических элементов). Эти преобразователи предназначены для контроля какой-либо одной физической или химической величины, и в их состав входит одна, иногда две включенные в дифференциальную схему микрорезисторные ПАВ-структуры.

Основной задачей, решаемой разработчиками однофункциональных дискретных преобразователей информации на ПАВ, является удовлетворение следующим двум требованиям: *обеспечение высокой чувствительности выходного сигнала к контролируемому воздействию и уменьшение чувствительности выходного сигнала к неконтролируемым.*

Вследствие взаимозависимости коэффициентов чувствительности характеристик ПАВ к воздействиям разной физической природы и многопараметрической

зависимости этих коэффициентов от внешних воздействий указанные два требования в общей форме оказываются противоречивыми, а ПАВ-структуры по самой своей природе — многофункциональными.

В этой связи в предпочтительным выглядит кибернетический подход, подразумевающий разработку интегральных многофункциональных сенсорных систем одновременного контроля нескольких параметров внешней среды и звукопровода ПАВ. Преобразование внешних воздействии в электрический сигнал осуществляется по нескольким каналам путем организации многоканального выходного сигнала, из которого выделяются данные о параметрах воздействия. Использование нескольких каналов позволяет снять присущие однофункциональным преобразователям ограничения на точность и стабильность и добиться радикального улучшения характеристик преобразователей информации на ПАВ без ужесточения технологических требований к их производству.

В настоящее время достигнута степень интеграции сенсорных и процессорных элементов вплоть до гибридных одноплатных схем и микросборок, в которых однофункциональные чувствительные элементы на ПАВ и микросхемы обработки размещаются в одном корпусе. В то же время известны разработки однокристалльных сенсорных систем, в которых чувствительный элемент отличного от ПАВ типа и схема обработки интегрированы на одном кристалле. Такая степень интеграции становится совершенно необходимой при использовании ПАВ-структур в качестве сенсорных элементов интеллектуальных микроэлектромеханических систем.

Существенным этапом разработки таких систем является создание элементной базы многофункциональных сенсорных систем на ПАВ. При этом необходимо сенсорные системы на ПАВ рассматривать как логико-динамические системы, структурно совмещающие динамическую и информационную компоненты процесса контроля внешних воздействий.

Анализ предложенных конструкций сенсорных систем на ПАВ показал, что наиболее перспективной элементной базой интеллектуальных МЭМС на ПАВ являются автогенераторы на ПАВ, позволяющие интегрировать многофункциональные чувствительные элементы на ПАВ и быстродействующие логические элементы в микроэлектронном исполнении для получения высокочастотного выходного сигнала. ПАВ-структура при этом включается в цепь обратной связи широкополосного усилителя, образуя генератор, выходная частота которого зависит от величины и характера внешних воздействий. Высокостабильные автогенераторы высокой частоты получаются при использовании быстродействующих логических элементов с эмиттерно-связанной логикой. Базовые э.с.л.-элементы ИЛИ-НЕ имеют парафазный выходной сигнал и отличаются высокой стабильностью динамических параметров при изменении рабочей температуры и напряжения питания и высокой помехоустойчивостью.

На рис. 1 представлены базовые схемы ПАВ-генераторов на основе указанных логических элементов, в которых в качестве чувствительного элемента использо-

ваны двухвходовые ПАВ-резонаторы, содержащие идентичные входной 1,2 и выходной 3,4 аподизированные ВПП с периодом 32 мкм и распределенные отражатели из 600 канавок глубиной 0,4 мкм в каждом. Указанные резонаторы имели эффективную добротность в 50-омном тракте $(1,4-1,8) \times 10^4$ и вносимые потери 5,5-7,5 дБ. Особенностью указанных схем является отсутствие реактивных согласующих и корректирующих цепей, что позволило повысить стабильность автогенераторов и реализовать их полностью интегральную конструкцию.

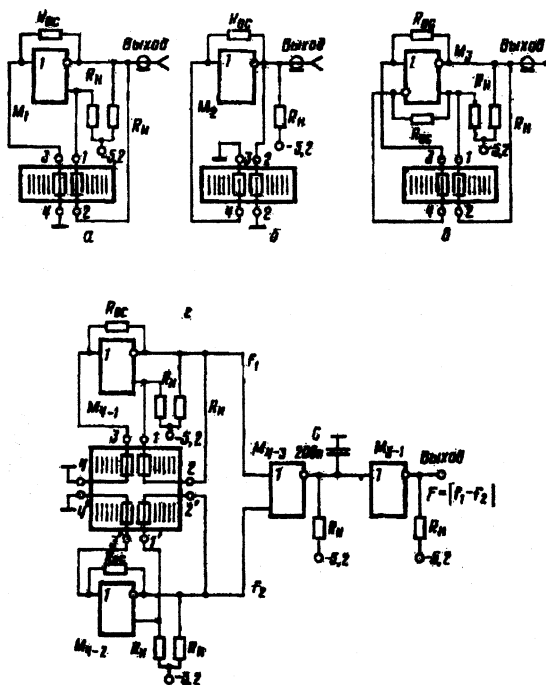


Рис.1. Принципиальные схемы ПАВ-генераторов (а-в) и дифференциальная автогенераторная схема (г). М1, М4, М5 – К500ЛМ105, М2 – К500ЛМ102, М3 – К500ЛП116.

На этом же рисунке представлена дифференциальная схема на смесителе, выполненном также на э.с.л.-элементе ИЛИ-НЕ, работающем в ключевом режиме. На выходе этого элемента формируются импульсы, модулированные по ширине, с частотой модуляции, определяемой разностной частотой автогенераторов. Разностная частота выделяется с помощью фильтра нижних частот, образованного входными цепями еще одного э.с.л.-элемента, служащего также разрядкой, нагрузочным сопротивлением и конденсатором.

На рис. 2 представлены типичные зависимости вариации частоты ПАВ-генератора от сопротивлений обратной связи и нагрузки. Устойчивая генерация наблюдается в диапазоне сопротивлений обратной связи 1–10 кОм. Наибольшее быстродействие э.с.л.-элементов достигается при сравнительно высокой потребляемой мощности микросхем и низким сопротивлении нагрузки (100–500 Ом).

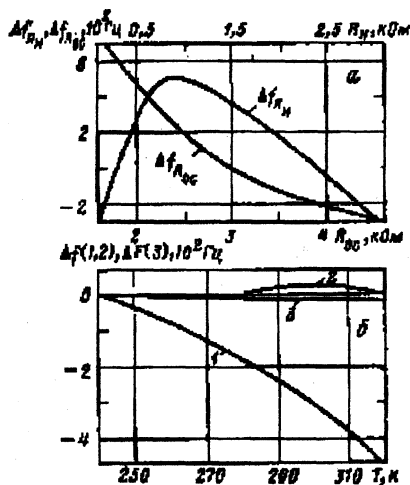


Рис. 2. Зависимость изменения выходной частоты ПАВ-генератора: а – от сопротивлений резистора обратной связи R_{oc} и нагрузочного резистора R_n , б – от температуры окружающей среды ($R_{oc}=3$ кОм (1,3), – и функция температуры (2), $R_n=0,3$ кОм (1, 2, 3)).

На том же рисунке представлены зависимости частоты ПАВ-генератора от температуры при термостабильном резисторе обратной связи. В диапазоне 240–320 К величина температурного коэффициента частоты составляет $6 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$. Можно значительно снизить дрейф параметров автогенератора при использовании зависимости частоты генерации от сопротивления обратной связи. На рис. 2, б представлена зависимость частоты генерации от температуры при использовании в качестве резистора обратной связи терморезистора с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

Представленные схемы автогенераторов на ПАВ характеризуются высокой кратковременной, температурной и режимной стабильностью, малой массой и габаритами. Они использовались при разработке прецизионных сенсоров на ПАВ.

Разработанные сенсорные системы на ПАВ на описанной элементной базе обеспечивают достижение следующих параметров:

Таблица 1

Параметры элементов микроэлектромеханических сенсорных систем на ПАВ

Параметр	Значение
Рабочая частота ПАВ-структур	100-1000 МГц
Выходной сигнал	частотный в диапазоне 1-1000 кГц
Коэффициенты преобразования:	
по температуре	до 8 кГц/К
по давлению	0.1-0.4 кГц/мм.рт.ст. (в диапазоне 30-800 мм.рт. ст.) 3-10 кГц/мм.рт.ст. (в диапазоне 10^2 -10 мм.рт. ст.)
по электрическому полю	до 100 кГц/В
по O ₂	до 1 кГц/об. %
по CO ₂	до 5 кГц/об. %
по H ₂	до 2 кГц/об. %
Кратковременная нестабильность ПАВ-генераторов на основной частоте	10^{-4} - 10^{-9}
Резонансная нестабильность на основной частоте	4×10^{-6} 1/В

При их разработке исследовалась многопараметрическая чувствительность при максимально полном учете всех каналов внешнего воздействия на характеристики ПАВ, что позволило решить проблемы достижения функциональной интеграции сенсорных ПАВ-структур и схем обработки информации в сенсорных системах, а также интеллектуальных алгоритмов такой обработки.

В совокупности полученные автогенераторные устройства образуют элементную базу нового класса прецизионных сенсорных систем, характеризующихся невысокой стоимостью и небольшим энерго- и ресурсопотреблением.

Для интеграции интеллектуальных сенсорных ПАВ-систем на указанной элементной базе разработан «интеллектуальный» сенсорный микрокомпьютер микропроцессорного контроля и управления, снабженный различными органами чувствления и воспринимающий информацию о внешней среде.

Микрокомпьютер позволяет получать информацию об основных физических параметрах внешней среды либо подлежащих контролю внешних объектов и на этой основе производить управление ими. Снабжен специально разработанными контрольно-управляющими микросхемами с чувствительными элементами на ПАВ, позволяющими осуществлять преобразование физических величин (разрежение, давление, сила, ускорение, угловая скорость, температура, влажность, концентрации различных газов и др.) в частотный сигнал и далее в цифровой или аналоговый код. В частности, контрольно-управляющие микросхемы (КУМ) по давлению, разрежению имеют следующие параметры: разрежающая способность $(1-2) \cdot 10^{-3}$ %, повторяемость $(4-5) \cdot 10^{-3}$ %, гистерезис 10^{-2} %, нелинейность $0,1 \pm 0,3$ %, коэффициент преобразования $(100+400)$ Гц/мм рт.ст. По температуре: коэффициент преобразования $2,35 \pm 9,2$ кГц·К⁻¹, диапазон контролируемых температур от минус 60°C до плюс 200°C. Девияция выходного сигнала микросхем для контроля влажности составляет 30 кГц при изменении относительной влажности от 30 до 100 %.

Таблица 2

Технические характеристики микрокомпьютера компьютера

Характеристика	Значение
Разрядность вычислителя	16
Быстродействие вычислителя, оп/с, не менее	$0,3 \cdot 10^5$
Объем оперативной памяти, кбайт	4
Объем памяти программ, кбайт	16
Число дискретных входов	16
Число дискретных выходов с нагрузкой не менее 100 мА	16
Входы аналоговые 0–20 мА/10 разрядов	8
Количество каналов обеспечивается коммутатором с частотой переключения не более 5 мс.	
Число частотных входов -1,0–200 000 Гц	4
Интерфейс с машинистом оператором	
Клавиатура	16 клавиш
Индикатор	8 знаков
Звуковая сигнализация	1 канал
Световая индикация (световоды)	16
Источник питания	+12 В (10,8–15 В)
обеспечивает нормальную работоспособность микрокомпьютера при помехах по цепям питания в соответствии с руководящими материалами для разработки бортовой техники. Питание микрокомпьютера имеет гальваническую развязку с бортовой сетью. Имеет защиту от перенапряжений, перегрузки током, переполосовки. Все входы и выходы микрокомпьютера помехозащищены.	+24 В (21,6–30 В)
Масса микрокомпьютера, кг, не более	3
Число выходов ЦАП по току 0–20 мА/10 разр.	8
Имеется внешний интерфейс для включения в локальную сеть машин (ИРПС) токовая петля.	

Микрокомпьютер может выполнять следующие функции: 1) автоматический контроль состояний агрегатов машин и оборудования; 2) диагностику их неисправностей; 3) выработку команд управления технологическим процессом; 4) формирование цифровых и буквенных сообщений на экране однострочного индикатора; 5) выполнение команд оператора при работе с клавиатурой.

Микрокомпьютер может применяться в различных областях, начиная с авиационной техники и кончая сельскохозяйственным машиностроением. Конструктивное исполнение предусматривает возможность его использования в трудных условиях окружающей среды, пульсаций и помех бортовой сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чувствительный элемент датчика давления на поверхностных акустических волнах и способ его изготовления (Колешко В.М., Мешков Ю.В.) – авторское свидетельство СССР N 1250858. 2. Акустический блок (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Колешко Л.А.) – авторское свидетельство СССР N 1104363. 3. Способ возбуждения поверхностных акустических волн (Колешко В.М., Гулай А.В.) – авторское свидетельство СССР N 720693. 4. Устройство на поверхностных акустических волнах (Колешко В.М., Мешков Ю.В.) – авторское свидетельство СССР N 1349672. 5. Способ подстройки частоты в устройствах на поверхностных акустических волнах (Ко-

лешко В.М., Мешков Ю.В.) – авторское свидетельство СССР N 1634069. 6. Материал пьезоэлектрической пленки (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Лозовский Э.И.) – авторское свидетельство СССР N 1340521. 7. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Рачковская Г.Е., Смолонская А.Г.) – авторское свидетельство СССР N 1591724. 8. Способ калибровки датчиков давления на поверхностных акустических волнах (Колешко В.М., Мешков Ю.В.) – авторское свидетельство СССР N 1371176. 9. Устройство для измерения температуры (Гуляев Ю.В., Колешко В.М., Мешков Ю.В.) – авторское свидетельство СССР N 1138668. 10. Дифференциальный пьезоэлектрический преобразователь на поверхностных акустических волнах (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Лозовский Э.И.) – авторское свидетельство СССР N 1501867. 11. Преобразователь механических величин на поверхностных акустических волнах (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Скопич В.И., Трыков В.Г.) – авторское свидетельство СССР N 1648234. 12. Способ контроля параметров газовой среды и устройство для его осуществления (Колешко В.М., Гулай А.В., Лях В.И.) – авторское свидетельство СССР N 1262317. 13. Устройство для измерения давления (Колешко В.М., Гулай А.В., Лях В.И.) – авторское свидетельство СССР N 1291829. 14. Датчик механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В.) – авторское свидетельство СССР N 1450708.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

УДК 621.75.002:51

Д. В. Кусков

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Беларусь, Минск*

Из большого числа механизмов, используемых в технике, особое внимание уделяется тем, которые имеют наименьшее количество промежуточных звеньев. При этом к их наиболее важным характеристикам следует отнести такие, как простота конструкции, невысокая себестоимость, небольшие габариты и высокие выходные характеристики, возможность автоматизированного управления, использование их на станках с ЧПУ и автоматических линиях, а также возможность достижения высокой точности позиционирования.

В последние годы большое внимание уделяется шаговым двигателям. Они благодаря своим уникальным свойствам за сравнительно небольшое время получили широкое применение практически во всех отраслях промышленности.

Шаговый двигатель является электромеханическим устройством. Вал, или ротор шагового двигателя проворачивается на шаг в дискретных перемещениях, при подаче в соответствующей последовательности на него электрических импульсов. Последовательность прикладываемых импульсов непосредственно связана с направлением вращения вала двигателя. Скорость вращения зависит от подаваемой частоты входных импульсов, длина вращения связана с количеством прикладываемых входных сигналов.

Для того чтобы представить более полную картину принципа работы шагового двигателя, обратимся к основам теории (Basic Stepper Motor Theory).

Прежде всего, следует обратить внимание на то, что у шагового двигателя есть токопроводящих провода, в зависимости от типа двигателя 2, 4, 5, 6, а иногда и более. Также одно из основных его отличий состоит в том, что вращение ротора вручную затруднено, порой складываются впечатление что он неисправен.

На рис.1 приведена упрощенная принципиальная схема шагового двигателя. Вы видите два цикла проводов. Каждый из этих циклов при подаче напряжения создает собственное магнитное поле, которое взаимодействует с ротором.

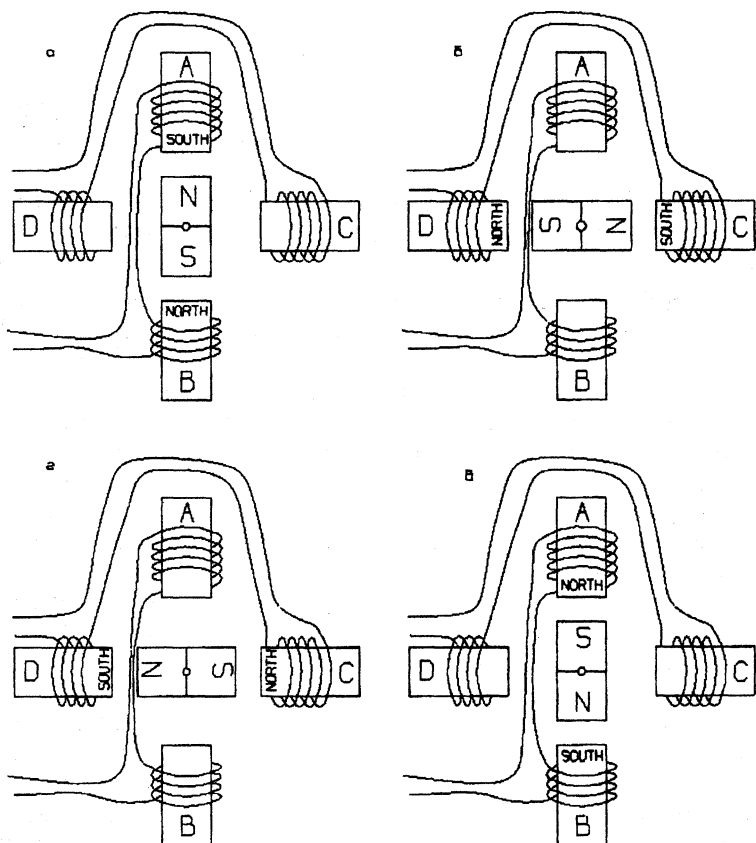


Рис.1 Принципиальная схема шагового двигателя

В рассматриваемом случае ротор представляет собой магнит. При подаче напряжения таким образом, чтобы полюсу А соответствовал South, а В—North, ротор за счет создавшегося взаимодействия магнитных полей провернется и займет положение, как показано на рис.1, а. Положение ротора остается неизменным пока на катушку с обмоткой возбуждения подведено напряжение. Для того чтобы вал двигателя снова провернулся, мы снимаем напряжение с первой катушки и прикладываем его на вторую, так что полюса С—South и D—North (рис.1б). Заметим, при таком расположении полюсов поворот ротора составит 90 градусов, а при последовательном подключении напряжения на каждый цикл, вращение будет, осуществ-

ляется по часовой стрелке. При дальнейшем позиционировании ротора мы используем повторное включение первого цикла, но на это раз в обратном направлении так, чтобы A–North и B–South. Ротор двигателя, в этом случае провернувшись, займет положение, как изображено на рис.1, в.

Таким образом, придерживаясь определенного составленного алгоритма подключения напряжения в циклах, мы можем задать валу шагового двигателя соответствующее количество шагов.

Что ж, на первый взгляд, все предельно ясно, однако сразу возникает вопрос: каким образом ротор двигателя переместится на любой другой по величине шаг? Чтобы разрешить этот вопрос рассмотрим несложный пример: пусть статор двигателя имеет восемь индивидуальных разделов (полюсов), равноудаленных друг от друга на 45 градусов (рис. 2). Ротор будет иметь шесть разделов – 60 градусов между каждым разделом. Согласно принципу Vernier mechanism точное перемещение ротора для каждого шага должно быть 60, 45, или 15 градусов. Как этого можно достичь?

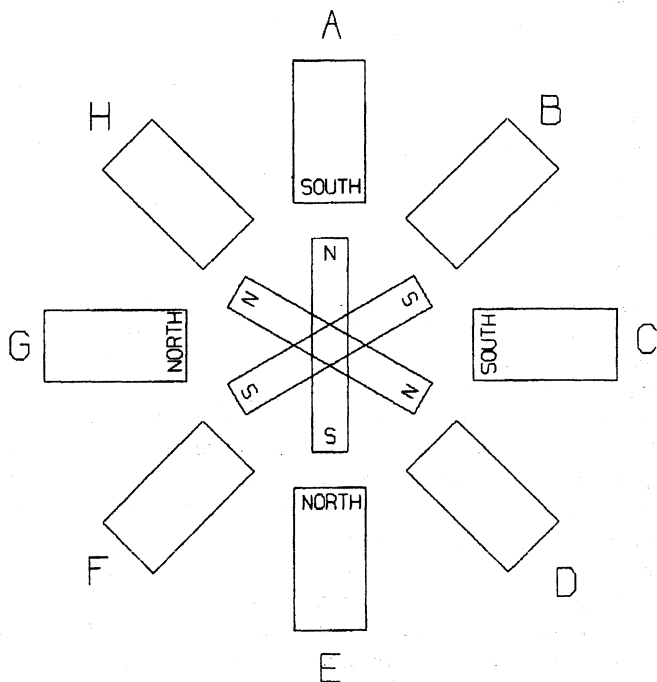


Рис. 2. Схема позиционирования ротора шагового двигателя на 15, 45, 60 градусов.

В нашем примере полюса А, С, Е и G имеют одну общую обмотку возбуждения, равно как и полюса В, D, F и H. Для начала сориентируем нулевое положение ротора, для чего полюсам А, С должен соответствовать South, а Е, G – North. Если мы хотим, чтобы ротор повернулся на 15 градусов, мы должны подать напряжение таким образом, чтобы полюсам В, D соответствовал South, а F, H – North. В случае необходимости вращения ротора против часовой стрелки достаточно изменить полярность.

Конечно, использующиеся на практике шаговые двигатели имеют гораздо большее число разделов (полюсов), что дает возможность ориентировать ротор двигателя с высокой точностью. В зависимости от области применения шаговые двигатели делятся на три основных типа:

- с переменным магнитным сопротивлением (Variable-reluctance);
- с постоянным магнитом (Permanent- magnet);
- смешанный тип двигателя (Hybrid).

Variable Reluctance Motors (VR) – этот тип двигателя, как правило, имеет три обмотки возбуждения, связанные между собой одним общим для всех терминалом. При подаче напряжения на обмотки происходит намагничивание полюсов, которые притягивают к себе рабочие поверхности ротора.

Сравнивая между собой первые два типа двигателей, надо отметить, что у Permanent-magnet характеристики вращающего момента значительно выше. Типичные углы шага для данного двигателя колеблются от 7,5 до 15 градусов (при 48 циклах 24 шага за один оборот).

Двигатель типа Hybrid более дорогой, чем два предыдущих, но эта разновидность шагового двигателя объединяет в себе наилучшие характеристики своих предшественников. Типичные углы двигателя колеблются от 3,6 до 0,3 градусов (100 циклов, 400 шагов за один оборот).

Достоинства шаговых двигателей:

- 1) угол вращения двигателя пропорционален входному импульсу;
- 2) точное позиционирование, а также возможность повторного перемещения;
- 3) надежное реагирование при пуске, остановке и реверсе;
- 4) легкость в управлении.

Но при высоких скоростях управление шаговыми двигателями затруднено.

Благодаря своим возможностям, шаговые двигатели получили широкое применение в станкостроении: используются на станках с ЧПУ и на автоматических линиях, в компьютерных технологиях, а также в различных диагностических установках, в химическом, ядерном, медицинском оборудовании.

Например, компания Epson America Inc. не так давно представила новый планшетный сканер Perfection 636, гарантирующий высокое качество и скорость ввода изображений. Максимальное аппаратное разрешение Perfection 636, равное 600x2400 пикселей на дюйм, достигается благодаря разработанной Epson передовой технологии Micro Step Drive, базирующийся на принципе работы сверхточного шагового двигателя (Epson America Inc: www.eea.epson.com).

В спектроскопии высокой разрешающей силы, в технике лазеров, в физике тонких диэлектрических слоев большое значение имеет многолучевая интерференция. Рассказывать о физической сущности этого явления я не буду и не смогу, хотелось бы только обратить ваше внимание на то, что для исследования многолучевой интерференции используется установка, где особая роль отведена шаговому двигателю, который проворачивает сферическое зеркало с высокой точностью (МГУ им. М.В. Ломоносова: www.msu.ru).

На нефтегазодобывающих промыслах при подземном и капитальном ремонте скважин в случае аварийного прихвата насосно-компрессорных труб (НКТ) возникает необходимость «расхаживании». Метод расхаживания заключается в импульсном приложении дополнительного усилия от гидравлического шагового привода, который обеспечивает движение колонны НКТ вверх-вниз или движение в шаговом режиме (Центр деловой информации «Мировая паутина»: www.@surbis.ru).

Большой интерес к шаговым двигателям проявляют и в атомной промышленности, правда, в основном внимание уделяется такой разновидности, как линейные шаговые двигатели. В основном они применяются преимущественно в тех случаях, когда не желательно или невозможно использовать труд рабочего. Например, при открытии и закрытии дверей атомного реактора.

Привода настолько разнообразные примеры, хотелось бы еще раз подчеркнуть, насколько актуально изучение и выявление новых возможностей шаговых двигателей, а также механизмов, которые могут конкурировать в XXI веке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stepping motors: a guide to modern theory and practice. Acarnley P.P., P.Peregrinus in behalf of the IEE, 1984. 2. Stepping motors and their microprocessor controls. Kenjo, Takashi Oxford University Press, 1984. 3. Course lectures (Basic Stepper Motor Theory) Douglas W. Jones Associate Professor of Computer Science at the University of Iowa (www.uiowa.edu). 4. Course lectures (Stepper Motor Basic). Ian Harris Teaching Associate in the Department of Computing, Imperial College, London (www.doc.ic.ac.uk).

М. Ф. Пашкевич, Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, В. М. Пашкевич

ПОВОДКОВОЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

*Белорусская государственная политехническая академия, Минск
Могилевский государственный технический университет, Могилев
Беларусь*

Эффективность работы любой системы, обеспечивающей управление ходом технологического процесса, зависит от точности обработки деталей на металлорежущих станках и непрерывности получения информации, характеризующей истинное состояние процесса. В качестве такой информации в адаптивных системах управления чаще всего используют величину потребляемой мощности, которая измеряется в электрической сети питания приводного электродвигателя станка и является наиболее доступным источником информации [1]. Получение этой информации не требует сложных измерительных устройств и первичных преобразователей. Однако измеряемая мощность не всегда точно и однозначно характеризует состояние процесса. Дело в том, что КПД станка сильно зависит от скорости резания, а потому приходится иметь дело с искажениями информации о потребляемой мощности, что весьма существенно снижает точность работы системы управления технологическим процессом.

Данное обстоятельство требует разработки других, более совершенных средств, которые бы давали более точную и неискаженную информацию. Если мощность резания измерять непосредственно по силам резания или моменту, которые развивает режущий инструмент, а не через величину потребляемой двигателем электрической мощности, то в этом случае на используемую для адаптивного управления информацию не будет оказывать влияние изменяющееся значение КПД станка.

Ранее [2, 3] мы разработали прогрессивные конструкции поводковых устройств с фрикционными и деформирующими ведущими элементами и провели исследование их технологических возможностей с точки зрения допускаемых режимов резания (глубины резания подачи). Теперь нам удалось расширить их технологические возможности, придав им функции измерителей крутящего момента и мощности, расходуемых непосредственно на процесс резания.

На рис. 1 изображен поводковый измерительный центр, конструкция которого ориентирована на передачу вращения от шпинделя станка к детали и одновременного измерения вращающего момента и мощности.

На рис. 2 изображен разрез А-А поводкового измерительного центра перпендикулярно его продольной оси.

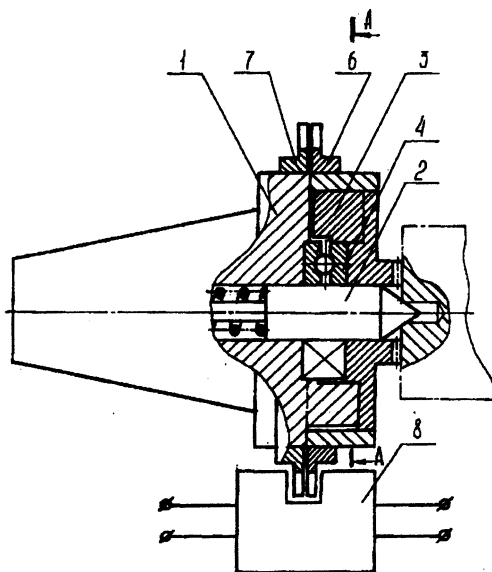


Рис. 1. Чертеж общего вида поводкового измерительного центра.

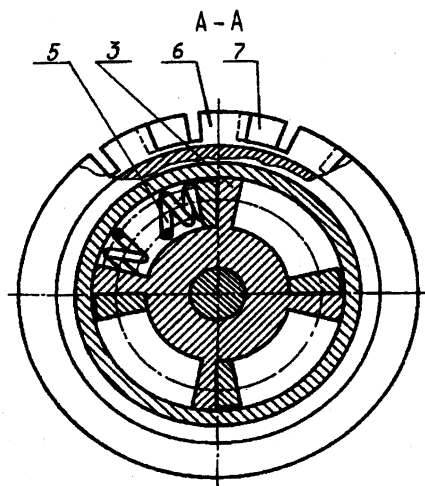


Рис. 2. Поперечный разрез поводкового измерительного центра.

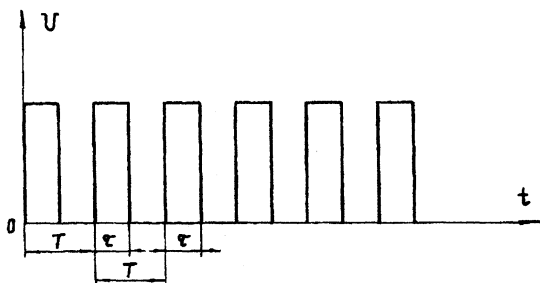


Рис.3. Последовательность импульсов, генерируемая измерительной системой.

На рис. 3 изображена последовательность электрических импульсов, генерируемая измерительной системой.

Поводковый измерительный центр содержит (рис. 1, 2) корпус 1 с коническим хвостовиком, плавающий подпружиненный центр 2, поводковую втулку 3, снабженную поводками в виде зубцов на ее торце и установленную на подшипнике 4. Корпус 1 и поводковая втулка 3 выполнены с выступами (рис.2), между которыми размещены пружины 5. Поводковый измерительный центр снабжен измерительной системой, которая включает диски 6 и 7 и стандартный фотодатчик 8 типа ДФ-1. Диски 6 и 7 могут поворачиваться друг относительно друга при настройке и неподвижно закрепляться на поводковой втулке 3 и корпусе 1 соответственно. В нерабочем состоянии диски 6 и 7 располагают друг относительно друга так, чтобы прорези одного из них были перекрыты выступами другого почти полностью, т.е. чтобы оставались минимальные просветы, характеризующие минимальную ширину исходных импульсов (см. рис. 2).

Поводковый измерительный центр устанавливают в шпиндель станка, а деталь устанавливают центровым гнездом на плавающий центр 2 и поджимают к поводковой втулке 3 так, чтобы зубцы на ее торце получили силовой контакт с деталью и могли передавать требуемый для резания момент. При вращении шпинделя станка вращается поводковый измерительный центр и диски 6 и 7, размещенные в проеме фотодатчика 8. При перемещении дисков в проеме фотодатчика он формирует последовательность прямоугольных импульсов (рис. 3), длительность которых t пропорциональна ширине просветов, образованных дисками 6 и 7.

При вращении шпинделя станка и осуществлении резания деталь стремится повернуть поводковую втулку 3 относительно корпуса 1. Этот поворот происходит при сжатии пружин 5. Чем больше момент резания, тем больше деформируются пружины 5 и тем на больший угол поворачивается поводковая втулка 3 относительно корпуса 1 и, следовательно, диск 6 относительно диска 7, и при увеличении момента увеличиваются просветы, образованные дисками 6 и 7, а поэтому пропорционально моменту возрастает длительность формируемых фотодатчиком импульсов.

Последовательность импульсов может быть зарегистрирована и записана измерительными средствами. Лучше всего для этого использовать измерительные системы, построенные для работы совместно с ПЭВМ, которые позволяют вести обработку зарегистрированных сигналов при помощи той же ПЭВМ по соответствующим программам.

Таким образом, в предлагаемом поводковом измерительном центре формируется последовательность импульсов (рис. 3), которая несет обширную информацию. Поскольку момент M на шпинделе станка пропорционален средней длительности τ импульсов, то можно записать

$$M = K_M \tau,$$

где K_M – тарировочный коэффициент момента.

Частота вращения шпинделя обратно пропорциональна среднему периоду следования импульсов, т.е.

$$\omega = \frac{K_\omega}{T},$$

где K_ω – тарировочный коэффициент частоты.

Но так как мощность равна произведению $N = M\omega$, то

$$N = K_M \tau \frac{K_\omega}{T} = K_N \frac{\tau}{T},$$

где K_N – тарировочный коэффициент мощности.

Из изложенного следует, что рассматриваемый поводковый измерительный центр обеспечивает возможность измерения затрачиваемых на резание момента и мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адаптивное управление технологическими процессами. / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с. 2. Технологическая оснастка. Проектирование поводковых устройств: Учебное пособие. // Пашкевич М.Ф., Беляев Г.Я., Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Пашкевич В.М. – Мн.: БГПА. 1998.-183 с. 3. Методика расчета и технологические возможности фрикционных поводковых устройств // Пашкевич М.Ф., Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Пашкевич В.М. – Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия ФТН. №3. 1998.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПЕРЕДАЧ В СБОРЕ

*Могилевский Государственный технический университет
Могилев, Беларусь*

Контроль кинематической погрешности зубчатых колес производится на заключительной стадии технологического процесса их изготовления. С этой целью на промышленных предприятиях используются приборы типа БВ-5053 [1]. Контроль кинематической точности при этом осуществляется путем сопоставления углов поворота ведомого колеса с углами поворота ведущего, эталонного колеса, согласно формуле:

$$F_R = \left(\varphi_R - \frac{2\pi}{N} kU \right) r, \quad (1)$$

где φ_R – действительный угол поворота ведомого колеса,

N – число угловых отсчетов за один оборот ведущего колеса,

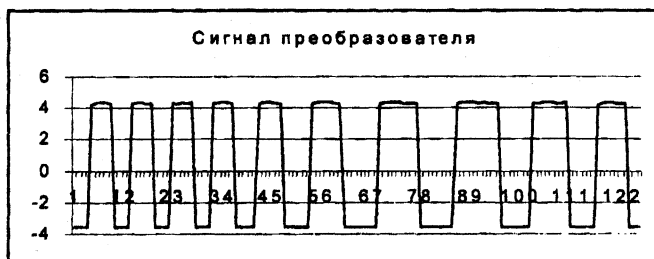
k – числа, равные 0, 1, 2, ... N ,

r – радиус, на котором определяется кинематическая погрешность,

U – передаточное отношение передачи.

К недостаткам этого метода относятся как низкая производительность, так и отсутствие возможности определения кинематической погрешности передачи в сборе. Другим существенным недостатком таких приборов является тот факт, что контроль кинематической погрешности производится в статических условиях, когда ведущее колесо поворачивается на целое число угловых шагов k , после чего определяется действительный угол поворота ведомого колеса φ_k и т.д. до тех пор, пока ведомое колесо не совершит полный поворот. Однако в реальных условиях эксплуатации колеса могут вращаться с высокими окружными скоростями, что может привести как к демпфированию высокочастотных составляющих кинематической погрешности, так и к их усилению за счет динамических процессов пересопряжения элементов зацепления (рис. 1). В этой связи кинематическая точность передачи в статических условиях может существенно отличаться от ее кинематической точности в динамических условиях, а ее оценка с помощью приборов типа БВ не дает возможности оценить это отличие.

Еще одним недостатком упомянутых приборов является наличие эталонного колеса, и, как следствие, невозможность контроля кинематической погрешности передач, имеющих зацепление, отличное от зубчатого [2].



а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Сигналы и спектр кинематической погрешности.

Упомянутых недостатков можно избежать, если оценку кинематической погрешности вести на специальной автоматизированной на базе ПЭВМ установке. При этом на ведомом валу испытуемой передачи устанавливается стандартный преобразователь угловых перемещений типа ВЕ 178А, снабженный оптическим формирователем импульсов с числом отчетов за оборот $N = 2500$. Этим преобразователем при вращении ведомого вала формируется последовательность прямоугольных импульсов равной амплитуды, на различной скважности в силу неравномерности частоты вращения вала, связанной с наличием кинематических погрешностей. Поскольку кинематические погрешности передачи интегрируются за оборот колеса, мерой неравномерности движения вала является отклонение частоты следования импульсов от ее среднего значения, и, таким образом, кинематическая погрешность передачи может быть оценена по формуле

$$F = (t_R - \frac{2\pi}{N\omega} R) \cdot \omega r, \quad (2)$$

где t_R – время, соответствующее началу фронта R -го импульса,
 ω – угловая скорость вращения вала.

Формула (2) с учетом средней длительности импульсов t_{cp} может быть приведена к более удобному для расчетов виду:

$$F = (t_R - R t_{cp}) \cdot \omega r \quad (3)$$

Данная формула позволяет корректно оценить кинематическую погрешность передачи в том случае, если $\omega = \text{const}$. Поэтому на ведущем валу передачи (на валу приводного электродвигателя) полезно установить инерционную массу, обеспечивающую строгую равномерность вращения ведущего вала исследуемой передачи.

Последовательность импульсов, формируемая преобразователем угловых перемещений (рис. 1, а), вводится в ПЭВМ с помощью информационно-измерительной системы, выполненной в виде платы расширения, вставленной в стандартный слот ПЭВМ. При этом информация с преобразователя фиксируется в ASCII-файле в виде таблицы «Напряжение–время». Учитывая тот факт, что напряжение от преобразователя в большей или меньшей степени искажено шумами, производится дискретное преобразование длительностей импульсов по принципу аналого-цифрового преобразования относительно среднего уровня. Затем автоматически рассчитывается кинематическая погрешность передачи согласно формуле (3), с погрешности, не превышающей 4–8 угловых минут (рис. 1, б). Учитывая наличие собственных шумов механизма, связанных с ударами, вибрациями, для повышения достоверности исследований производится упрощенная процедура фильтрации высокочастотных шумовых составляющих сигнала с использованием экспоненциального сглаживания [3]:

$$F'_R = \alpha F_R + (1 - \alpha) F_{R-1} \quad (4)$$

Выделенный низкочастотный тренд кинематической погрешности рассматривается как ее оценка (рис. 1, в). Эксперименты показали, что при использовании преобразователя ВЕ 178А наиболее целесообразно применять показатель фильтрации $\alpha = 0,1$ для отделения высокочастотной области, $\alpha = 0,06$ – для частичного сглаживания области средней частоты спектра и $\alpha = 0,02$ для глубокой фильтрации средне- и высокочастотной областей.

По команде оператора кинематическая погрешность представляется в виде дискретного или сплошного спектра (рис. 1, г). После визуального анализа его структуры оператор может выделить из спектра резонансы (гармонические ряды) путем кепстрального анализа, построить автокорреляционную функцию, а также выполнить в автоматическом режиме ряд других математических процедур, позволяющих получить исчерпывающую информацию о кинематической погрешности.

Использование описанных возможностей информационной системы также позволяет обоснованно подойти и к вопросу управления параметрами технологического процесса для повышения точности изготовления передач. Кинематический анализ механизма, а также частотное представление его кинематической погрешности в форме амплитудного спектра дают возможность привести в соответствие составляющие кинематической погрешности и причины вызывающие их появление. Эту связь можно, по-видимому, определить двумя путями. Первый из них – построение математической модели, связывающей геометрические погрешности элементов механизма с кинематической погрешностью.

Анализируя полученную кинематическую погрешность реальной передачи на основе такой модели, можно определить источники погрешности и принять решение об изменении параметров технологического процесса с целью компенсации этих погрешностей. Второй путь – и он, по-видимому, является наиболее перспективным – построение корреляционных связей между наблюдаемыми погрешностями и их предполагаемыми источниками на основе прямых наблюдений. Это позволяет избежать сложностей, связанных с построением математической модели и ее интерпретацией.

Возможен также комбинированный подход, когда по результатам прямых наблюдений строятся упрощенные математические модели.

Другим важным требованием к исследованию кинематической точности сложного механизма является необходимость его исследования в целом, т.е. с учетом его системности. Дифференцированный, поэлементный контроль механизма не всегда дает адекватную характеристику его состояния. Например, в сложных механизмах, погрешности изготовления отдельных элементов могут взаимно компенсироваться или наоборот, усиливать друг друга, и поэтому состояние элементов только косвенно характеризует состояние конструкции. С другой стороны, состояние конструкции позволяет точно определить состоя-

ние ее элементов как степень соответствия нормальному функционированию всей конструкции в целом.

Так, на рис. 1, г представлен дискретный спектр кинематической погрешности роликовой передачи с эксцентриковым механизмом (передаточное отношение $U = 14$). В спектре четко выражены гармоники с номерами 1, 13, 14, 28. Так, гармоника 1 связана с погрешностями, проявляющимися однократно за один оборот ведомого вала, и поэтому характеризует его состояние. Гармоника 13 равна числу периодов многопериодной дорожки, формирующей вращение ведомого вала.

Гармоника 14 соответствует передаточному отношению и характеризует погрешности ведущего звена механизма. Наличие в спектре механизма двух близких по частоте амплитуд приводит к появлению суммы двух элементарных колебаний, имеющих вид амплитудно-модулированных колебаний (биений), что отчетливо видно из рис. 1, в. Наблюдается также сопутствующее явление расщепления спектра (появление в спектре боковых частот).

Это позволяет сделать вывод о том, что данная конструкция передачи, включающая в себя конструктивно источники колебаний с близкими частотами (частота вращения ведущего вала или число сателлитов и число периодов дорожки), не является оптимальной с точки зрения обеспечения минимального значения наибольшей кинематической погрешности. Это связано с тем, что для биений наибольшая их амплитуда равна арифметической сумме амплитуд составляющих колебаний, в то время как при сложении двух колебаний с различными фазами суммарная амплитуда не намного превышает амплитуду наибольшего слагаемого. Поэтому для данного типа передач верны эмпирические формулы:

$$F_{\text{наиб}} \approx 2(A_{13} + A_{14}), \quad (5)$$

$$F_{\text{наиб}} \approx 2(A_1 + A_{13} + A_{14}). \quad (6)$$

Следовательно данный вид обработки многопериодной дорожки, по-видимому, не может обеспечить повышение кинематической точности передачи, и необходимо изменить параметры технологического процесса (например, уменьшить силы резания), чтобы впоследствии получить более точную передачу.

Амплитуда основных гармонических составляющих имеют высокую информативность вследствие того, что они некоррелированы и поэтому могут рассматриваться как независимые величины. Так, по результатам исследований передачи были получены линейные уравнения регрессии, связывающие амплитуды основных гармоник, которые показывают, что вследствие низких значений коэффициентов корреляции они практически независимы:

$$A_{13} = 100,4 + 0,27 A_1, \quad r = 0,13.$$

$$A_{28} = 12,76 + 0,048 A_1, \quad r = 0,22.$$

Таким образом, спектральный анализ кинематической погрешности позволяет разделять погрешности деталей и оценивать состояние элементов зацепления. На этой основе появляется возможность адаптивного управления параметрами технологического процесса изготовления передач с целью обеспечения наименьших значений их кинематической погрешности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по производственному контролю в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1974. – 676 с. 2. Ионак В.Ф. Приборы кинематического контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с. 3. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. – М.: Сов. радио, 1975. – 400 с.

УДК 621.9

Е. Э. Фельдштейн

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В КОНТРОЛЕ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ

*Политехника Зеленогурска
Зелена Гура, Польша*

Высокая стоимость современного машиностроительного производства способствует широкому использованию безлюдных технологий. Одним из факторов, определяющих дальнейшее развитие таких технологий, является автоматический контроль режущих инструментов с точки зрения возможности их дальнейшей работы. В настоящее время используются следующие виды контроля [1]:

- выключение (наиболее простой и радикальный способ);
- изменение управляющей программы (на станках с ЧПУ);
- коррекционные перемещения инструмента;
- замена работающей вершины инструмента;
- изменение подачи или частоты вращения шпинделя (на станках с адаптивным управлением);
- замена заготовки, непригодной для обработки.

Наиболее эластичным направлением в контроле режущих инструментов является их мониторинг (непрерывный контроль). При этом обеспечивается диагностика состояния инструмента (износ, в том числе катастрофический, предельная стойкость), формирования стружки, возникновения колебаний и т.д. Возмож-

ны такие варианты мониторинга, как сравнение уровня сигнала, воспринимаемого датчиком, с заранее заданным «пороговым» значением, а также раздельное слежение за текущим значением сигнала об износе инструмента и сигналом о катастрофическом износе [1].

Препятствия широкому промышленному использованию мониторинга связаны:

а) с отсутствием датчиков или систем датчиков, удовлетворяющих требованиям контролирующих систем;

б) со сложностью или невозможностью использования непосредственно на производстве примененных в исследованиях датчиков, поскольку они не выдерживают воздействия высоких температур, СОЖ, а также циклических контактов со стружкой;

в) с тем, что большинство исследований выполняется путем кратковременных испытаний, а не в реальных условиях обработки;

г) с отсутствием специализированных интерфейсов между измерительной системой и системой ЧПУ и соответствующего программного обеспечения.

Диагностика возможна как непосредственно в процессе резания, так и после его окончания (табл. 1).

Таблица 1

Классификация способов диагностики состояния
режущего инструмента

Объект контроля	Контролируемый параметр
Режущий инструмент	Ширина площадки износа; вибрации; температура; остаточная радиоактивность; расстояние от вершины режущего инструмента до постоянной базы
Обрабатываемая деталь	Размеры; шероховатость обработанной поверхности; температура
Стружка	Форма; направление схода; температура; радиоактивность
Взаимодействие инструмента со стружкой и деталью	Положение инструмента относительно детали; длительность цикла обработки; силы резания; мощность резания; вибрации; акустическая эмиссия; ЭДС в зоне резания; электрическое сопротивление зоны контакта инструмент–деталь

Все методы диагностики состояния режущего инструмента можно условно разделить на методы прямого и косвенного контроля [1, 2]. К первой группе относятся:

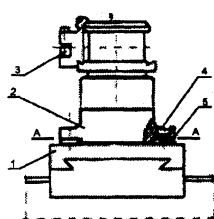
- оптические и оптоэлектрические, основанные на анализе изображения изношенной поверхности инструмента;

- контактные, основанные на применении измерительных зондов, используемых на ГПМ для контроля обработанной детали;
- индуктивные, аналогичные контактному, но использующие электромагнитные преобразователи (наиболее широко применяются для контроля поломок стержневых инструментов);
- радиационные, основанные на анализе интенсивности теплового излучения с изношенной поверхности инструмента.

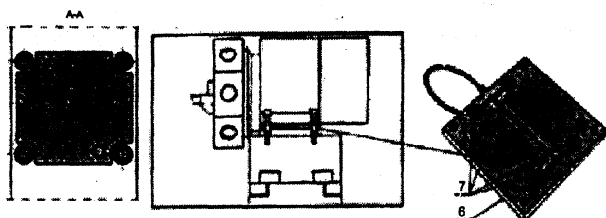
Ко второй группе относятся методы, базирующиеся на измерении:

- сил резания;
- акустической эмиссии;
- колебаний в зоне резания;
- мощности приводов главного движения и движения подачи.

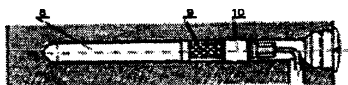
а)



б)



в)



г)

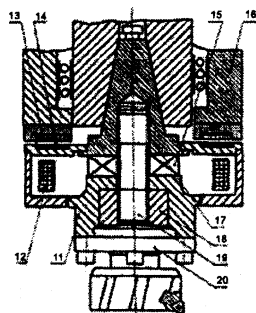


Рис. 1. Схемы измерения сил резания с помощью тензометрических (а) и пьезоэлектрических (б) датчиков, установленных под револьверной головкой; датчиков типа "штифт", установленных внутри и вне корпусных деталей станка (в); шпиндельной оправки (г): 1 – салазки; 2 – основание револьверной головки; 3 – резец; 4 – винт; 5 – разрезное кольцо с наклеенными тензодатчиками; 6 – плита; 7 – пьезоподкладки; 8 – измерительное устройство; 9 – пьезоэлектрический датчик; 10 – разжимная цанга; 11 – корпус; 12 – усилитель тока; 13 – антенна приемная; 14 – передающая; 15 – пьезоэлектрический преобразователь; 16 – шпиндель; 17 – хвостовик оправки; 18 – гайка; 19 – штилька; 20 – переходник для крепления инструмента.

В настоящее время наиболее широко для мониторинга используются способы, относящиеся ко второй группе. Так, согласно данным рабочей группы Международного института промышленных исследований (CIRP), за последние годы контролю акустической эмиссии посвящено 73 работы, сил и мощности резания – 59, колебаний – 14, температур и внешнего облика инструмента – 6. При этом в 83 работах анализировался текущий износ инструмента, в 39 – катастрофический износ и поломки, в 19 – стружкообразование и в 11 – колебания [3].

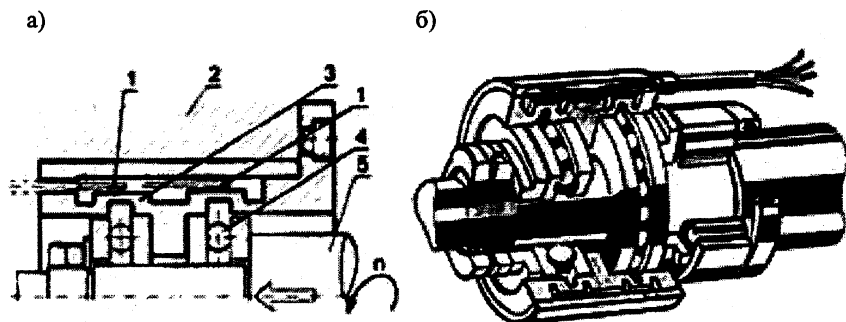


Рис. 2. Схемы измерения сил резания с помощью тензометрических датчиков, вмонтированных в шпиндельный узел (а) и шарико-винтовую пару (б): 1 – датчики; 2 – корпус; 3 – упругая втулка; 4 – подшипник; 5 – тяга зажимного устройства.

В ходе ряда исследований [1] установлено, что:

- выкрашиванию режущих кромок инструмента сопутствуют скачкообразные изменения осевой и радиальной сил резания;
- скалыванию режущего лезвия сопутствует внезапное возрастание, а затем падение силы резания;
- в обоих случаях силы резания остаются на новом уровне в течение одного оборота заготовки.

Это позволяет получать достаточно достоверную информацию о состоянии режущего инструмента путем мониторинга сил резания. В качестве датчиков используются тензометрические, пьезокварцевые, индуктивные, магнитострикционные. При этом к ним предъявляются следующие требования:

- низкая чувствительность к помехам, вызванным повышением температуры и колебаниями;
- возможность установки датчика на станке без ограничений технологических возможностей последнего;
- отсутствие воздействий на статическую и динамическую жесткость узлов станка;
- высокая надежность работы, в том числе и в условиях критических нагрузок;

- простота и легкость установки датчика на станке, не требующая конструктивных изменений в последнем;
- возможность покупки (серийное изготовление фирмой-производителем).

Датчики могут крепиться непосредственно к инструментам [4], встраиваться в шарико-винтовые пары [5–7], revolverные головки [5, 8, 9], оправки [10, 11], а также крепиться к корпусным деталям станка (снаружи или внутри) [12, 13]. В настоящее время ведущие фирмы-изготовители режущих инструментов приступили к выпуску динамометрических оправок с конусностью 7:24 для крепления режущих инструментов в шпинделях многоцелевых станков и ГПМ [10, 11]. Примеры использования датчиков силы показаны на рис. 1, 2.

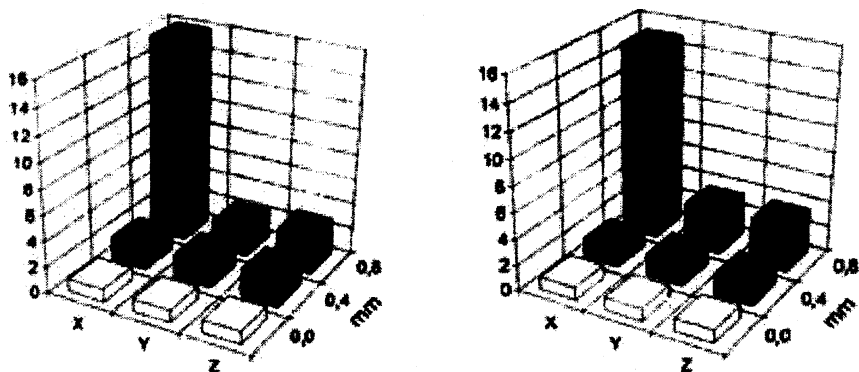


Рис. 3. Зависимость относительной амплитуды колебаний от их направления (X, Y, Z) и износа резца: а - $v = 90$ м/мин.; б - $v = 120$ м/мин.; $f = 7200$ Гц.

Вторым по перспективности направлением мониторинга режущих инструментов является использование акустической эмиссии. Под акустической эмиссией понимают возникновение упругих волн, генерированных в результате высвобождения внутренней энергии материала вследствие его деформаций, разрушения и фазовых превращений. Источниками акустической эмиссии в процессе резания могут быть срез и пластическая деформация обрабатываемого материала, образование микротрещин в обрабатываемом и инструментальном материалах, трение между поверхностями детали, инструмента и стружки, а также ломание стружки и ее удары о деталь [1]. Исследованный диапазон частот акустической эмиссии лежит в пределах 50 кГц...2 МГц, что значительно выше частот авто- и звуковых колебаний. Учитывая, что качество фиксации сигнала в значительной степени зависит от регистрирующей аппаратуры и положения

датчиков, современные исследования акустической эмиссии следует рассматривать скорее как качественные, а не количественные.

Среди датчиков акустической эмиссии представляют интерес пленочные, находящиеся непосредственно под режущей пластиной инструмента, а также воспринимающие сигнал от потока СОЖ.

Механические и звуковые колебания технической системы также широко используются для анализа состояния инструмента, поскольку, с одной стороны, износ значительно влияет на картину колебаний, с другой – колебания легко зафиксировать с помощью, например, широко доступных датчиков ускорений. При этом рассмотрены разные частоты (от 500 до 11000 Гц) и направления колебаний. Установлено [1], что наиболее интенсивно износ инструмента влияет на колебания в направлении подачи, причем для анализа лучше использовать не абсолютные, а относительные (отношение текущей амплитуды колебаний к амплитуде колебаний при работе инструментом, не имеющим износа) значения амплитуд (рис. 3). Кроме того, все полученные результаты применимы только для конкретных сочетаний элементов режима резания, а значит, для обработки конкретных деталей.

Окончательная диагностика состояния режущего инструмента проводится компьютером на основе, например, метода нейронных сетей [1] в ходе комплексного анализа информации. Такие сети должны обеспечивать:

- способность к самообучению путем использования соответствующих механизмов поиска и кодирования информации;
- приспособление ко вновь возникшей информации;
- саморганизацию для создания оптимальных связей между входными и выходными параметрами;
- формирование новых знаний о явлениях, сопутствующих исследуемому;
- высокую скорость расчетов.

Несмотря на значительную стоимость, использование мониторинга режущих инструментов позволяет обеспечить высокую надежность работы современного технологического оборудования, повысить качество обработки, снизить финансовые затраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adamczyk Z., Jemielniak K., Kosmol J., Sokołowski A. Monitorowanie ostrza skrawającego / Pod red. J.Kosmola. – Warszawa: FNKT, 1996. – 244 s. 2. Палей С.М. Состояние и тенденции развития способов прогнозирования периода стойкости лезвийного режущего инструмента. – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 44 с. 3. Dornfel D. Future Directions for Intelligent Sensors. Proc. Third Meeting of the CIRP Working Group on TCM. – Paris, 1994. – P. 52–57. 4. Адаптивное управление станками / Под ред. Б.С.Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с. 5. Kosmol J. Automatyzacja obróbiarek i obróbki skrawaniem. – Warszawa: WNT, 1995. – 412 S. 6. Mess-system für die Produktionstechnik. Проспект фирмы «Promess». 7. Tool Monitoring System –

Vorschubkraftsensor. Проспект фирмы «Sangwik Coromant». 8. Tool Monitoring System. Multi-channel Tool Monitor Unit. C – 342TMS. Проспект фирмы «Sangwik Coromant». – 1984. 9. Tool Monitoring System. Проспект фирмы «Prometec GmbH». – Aachen, 1985. 10. Tool Monitoring System. IntelliTool. Schnittkraftüberwachung in Werkzeughalter. C – 342TMS. Проспект фирмы «Sangwik Coromant». 11. Stimman J. Rotating Cutting Force Dynamometr. Проспект фирмы «Kistler Instrumente AG». 12. Kraftsensoren zur Werkzeug und Prozessüberwachung. Проспект фирмы «Prometec GmbH». 13. TMS – PMS: Werkzeug- und Prozessüberwachungssysteme zur Erkennung von: Werkzeugbruch, Werkzeugverschleiss, Maschinenkollisionen. Проспект фирмы «Prometec GmbH».

УДК 621.83.065

И. П. Филонов, Е. Б. Вериго

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ПОЗИЦИОННОЙ ПОВТОРЯЕМОСТИ СБОРОЧНОГО ЦЕНТРА С ШАГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Шаговый электропривод широко используется в автоматизированных сборочных центрах, измерительных машинах, установках для лазерной обработки материалов и др. Линейный шаговый привод является наиболее приспособленным к прямому цифровому управлению. Дополнительным преимуществом шагового электропривода является использование азростатических опор. Такие опоры позволяют проектировать автоматизированные системы без кинематических преобразователей движения, что снижает энергетические потери на трение и повышает надежность системы.

Точность позиционирования и позиционная повторяемость рабочего органа автоматизированного сборочного центра являются основными при организации автоматизированной сборки, поскольку они в значительной степени определяют собираемость сборочных комплектов и тем самым позволяют моделировать неопределенность результата сборочного процесса. Нами были проведены экспериментальные исследования точности позиционирования и позиционной повторяемости транспортирующей координаты Y сборочного центра СБ-001 по сборке роторов шаговых двигателей на базе линейного шагового электропривода.

Точность позиционирования определяется разностью между заданным и средним значением фактического положения рабочей точки манипулятора при повторных выходах в заданную позицию в соответствии с требованиями стандарта ISO/DIS 9283. Основные положения данного стандарта заключаются в следующем:

- измерения должны проводиться при максимальном грузе в схвате манипулятора;
 - измерения должны проводиться с максимальной скоростью перемещения звеньев манипулятора;
 - минимальное число циклов при позиционировании в заданной точке равно 30.
- Точность позиционирования ΔL рабочего органа сборочного центра с поступательными степенями подвижности можно выразить как:

$$\Delta L = \sqrt{(\underline{x} - x_3)^2 + (\underline{y} - y_3)^2 + (\underline{z} - z_3)^2}, \quad (1)$$

где

$$\underline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \underline{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{и} \quad \underline{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i;$$

x_3, y_3 и z_3 – координаты заданной точки в рабочей зоне манипулятора робота;
 x_i, y_i и z_i – координаты фактических точек, полученных при i -м повторе позиционирования;
 $\underline{x}, \underline{y}$ и $\underline{z}$ – среднее значение координат фактической точки позиционирования после n повторений задания.

При оценке точности позиционирования координаты Y сборочного центра выражение (1) принимает вид:

$$\Delta L_Y = \underline{y} - y_3. \quad (2)$$

На основании полученных значений точности позиционирования ΔL_Y в заданных точках можно сделать заключение о точности позиционирования вдоль координаты Y .

Позиционная повторяемость определяет степень отклонения заданных координат рабочей точки манипулятора после n повторов позиционирования в одной и той же точке при одинаковых условиях выхода в заданную точку, то есть при выходе в заданную точку позиционирования по одной и той же траектории. Позиционная повторяемость для данной точки определяется значением параметра r , являющегося радиусом сферы (круга), в которую попадают значения координат рабочей точки манипулятора [1]. Данный параметр вычисляется на основе следующих выражений:

$$r = \underline{D} + 3 S_D, \quad (3)$$

где

$$\underline{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i, \quad D_i = \sqrt{(x_i - \underline{x})^2 + (y_i - \underline{y})^2 + (z_i - \underline{z})^2}, \quad S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \underline{D})^2}{n-1}};$$

r – параметр, определяющий радиус сферы (круга) в которую попадают значения координат рабочей точки манипулятора;

$\bar{D}$ – среднее значение отклонения координаты от среднего значения позиционирования;

D_i – отклонение координаты от среднего значения позиционирования, полученное при i -м повторе позиционирования;

S_D – среднеквадратическое отклонение координаты позиционирования.

На основании полученных значений параметра r , а также соответствующих гистограмм (полигона) распределения значений позиционирования в заданных точках делают заключение о позиционной повторяемости вдоль координаты Y в соответствии со стандартом ISO/DIS 9283.

Для определения точности позиционирования и позиционной повторяемости перемещения вдоль координаты Y экспериментальные исследования проводились на сборочном центре СБ-001, транспортирующие звенья которого представлены на рис. 1. С помощью зубчатого индуктора линейного шагового привода производился съем данных о положении якоря внутри полюсного деления машины с помощью датчика положения – синусной линейки.

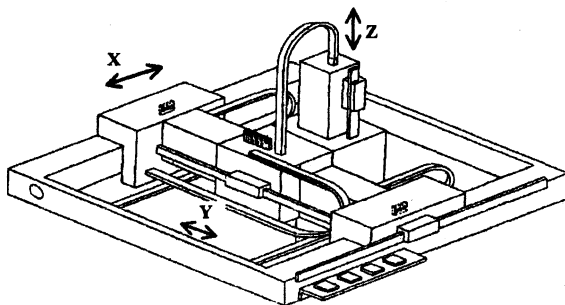


Рис. 1. Транспортирующие звенья сборочного центра.

Линейные шаговые двигатели в сборочном центре выполнены на аэростатических опорах, поэтому трение в опорах практически не влияет на позиционирование привода.

На нижнем уровне управления линейным шаговым электроприводом реализуется принцип прямого цифрового управления координатой электропривода с помощью микропроцессорного контроллера. На среднем уровне управления осуществляется согласованное управление с помощью модуля центрального процессора, общей шины с магистральным параллельным интерфейсом и соответствующим оборудованием, подключенным к модулям ввода-вывода дискретных сигналов отдельных контроллеров координат. На верхнем уровне управления осуществляется

согласованное управление группами электроприводов. В качестве управляющих устройств на этом уровне управления использована персональная ЭВМ, имеющая выход на стандартный последовательный интерфейс RS-232 для сопряжения с модулями центрального процессора, установленными в крейтах каркаса.

В состав программного обеспечения контроллера координаты входит ряд рабочих программ, обеспечивающих управление двигателем по его математической модели с траекторией движения с трапецеидальным или треугольным графиком скорости и возможностью независимого задания ускорения на разгон и торможение привода [2].

Экспериментальные измерения точности позиционирования и позиционной повторяемости координаты Y сборочного центра СБ 001 были проведены в точке на расстоянии 147579 мкм от базового положения с 30 повторами выхода в заданную точку с внешней нагрузочной силой F вдоль движения привода, соответственно F=0 Н, F=3 Н, F=13 Н, F=23 Н и F=33 Н, при скорости перемещения 24,5 м/с. Результаты измерений точности позиционирования по формуле (2) и позиционной повторяемости по формуле (3) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Точность позиционирования и позиционная повторяемость
транспортирующей координаты Y сборочного центра

	F=0 Н	F=3 Н	F=13 Н	F=23 Н	F=33 Н
ΔL_y , мкм	-0,9	0,9	10,6	20	31,3
γ , мкм	2,3	2,5	2,2	4,2	3,5

По результатам измерений, представленным в табл. 1, на рис. 2 построен график зависимости точности позиционирования ΔL_y (сплошная линия) и позиционной повторяемости γ (штриховая линия) транспортирующей координаты дискретного привода от приложенной нагрузочной силы.

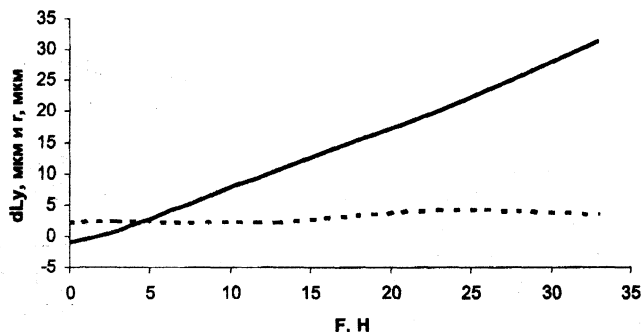


Рис. 2. Зависимость позиционирования и позиционной повторяемости координаты Y от внешней силы F.

Результаты измерений позиционной повторяемости представленные в табл. 1, показывают, что позиционная повторяемость снижается при значительном увеличении нагрузочной силы (при $F=23$ Н и более). Полигон распределения частот K_i координаты Y после 30 выходов в заданную точку с нагрузочной силой 23 Н представлен на рис. 3.

Аналогично проведенным исследованиям позиционирования транспортирующей координаты Y при постоянной внешней нагрузке были проведены экспериментальные исследования при переменной нагрузке вдоль движения звена. Переменная нагрузка изменялась соответственно от максимального значения 33 Н до минимального 0 Н по косинусоидальному закону и наоборот от минимального до максимального значения с максимумом и минимумом в начальной и конечной точках движения. Анализ точности позиционирования с переменной нагрузочной силой показал, что результаты измерений идентичны в первом случае позиционированию с неизменной минимальной нагрузкой $F=0$ Н, а во втором случае – с максимальной постоянной нагрузкой $F=33$ Н [3]. Это говорит о том, что основное влияние на точность позиционирования линейного дискретного шагового электропривода оказывает электромагнитное взаимодействие зубцовых делений якоря и индуктора и, соответственно, характер электромагнитного взаимодействия между ними.

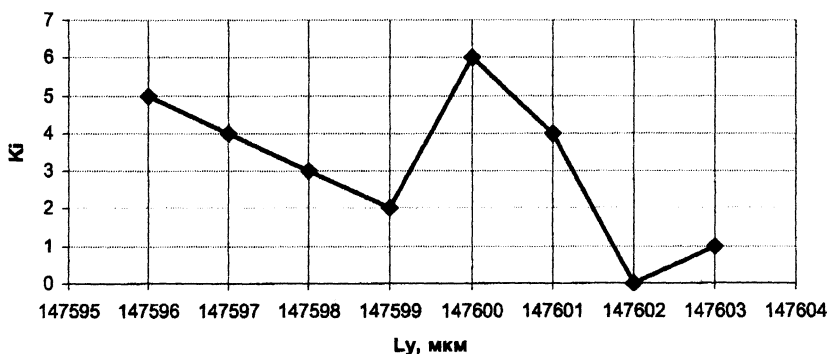


Рис. 3 Полигон распределения частот K_i координаты Y при силе нагрузки $F=23$ Н.

Очевидно, что приложенная внешняя сила смещает электромагнитное равновесие между зубцовыми делениями якоря и индуктора, что и приводит к снижению точности позиционирования дискретного шагового электропривода. Для устранения этого фактора можно использовать форсировку подачи напряжения на обмотки шагового двигателя, увеличение крутизны изменения электромагнитного поля между зубцами якоря и индуктора, а также

предусмотреть компенсацию возникающих прогнозируемых ошибок позиционирования [2].

По результатам экспериментальных исследований были сделаны выводы о том, что при увеличении внешней нагрузки вдоль перемещения по заданной координате точность позиционирования падает пропорционально внешней силе в соответствии с графиком на рис. 2, при этом позиционная повторяемость координаты снижается при значительном увеличении внешней силы. Приведен полигон позиционирования по координате Y линейного шагового привода сборочного центра при внешней нагрузочной силе равной 23 Н.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dimov H., Dobrinov V. and T. Boiadjev Experimental Investigation of Pose Repeatability of Manipulating Robots // Problems of Engineering Cybernetics and Robotics. – 1997. – No. 6. – pp. 106-111. 2. Сафонов Ю.М. Электроприводы промышленных роботов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 196 с. 3. Filonov I., Kourtch L. and Y. Veryha Theoretical and Experimental Research of Assembly Center End-effector Path-tracking // Proceedings of 3d Int. Conf. Heavy machinery HM'99. – 1999. – Kraljevo, Yugoslavia. – Pp. 312-315.

ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК621.924.8+621.787.4

И. Л. Баршай

ВЛИЯНИЕ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Обработке подвергались образцы из стали 45. При обработке была использована упругая схема установки иглофрезы. Параметры режима иглофрезерования варьировали в следующих пределах: скорость резания – $V=50-250$ м/мин; продольная подача – $S_{пр}=2-10$ мм/об; круговая подача $S_{кр}=1-5$ м/мин; усилие прижатия иглофрезы к обрабатываемой поверхности – $P=0,15-0,25$ кН.

Физико-механические характеристики поверхностного слоя материала образцов оценивали величиной микротвердости H_u , глубиной наклепа h_n , характером и величиной остаточных напряжений σ .

В результате реализации математического планирования эксперимента для H_u и h_n получены следующие уравнения регрессии:

$$H_u = 3536 - 10,922V + 33,437S_{пр} + 39,989S_{кр} - 14,524P + 0,0141VP - 11,472S_{пр}S_{кр} + 0,0269V^2 + 0,0379P^2, \quad (1)$$

$$h_n = 0,0970 - 0,0039V + 0,0182S_{пр} + 0,106S_{кр} + 0,0001P - 0,00006VS_{пр} - 0,0001VS_{кр} + 0,000008VP - 0,003S_{пр}S_{кр} - 0,0003S_{кр}P - 0,00001V^2. \quad (2)$$

Результаты анализа полученных зависимостей указывают на следующее. Зависимости изменения H_u и h_n от скорости резания имеют экстремальный характер. При скорости иглофрезерования $V \leq 150$ м/мин. было зафиксировано уменьшение величины H_u и h_n . Дальнейший рост скорости резания приводит к увеличению указанных параметров. Это объясняется тем, что с первоначальным ростом скорости резания повышается температура в зоне контакта иглофрезы – обрабатываемая поверхность. Степень влияния температурного фактора при малых скоростях резания ($V \leq 150$ м/мин.) превышает степень влияния силового (динамического) фактора воздействия проволочных элементов на обрабатываемую поверхность. Увеличение V свыше указанного значения способствует преобладанию силового воздействия проволочных элементов на обрабатываемую поверхность образцов в момент контакта. Это приводит к росту величины H_u и h_n .

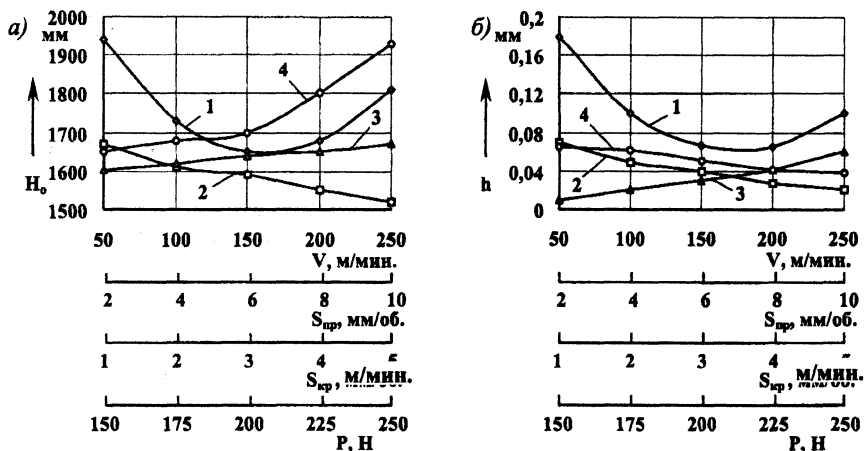


Рис. 1. Влияние скорости резания (1), продольной подачи (2), круговой подачи (3), усилия прижатия иглофрезы (4) на изменение микротвердости поверхности (а) и глубину упрочненного слоя (б): 1 – $S_{пр}=2,5$ мм/об., $S_{кр}=3$ м/мин., $P=0,15$ кН; 2 – $V=150$ м/мин., $S_{кр}=3$ м/мин., $P=0,15$ кН; 3 – $V=150$ м/мин., $S_{пр}=2,5$ мм/об., $P=0,15$ кН; 4 – $V=150$ м/мин., $S_{пр}=2,5$ мм/об., $S_{кр}=3$ м/мин.

Увеличение $S_{пр}$ и $S_{кр}$ незначительно смещают минимум H_μ и h_n в сторону больших значений скорости резания. Увеличение прижатия иглофрезы к обрабатываемой поверхности способствует смещению минимума H_μ и h_n в область меньших скоростей резания.

Зависимость $H_\mu=f(S_{пр})$ монотонна. Однако одновременное изменение $S_{кр}$ и $S_{пр}$ приводит как к росту, так и уменьшению величины микротвердости поверхности. При малых значениях $S_{кр}$ указанная зависимость имеет тенденцию к росту. При значениях, соответствующих середине интервала варьирования данного параметра режима обработки ($S_{кр}=2,92$ м/мин.), H_μ практически неизменно. При увеличении $S_{кр}$ зависимость $H_\mu=f(S_{пр})$ приобретает убывающий характер.

Аналогичный возрастающий характер изменения H_μ в зависимости от круговой подачи при малых значениях продольной подачи ($S_{пр}=2,5$ мм/об). С дальнейшим увеличением продольной подачи эта зависимость монотонно убывающая. Описываемый характер данных зависимостей обусловлен взаимным влиянием $S_{пр}$ и $S_{кр}$ на протяженность траектории движения режущего лезвия проволоочного элемента по поверхности образца и его положения во время этого движения.

Скорость резания и усилие прижатия иглофрезы к обрабатываемой поверхности не оказывают влияния на характер зависимости $H_\mu=f(S_{пр})$ и $H=f(S_{кр})$.

Зависимость изменения h_n от $S_{пр}$ монотонна. При малых скоростях резания ($V \leq 60$ м/мин.) она имеет возрастающий характер. С увеличением скорости реза-

ния характер зависимости меняется на убывающий. Это вызвано уменьшением времени взаимодействия проволочного элемента с обрабатываемой поверхностью при высоких скоростях резания и продольных подачах иглофрез. При малых круговых подачах ($S_{кр}=1,38-2,92$ м/мин.) зависимость $h_n=f(S_{пр})$ трансформируется в возрастающую. При дальнейшем увеличении $S_{кр}$ эта зависимость – убывающая. Усилие прижатия иглофрезы к обрабатываемой поверхности не влияет на характер изменения зависимости $h_n=f(S_{пр})$.

Зависимость изменения h_n от величины круговой подачи монотонна. При малых значениях продольной подачи эта зависимость является на возрастающей. При больших значениях этой подачи ($S_{пр}=10$ мм/об) зависимость $h_n=f(S_{кр})$ – убывающая. Это вызвано уменьшением времени силового воздействия на обрабатываемую поверхность с ростом круговой подачи.

Увеличение усилия прижатия иглофрезы к обрабатываемой поверхности приводит к росту H_n . Одновременное изменение скорости резания и продольной подачи не оказывает влияние на изменение характера зависимости $H_n=f(P)$.

Зависимость $h_n=f(P)$ при малых скоростях резания монотонно убывающая. Рост скорости резания трансформирует эту зависимость в возрастающую. Остальные параметры режима резания не оказывают влияния на изменения характера зависимости $h_n=f(P)$.

Влияние параметров режима иглофрезерования на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое материала образцов описывается следующим уравнением регрессии:

$$\sigma = 365,9 + 2,27V - 120,3S_{пр} - 8,11S_{кр} + 0,425P + 0,191VP - 0,014VP + 3,40S_{пр}S_{кр} + 0,14S_{пр}P + 4,23S_{пр}^2 \quad (3)$$

Анализ уравнения (3) показал, что с увеличением скорости резания величина остаточных напряжений монотонно возрастает. При малых усилиях прижатия иглофрезы к обрабатываемой поверхности ($P=0,15-0,19$ кН) зависимость $\sigma = f(V)$ имеет характер убывающей. Это вызвано тем, что с увеличением скорости резания в зоне контакта иглофреза – обрабатываемая поверхность повышается температура. В этом случае температурный фактор преобладает над силовым. При больших усилиях прижатия иглофрезы зависимость $\sigma = f(V)$ является возрастающей ввиду существенного повышения силового воздействия на обрабатываемую поверхность. Величины $S_{пр}$ и $S_{кр}$ в этом случае не оказывают влияния на характер изменения величины остаточных напряжений.

С увеличением $S_{пр}$ зависимость $\sigma = f(S_{пр})$ имеет экстремальный характер. Минимум величины остаточных напряжений сжатия соответствует $S_{пр}=6-8$ мм/об. Указанный характер этой зависимости связан с тем, что увеличение продольной подачи приводит к превалирующему влиянию силового фактора в формировании остаточных напряжений. Это вызвано ростом упругих отжиганий проволочных элементов. Дальнейшее увеличение продольной подачи приводит к уменьшению чис-

ла проволочных элементов, воздействующих на локальные участки обрабатываемой поверхности, а это, в свою очередь, способствует снижению уровня остаточных напряжений. Увеличение скорости резания и усилия прижатия иглофрезы к обрабатываемой поверхности приводит к смещению максимума остаточных напряжений сжатия в область меньших продольных подач. С ростом круговой подачи указанный максимум смещается в область больших продольных подач.

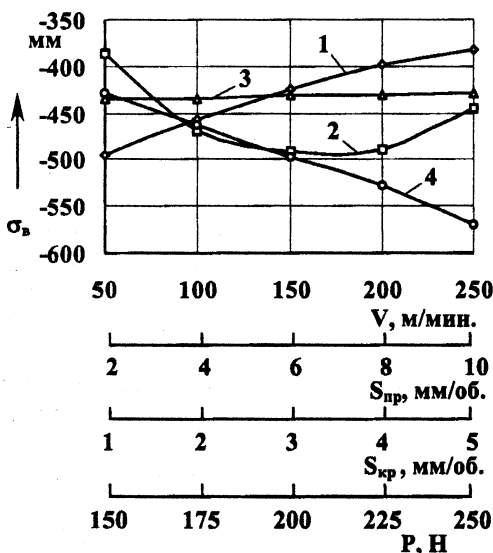


Рис. 2. Влияние скорости резания (1), продольной подачи (2), круговой подачи (3), усилия прижатия иглофрезы (4) на изменение остаточных напряжений в поверхностном слое: 1 – $S_{пр}=2,5$ мм/об, $S_{кр}=3$ м/мин., $P=0,15$ кН; 2 – $V=150$ м/мин., $S_{кр}=3$ м/мин., $P=0,15$ кН; 3 – $V=150$ м/мин., $S_{пр}=2,5$ мм/об, $P=0,15$ кН; 4 – $V=150$ м/мин., $S_{пр}=2,5$ мм/об, $S_{кр}=3$ м/мин.

Увеличение $S_{кр}$ не приводит к существенному изменению величины остаточных напряжений сжатия.

Зависимость изменения величины остаточных напряжений сжатия от усилия прижатия иглофрезы к обрабатываемой поверхности монотонно возрастающая. Остальные параметры режима иглофрезерования в этом случае не оказывают влияния на изменение характера зависимости $\sigma = f(P)$.

Таким образом, представленные данные свидетельствуют о том, что иглофрезерование может быть использовано в качестве упрочняющей обработки деталей машин.

В. А. Данилов, Л. А. Данилова, Р. А. Киселев

АНАЛИЗ СХЕМ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВТОРЯЮЩИМСЯ ЗУБЧАТЫМ ПРОФИЛЕМ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ПРОЦЕССЕ ДЕЛЕНИЯ

*Полоцкий государственный университет
Новополоцк, Беларусь*

Высокая трудоемкость изготовления деталей, имеющих на торцах прерывистые поверхности с периодическим зубчатым профилем (муфты, роторы, индукторы и т.д.), обуславливает необходимость создания технологий, основанных на прогрессивных методах формообразования. Для традиционных технологий с периодически выполняемым движением деления характерны низкая производительность и невысокая точность, что особенно проявляется с увеличением числа нарезаемых зубьев. Более эффективны схемы обработки с совмещенными движениями формообразования и деления, выполняемыми непрерывно в течение обработки всех зубьев (пазов). При непрерывном делении для формообразования зубьев по длине необходимо сложное исполнительное движение, компонентами которого являются согласованные вращательные движения инструмента и заготовки. Эти условия обуславливают выполнение режущего инструмента в виде резцовой головки с равномерно расположенными по окружности режущими элементами. Последние могут быть размещены на наружной или торцевой поверхностях ее корпуса. Соответственно оси вращения инструмента и заготовки должны скрещиваться или располагаться параллельно друг другу.

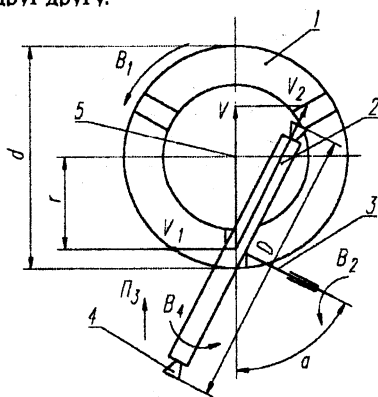


Рис. 1. Схема обработки прямолинейных пазов.

В первом случае ось 3 (рис. 1) инструмента 2 и ось 5 заготовки 1 расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. В процессе обработки заготовки и инструменту сообщают согласованные вращательные движения соответственно B_1 и B_2 с частотами n_1 и n_2 . Для обеспечения непрерывности процесса деления отношение $i = n_2/n_1$ указанных частот должно удовлетворять условию

$$i = \frac{m}{z}, \quad (1)$$

где m – число обрабатываемых пазов; z – число режущих элементов.

Для образования пазов по длине инструменту сообщают также в плоскости вращения заготовки прямолинейное перемещение P_3 вдоль прямой, проходящей через ось вращения заготовки, и связанный с этим перемещением поворот B_4 в той же плоскости вокруг перпендикулярной ей оси [1]. Независимо от схемы резания (попутная или встречная) перемещение резца 4 относительно заготовки 1 должно осуществляться по прямой, проходящей через ось вращения заготовки. Это возможно при определенном соотношении окружных скоростей V_1 и V_2 соответственно заготовки и резца и определенной ориентации инструмента относительно направления его поступательного перемещения, задаваемого углом α .

Результирующая скорость V скоростей V_1 и V_2 должна быть направлена вдоль паза, поэтому

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{V_1}{V_2}. \quad (2)$$

Так как $V_1 = 2\pi n_1 r$, $V_2 = \pi D n_2$, то с учетом формулы (1)

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{2rz}{Dm}. \quad (3)$$

Скорость резания при данной схеме обработки практически определяется значением скорости V , которая максимальна при $r = 0,5d$, где d – диаметр заготовки. Для этого момента

$$V = \pi \sqrt{(Dn_2)^2 - (dn_1)^2}, \quad (4)$$

откуда частота вращения инструмента при заданной скорости резания определяется зависимостью

$$n_2 = \frac{V}{\pi \sqrt{D^2 - \left(d \frac{z}{m}\right)^2}}. \quad (5)$$

Для коротких пазов, когда допускается формообразование впадин по дуге окружности, более производительна упрощенная схема обработки без перемещения инструмента вдоль паза. В этом случае пазы образуются по длине только движениями B_1 и B_2 , а по глубине – относительным перемещением инструмента и заготовки вдоль оси вращения последней. Угол α установки инструмента определяется по формуле (3), где r принимается равным среднему радиусу зубчатого контура.

Схема обработки пазов при параллельных осях инструмента 2 и заготовки 1 показана на рис. 2. В процессе обработки им сообщаются вращательные движения соответственно B_2 и B_1 вокруг осей 3 и 5, а инструменту – движение врезания Π_3 вдоль оси вращения заготовки.

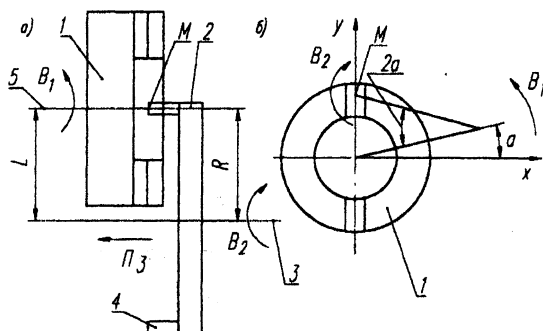


Рис. 2. Схема обработки пазов торцевой резцовой головкой: а – кинематическая схема обработки, б – схема формообразования паза.

Траектория формообразующей точки M в системе координат XOY описывается системой уравнений

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha - R \cos(\alpha(i-1)) \\ y = L \sin \alpha + R \sin(\alpha(i-1)) \end{cases}, \quad (6)$$

где α – угол поворота заготовки, соответствующий углу $\alpha(i-1)$ поворота резцовой головки;

i – отношение частот вращательных движений B_2 и B_1 .

В частном случае при $i=1$

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha - R \\ y = L \sin \alpha \end{cases}, \quad (7)$$

или

$$(x + R)^2 + y^2 = L^2, \quad (8)$$

т.е. траектория данной точки представляет собой окружность, радиус которой равен расстоянию L между осями инструмента и заготовки, а центр смещен на расстояние R от начала координат. Исходя из формы траектории формообразующего движения, данная схема применима для обработки пазов, боковые поверхности которых спрофилированы по окружности. Схема позволяет обрабатывать детали с четным и нечетным числом пазов.

Если $i=2$, то при $L=R$ и одинаково направленных вращательных движениях инструмента и заготовки (рис. 2, б) формообразующая точка движется по траектории, уравнение которой в параметрической форме имеет вид

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 2R \sin \alpha \end{cases} \quad (9)$$

Следовательно, режущий элемент перемещается по прямой, проходящей через ось вращения заготовки, что обеспечивает возможность обработки прямолинейных пазов.

Схема обработки по рис. 2 при $L \neq R$ в зависимости от значения i и количества режущих элементов позволяет изготавливать четное или нечетное число пазов переменной ширины, например, кулачковых муфт.

В рассмотренных выше схемах обработки профиль паза образуется методом копирования, поэтому его ширина не превышает удвоенной длины проекции режущей кромки резца на плоскость, перпендикулярную оси паза (траектории исполнительного движения). Это ограничивает технологические возможности данных схем по ширине пазов, так как с увеличением последней соответственно возрастает сила резания, что снижает виброустойчивость обрабатываемой системы. В этой связи обе схемы целесообразно использовать преимущественно для обработки узких пазов.

Для исключения влияния ширины обрабатываемых пазов на виброустойчивость станка и повышения универсальности режущего инструмента рекомендуется формировать паз по ширине не одновременно, а последовательно, т.е. не методом копирования, а методом следа или сочетанием данных методов. На этом принципе основана схема обработки пазов на торцах деталей [2], представленная на рис. 3. От схемы на рис. 2 она отличается тем, что требуемую ширину пазов обеспечивают не за счет параметров режущей части инструмента, а кинематически, сообщая заготовке дополнительное вращение B_4 во время профилирования паза по ширине. В данном случае процесс обработки состоит из последовательно выполняемых этапов врезания и профилирования.

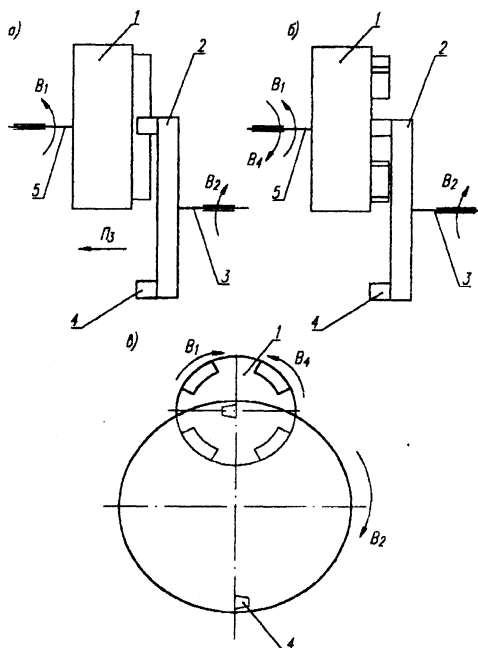


Рис. 3. Схема обработки широких пазов: а (б) – кинематическая схема обработки на этапе врезания (профилирования); в – относительное расположение инструмента и заготовки.

На этапе врезания заготовке 1 (рис. 3, а) сообщают вращение B_1 с частотой n_1 вокруг оси 5, а резцовой головке 2 – вращение B_2 с частотой n_2 вокруг оси 3 в том же направлении, что и вращение B_1 . При этом $n_2/n_1=2$. Одновременно с движениями B_1 и B_2 резцовой головке сообщается также движение P_3 вдоль оси 3.

При переходе к этапу профилирования изменяют соотношение частот вращательных движений заготовки и резцовой головки, имевшее место на этапе врезания. Тем самым создают относительное перемещение режущих зубьев резцовой головки вдоль контура заготовки для получения требуемой ширины паза.

Соотношение частот вращательных движений заготовки и резцовой головки задают в зависимости от скорости и направления движения профилирования по формуле

$$\frac{n_1}{n_2} = 0,5 \pm \frac{S}{\pi d n_2}, \quad (10)$$

где S – скорость движения профилирования (круговая подача);

d – диаметр заготовки;

Знак «плюс» соответствует одинаково направленным вращению заготовки и движению профилирования, «минус» – противоположно направленным этим движениям.

Для обеспечения соотношения (10) изменяют по сравнению с этапом врезания частоту вращения заготовки на

$$\Delta n_1 = \frac{S}{\pi d} \quad (11)$$

или частоту вращения резцовой головки на

$$\Delta n_2 = \frac{2S}{\pi d}. \quad (12)$$

Практически это обеспечивается при сообщении дополнительного вращения V_4 заготовке (рис. 3, б, в) или резцовой головке соответственно с частотой Δn_1 или Δn_2 . Поэтому в первом случае частоту вращения заготовки на этапе профилирования задают по формуле

$$n_1 = 0,5n_2 \pm \frac{S}{\pi d}, \quad (13)$$

а во втором – изменяют частоту вращения резцовой головки:

$$n_2 = 2n_1 \pm \frac{2S}{\pi d}. \quad (14)$$

Благодаря тому, что после выполнения этапа врезания изменяют соотношение частот вращательных движений резцовой головки и заготовки и тем самым создают движение профилирования, обеспечивается возможность обрабатывать пазы, ширина которых не зависит от длины режущей кромки зуба инструмента, а определяется временем этапа профилирования.

Последовательное формирование обрабатываемых пазов по ширине может быть обеспечено не только кинематически за счет введения дополнительного вращения, но и конструктивно – при переносе функции кинематики профилирования на режущий инструмент. В этом случае количество режущих элементов не зависит от числа нарезаемых пазов, что позволяет управлять толщиной срезаемых слоев металла и оптимизировать условия резания.

Рассмотренные схемы обработки реализуются на специальных или модернизированных универсальных зубошлицефрезерных станках, изготавливаемых Витебским станкостроительным заводом им. Коминтерна.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. 1798053 СССР, МКИ В23С3/00. Способ обработки пазов на торцах деталей / В.А. Данилов, Л.А. Данилова. – Оpubл. Б.И., 1993, №8.
2. А.С. 1798055 СССР, МКИ В23С3/28. Способ обработки пазов на торцах деталей / В.А. Данилов. – Оpubл. Б.И., 1993, №8.

СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ СПОСОБА ЗУБООБРАБОТКИ КАК СРЕДСТВО ЕГО ИНТЕНСИФИКАЦИИ НА ЭТАПЕ СИНТЕЗА

*Полоцкий государственный университет
Новополоцк, Беларусь*

С точки зрения использования того или иного технологического метода обработки, интенсификация зубонарезания определяется в основном общими тенденциями совершенствования и оптимизации процессов резания. Однако в этом случае могут быть выявлены лишь узкоспецифические пути интенсификации некоторых процессов зубообработки, дающие ограниченный эффект.

Более широкая область интенсификации обработки зубчатых колес определяется способами формообразования поверхности их зубьев. При этом приходится учитывать ограничения в выборе метода формирования производящих линий, которые накладываются эвольвентным профилем зуба. Он может быть получен лишь двумя методами – копирования и обката. Теоретически возможные сочетания методов воспроизведения производящих линий реализованы в известных способах обработки. Поэтому поиск путей интенсификации здесь наиболее реален на более низком уровне проектирования, при разработке конструктивных схем обрабатываемых систем – станков и инструментов.

Наиболее действенным представляется комплексный подход к повышению эффективности процессов обработки зубчатых колес, в основе которого лежат следующие предпосылки:

1. Способ формообразующей обработки зубьев (СОЗ) колес представляется как системный технический объект.
2. Для выявления факторов, влияющих на эффективность способа, строится системная модель, с достаточной полнотой описывающая способ.
3. Для определения степени влияния на эффективность отдельных факторов и времени их появления строится модель синтеза способа.
4. Осуществляется систематизация приемов и методов повышения эффективности способа обработки.

СОЗ зубчатых колес, как и любой другой способ формообразующей обработки резанием, являясь системным объектом, структурно состоит из некоторого определенного множества компонентов (подсистем), имеющих реальные связи друг с другом. Схема представления такого системного объекта как структуры подсистем может одновременно являться и средством исследования самой системы, и соб-

ственно исследуемым объектом. При этом выявление эффективности функционирования СОЗ как системного объекта в значительной мере предопределяется эффективностью каждой конкретной схемы представления этого объекта. Следовательно, можно говорить об эффективности системной модели как средства исследования и синтеза системного объекта, а также о сравнительной эффективности различных моделей.

Существующие системные модели, как правило, в той или иной мере эффективны как средство анализа системного объекта – СОЗ, но недостаточно эффективны в качестве средства его системного синтеза. В этой связи логична и актуальна постановка задачи создания системной модели, которая будет отвечать следующим требованиям:

- оптимально описывать структуру способа;
- отражать иерархию процесса проектирования системного объекта;
- обладать достаточной гибкостью, иметь возможность включения новых компонентов;
- позволять выявлять эффективность принятых проектных решений.

В основу предлагаемой модели, отвечающей указанным выше требованиям, положена известная основополагающая модель [1], по которой любой СОЗ на начальном этапе синтеза может быть представлен в виде технологической системы неизвестной структуры. На вход этой системы поступают материал, информация и энергия, а на выходе получается результат – готовая зубчатая деталь. Как системный объект, способ обработки должен обеспечить посредством своей реализующей подсистемы выполнение ряда функций для получения этого результата. Эти функции определяются необходимостью реализации потоков материала, информации и энергии. Для каждого из указанных потоков характерны две основные функции: функция переноса (распределения) и функция преобразования.

Материал в форме заготовки зубчатого колеса является в СОЗ объектом воздействия. Преобразование материала здесь осуществляется путем срезания припуска. Функция переноса материала в способе определяется относительным перемещением инструмента и заготовки в процессе резания и перемещениями исполнительных органов реализующей подсистемы.

Энергия в процессе обработки служит средством воздействия на материал заготовки. Преобразование и перенос энергии обеспечивают выполнение всех подфункций способа через функционирование реализующей системы.

Формообразование в зубообработке рассматривается как процесс переноса некоторой заранее определенной, априорной информации с чертежа на заготовку, в результате которого получается зубчатое колесо заданной формы и размеров. Передача заданной информации на объект воздействия (материал) является сутью воздействия. На материал переносится только преобразованная информация, т.е. представленная в форме режущих кромок инструмента и траектории их движений относительно заготовки.

Дифференциация СОЗ в предлагаемой системной модели проводится на основе последовательного деления основной функции на подфункции. Каждой подфункции однозначно соответствует реализующая ее подсистема. Степень деления (дробность) системного объекта определяется конечностью реализации основной функции через подфункции, т.е. функция делится до тех пор, пока дальнейшее деление станет невозможным. Полнота описания СОЗ при таком методе дифференциации во многом определяется степенью выявления подфункций. Выявленная таким образом структура СОЗ может быть представлена в виде древовидной разветвляющейся схемы.

Процесс проектирования (синтеза) СОЗ как системного объекта можно с достаточной степенью достоверности разделить на пять иерархических уровней, или этапов: концептуальный U1, системно-структурный U2, схемно-технический U3, композиционный U4 и конструкционный U5. Такое деление позволяет формализовать процесс проектирования, т.е. представить его в виде последовательности проектных логических процедур со строго определенным алгоритмом, что, в частности, является необходимым условием автоматизации проектирования.

Для построения системной модели синтеза СОЗ древовидная схема дифференциации системного объекта ставится в соответствие с иерархией процесса проектирования, когда выявление каждой из подфункций способа связывается с определенным и постоянным этапом его разработки. Построенная по такой методике системная модель обладает рядом перечисленных ниже свойств, обеспечивающих удобство и эффективность ее использования:

1. Модель может быть легко поставлена в соответствие с любой известной и логически верной моделью.
2. Модель может служить как инструментом анализа, так и достаточно эффективным инструментом синтеза СОЗ.
3. Модель наглядна, что облегчает разработку способа обработки.
4. Модель позволяет выявлять пути оптимизации и интенсификации СОЗ, поскольку в ней легко прослеживаются пути выявления подфункций.
5. Обеспечивается возможность расширения системной модели путем выявления и включения в ее состав новых функций и компонентов.

На рис. 1а... 1з представлены схемы некоторых структурных частей системной модели синтеза СОЗ, разработанной на указанных выше принципах. Деление основной функции на рис. 1, а... 1, ж выполнено на концептуальном и системно-структурном уровнях. На схемно-техническом уровне осуществлено деление подфункции F111 (рис. 1з). Трапециями на рисунке обозначены функции и подфункции СОЗ, а прямоугольниками – соответствующие им структурные реализующие компоненты. Ограничения в объеме данной публикации не позволяют представить всю системную модель. Более подробно модель и принципы ее построения представлены в других работах авторов, в частности в [2].

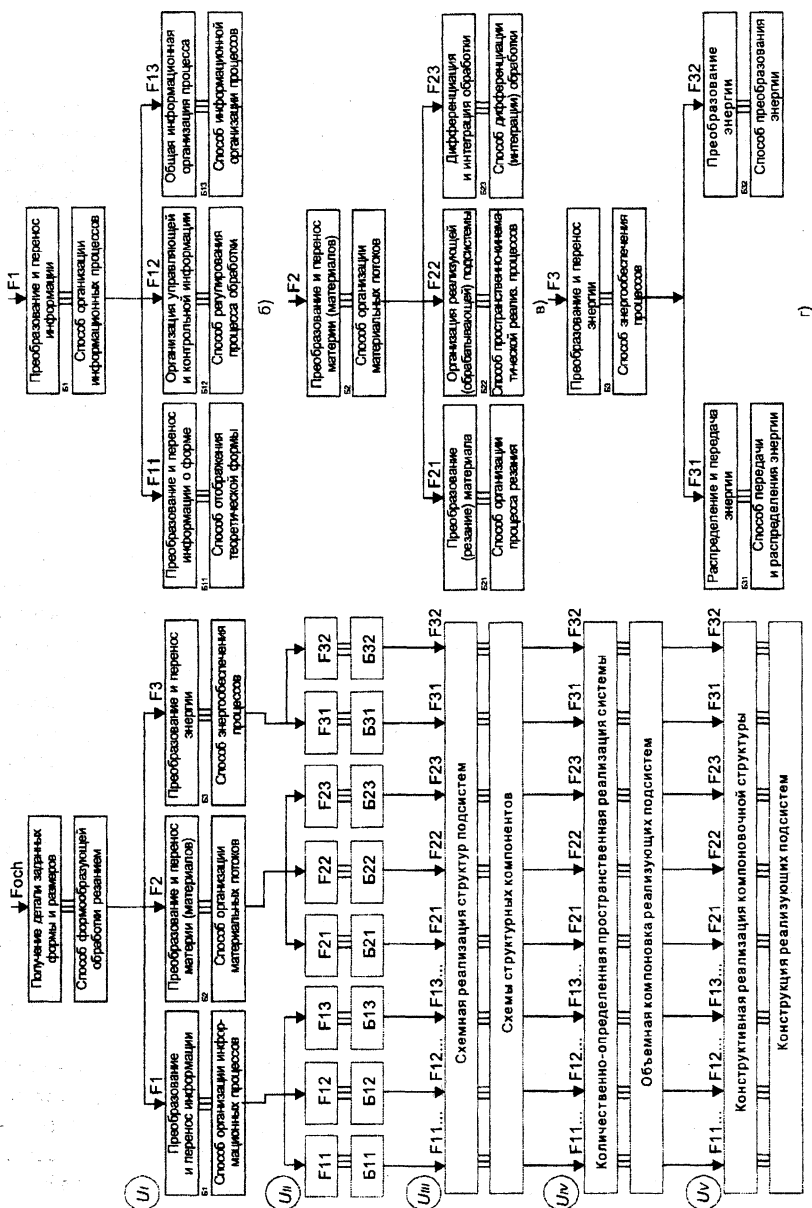


Рис. 1. Схема системной модели синтеза способа зубообработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин – М.: Машиностроение, 1975.
2. Исследование путей интенсификации процессов дискретного формообразования профильных и прерывистых поверхностей при синтезе способов их обработки // Заключительный отчет; ПГУ; руководитель В.А. Данилов, отв. исполнитель В.А. Терентьев, ГБ 2097. Новополоцк, 1997. – 100 с.

УДК621.915

В.Г. Куптель

СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

При обработке высокопрочных сталей и жаропрочных сплавов образуется сливная стружка, вызывающая затруднения в работе оборудования и служащая источником производственного травматизма. Вибрационное резание является в настоящее время одним из наиболее эффективных способов дробления сливной стружки. Сущность процесса вибрационного резания заключается в том, что на обычно принятую для данной операции кинематическую схему накладывается дополнительное направленное вибрационное движение инструмента относительно заготовки, источником которого может быть как специальный вибропривод, так и автоколебания, возникающие непосредственно в процессе резания. При правильном выборе направлений колебаний, их частоты и амплитуды использование вибрационного резания гарантирует надежное стружкодробление, повышение производительности и улучшение условий труда, создает благоприятные возможности для механизации и автоматизации производства.

На основании проведенных исследований нами разработаны устройства, которые создают для инструмента в направлении движения подачи наименьшую регулируемую жесткость и позволяют возбуждать автоколебательный процесс необходимой интенсивности и направления для обеспечения надежного стружкодробления при обработке различных материалов.

Важным экономическим и технологическим показателем процесса механической обработки металлов является стойкость инструмента. Поэтому при применении вибрационного резания необходимо добиваться не только устойчивого дробления стружки, но и повышения стойкости инструмента или, по крайней мере, сохранения на уровне обычного резания.

Автоколебания, возникающие в процессе резания, так же как и специально вводимые в зону резания вынужденные колебания, приводят к облегчению пластической деформации, уменьшению коэффициента трения по передней и задней поверхностям инструмента, улучшению отвода стружки, к заметному снижению силы резания, к уменьшению адгезионных явлений и, как результат этого, к уменьшению интенсивности изнашивания инструмента и повышению его стойкости. С другой стороны, циклическое нагружение инструмента при увеличении интенсивности колебаний, начиная с определенного предела, вызывает усталостное разрушение участков материала инструмента, находящегося в контакте с изделием и сходящей стружкой. Поэтому по достижении некоторого уровня колебаний стойкость инструмента начинает резко снижаться. Следует также учитывать, что при увеличении амплитуд колебаний существенно увеличивается длина пути, пройденная инструментом по изделию, а следовательно, и износ инструмента по задним и передним поверхностям. Результатом воздействия этих противоположных факторов и является наличие экстремальной зависимости. В зоне малых амплитуд преобладает положительное воздействие колебаний на облегчение процесса пластической деформации, а в зоне больших амплитуд – усталостное разрушение контактных слоев материала инструмента.

Такой характер зависимости стойкости инструмента от амплитуды колебаний, очевидно, справедлив для всех обрабатываемых и инструментальных материалов, т.к. материал любого лезвийного инструмента, как правило, прочнее материала заготовки. Положение точки экстремума, соответствующее оптимуму стойкости, зависит от условий резания и характеристик обрабатываемого и инструментального материалов.

При исследовании зависимости стойкости инструмента от амплитуды автоколебаний обычно не удается сохранить постоянной частоту автоколебаний. Однако частота является важнейшей характеристикой процесса колебаний, поэтому весьма важно знать, какое влияние она оказывает на стойкость инструмента совместно с амплитудой.

Выполненный в работе [1] двухфакторный эксперимент, а также результаты проведенных исследований дают основание считать, что зависимость стойкости инструмента от интенсивности автоколебаний можно исследовать как однофакторную, так как частота автоколебаний для каждого конкретного процесса обработки изменяется в малых пределах и весьма слабо влияет на стойкость инструмента. В то же время изменение частоты колебаний в больших пределах вызывает существенное изменение характера влияния ее на обрабатываемость [2].

Если совместно рассмотреть результаты исследований по улучшению обрабатываемости введением в зону резания вынужденных низкочастотных и ультразвуковых колебаний с результатами исследований автоколебаниями, то весь диапазон частот можно разделить на три диапазона.

Первый диапазон (низких частот) с частотой колебаний $f=20-150$ Гц. При такой частоте оптимальные амплитуды колебаний $A_{\text{опт}}=30-150$ мкм. Улучшение обраба-

тываемости в этом диапазоне обеспечивается за счет дробления стружки и облегчения ее отвода, за счет улучшения подвода СОЖ к режущим лезвиям и повышения эффективности охлаждения инструмента. Колебания такой интенсивности облегчают процесс пластической деформации, не вызывая при этом разрушения и снижения стойкости инструмента.

Второй диапазон колебаний с частотами $f=150-3000$ Гц охватывает главным образом область автоколебаний. В этом диапазоне оптимальными являются колебания с амплитудами $A_{\text{опт}}=8-20$ мкм. Поддержание амплитуды на этом уровне значительно повышает стойкость инструмента и качество обработанной поверхности.

Улучшение обрабатываемости в этом диапазоне достигается за счет облегчения пластической деформации, снижения сил резания и трения, уменьшения адгезионных явлений на площадках контакта инструмента с заготовкой и сходящей стружкой. В то же время при таком уровне не наступает еще интенсивного изнашивания и разрушения инструмента.

Третий диапазон включает в себя ультразвуковые вынужденные колебания с частотами $f=15-35$ кГц. Здесь оптимальными являются колебания с амплитудами $A_{\text{опт}}=1-5$ мкм. Они улучшают обрабатываемость вследствие воздействия в первую очередь на несовершенства кристаллического строения обрабатываемого материала, особенно на скопления несовершенств в полосах скольжения. Ультразвуковые колебания, значительно увеличивая энергию дислокаций, вызывая значительный прирост необратимых микродеформаций, приводят к уменьшению зоны пластической деформации, увеличению углов сдвига, уменьшению усадки стружки и снижению интенсивности автоколебаний, ликвидации явлений наростообразования на инструменте.

Наименее исследованным является промежуточный диапазон колебаний с частотами $f=3-14$ кГц.

Колебания всех рассмотренных частот могут облегчать процесс резания, так как всякой пластической деформации по природе присущи колебания. Однако одновременно колебания воздействуют на материал инструмента, повышая его усталостное разрушение под действием высокочастотных переменных нагрузок, которые увеличиваются с ростом амплитуд и частот. Усталостное разрушение проявляется в виде разрыхления кобальтовой прослойки твердого сплава, выкрашивания режущих зерен карбидов, появления микра и макротрещин. Поэтому для каждой из частотных зон колебаний существует уровень амплитуд, при котором более значительно облегчается процесс резания, но не наступает еще заметного усталостного разрушения инструмента. Этот уровень амплитуд колебаний по критерию стойкости является оптимальным. Как увеличение, так и уменьшение амплитуд по сравнению с ним будет вызывать ухудшение обрабатываемости. Этим объясняется экстремальный характер зависимости стойкости от амплитуды колебаний для всех исследованных процессов резания.

Экспериментальные исследования зависимости стойкости инструмента от амплитуды колебаний при вибрационном точении производили с возбуждением направленных колебаний в двух частотных диапазонах: низкочастотном ($f=8-100$ Гц) и высокочастотном ($f=1800-2100$ Гц). Обрабатывались заготовки из коррозионно-стойкой стали Х18Н9Т. Материал режущей части инструмента ВК8. За критерий затупления принимали износ по задней поверхности $h_z=0,4$ мм. Величину износа определяли с помощью микроскопа. Обработка велась на режимах резания: $t=1,5$ мм; $S=0,25-0,35$ мм/об; $V=70-80$ м/мин без применения СОТС.

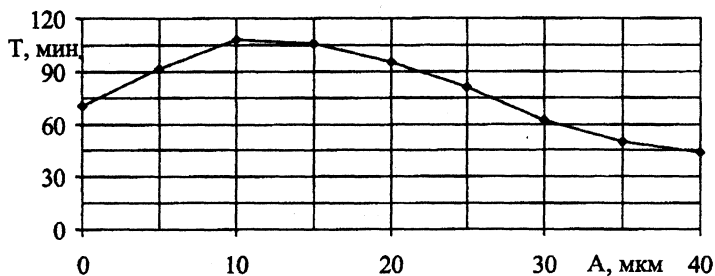


Рис. 1. Зависимость стойкости инструмента T от амплитуды автоколебаний A при частотах 1800–2100 Гц.

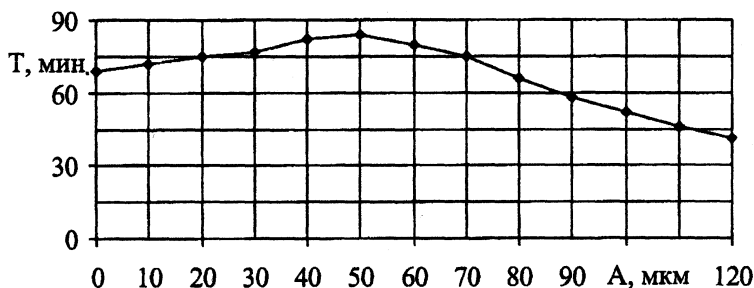


Рис. 2. Зависимость стойкости инструмента T от амплитуды автоколебаний A при частотах 8–100 Гц.

На рис. 1 и 2 представлены экспериментальные зависимости стойкости инструмента от амплитуды автоколебаний для различных диапазонов частот. Как видно из графиков, наибольшая стойкость резцов наблюдается при амплитуде

$A_{\text{опт}} = 8-15$ мкм в диапазоне частот $f=1800-2100$ Гц и при амплитуде 40–60 мм и частотах $f=8-100$ Гц. Как увеличение, так и уменьшение амплитуды колебаний приводит к заметному снижению стойкости инструмента.

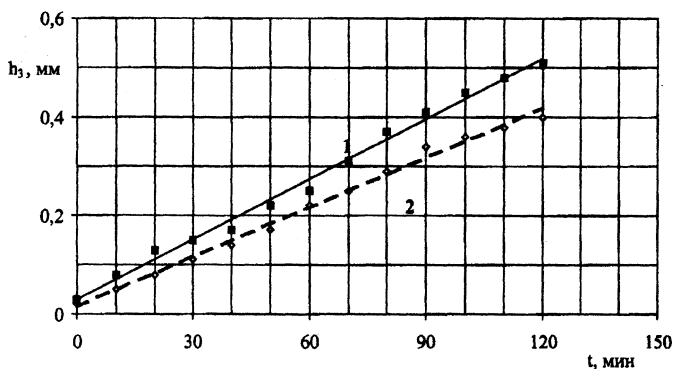


Рис. 3. Зависимость ширины площадки износа по задней поверхности h_3 от времени обработки t : 1 – обычное точение; 2 – точение с направленными автоколебаниями.

На рис. 3 представлены результаты сравнительных исследований износа резцов при обычном точении и с возбуждением автоколебаний в направлении подачи. Обрабатывались заготовки из стали 45 резцами с материалом режущей части T15K6 на режимах резания: $t=1,5$ мм; $S=0,25$ мм/об; $V=80-100$ м/мин. без применения СОТС. Результаты испытаний показали, что стойкость резцов при вибрационном точении с направленными колебаниями повышается на 20–30% (при работе с оптимальной амплитудой).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение., 1986. – 184 с.
2. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. – М.: Машиностроение, 1970. – 352 с.

К ВОПРОСУ О МЕТОДИКЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, СФОРМИРОВАННЫХ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ ПО РАЗЛИЧНЫМ СХЕМАМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

*Гомельский Государственный технический университет им. П.О.Сухого
Гомель, Беларусь*

Современные конструкции станков с ЧПУ позволяют реализовать как отдельные способы обработки, так и комбинированные с различными схемами формообразования. Такие возможности открываются при использовании многоцелевых станков, обеспечивающих скорости рабочих подач до 50 м/мин., а частоты вращения шпинделя – до 12000 об/мин. Реализация комбинированных способов расширяет возможности технологического проектирования поверхностей деталей с заданными физико-механическими и топографическими показателями. Знание топографии обработанных поверхностей расширяет возможности моделирования контактных статических, кинематических и динамических задач. Вследствие сложности описания обработанных поверхностей моделировать их можно последовательно, в несколько методических этапов. Для реализации этого подхода были введены методические виды обработанных поверхностей: кинематическая, статическая и динамическая [1].

Для облегчения моделирования кинематических поверхностей их можно разбить на отдельные локальные отсеки в дифференциальной окрестности рассматриваемой точки. Классифицировать кинематические поверхности сложно, так как любая поверхность имеет участки гладкие регулярные и участки с особыми точками и линиями. Поэтому возникает необходимость систематизировать эти участки по типу точек, в дифференциальной окрестности которых они расположены [1-4 и др.].

Можно выделить следующие типы локальных отсеков кинематической поверхности:

а) гладкие регулярные локальные отсеки. К этому типу относятся локальные микроучастки кинематических поверхностей, полученные по всем схемам формообразования и расположенные в дифференциальной окрестности точек на поверхности (рис.1, а);

б) гладкие нерегулярные локальные отсеки. К этому типу относятся локальные отсеки выхода и входа формообразующих кромок при формировании закрытых поверхностей. Такие микроучастки располагаются в дифференциальной окрестно-

сти точек линий сопряжений (стыка) двух гладких регулярных отсеков, причем в окрестности только таких точек, в которых при переходе через линию касания указанных отсеков поверхности детали направление касательной не изменяется на противоположное (рис.1, б);

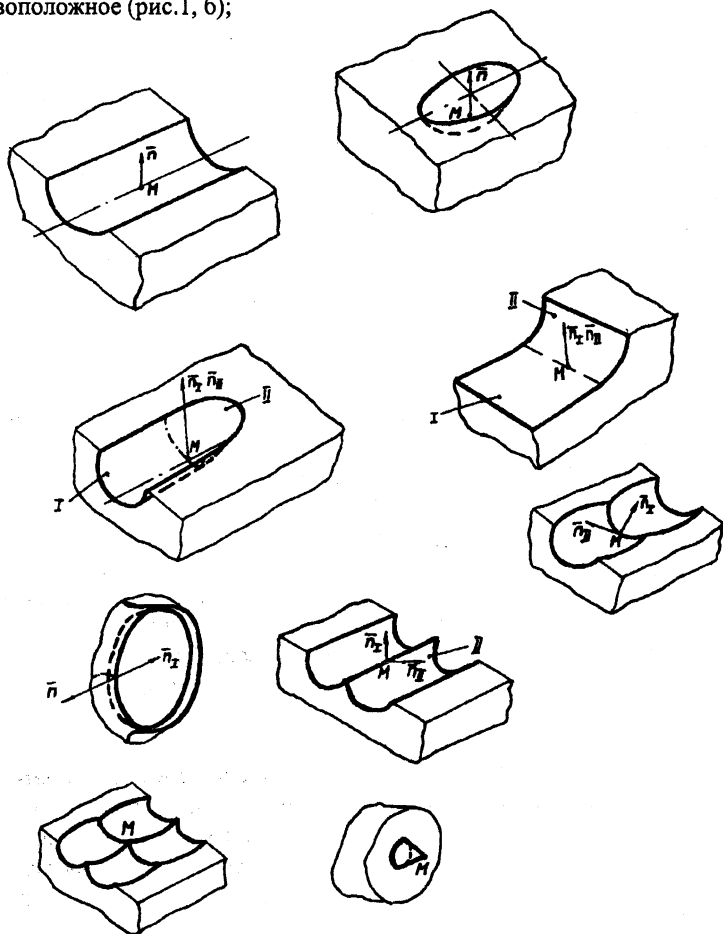


Рис. 1. Эскизы локальных отсеков кинематических поверхностей.

в) локальные отсеки возврата. К этому типу относятся нерегулярные локальные микроучастки, образующиеся при обработке полых осесимметричных деталей. Такие микроучастки располагаются в дифференциальной окрестности точек линии возврата двух касающихся друг друга локальных отсеков поверхности, причем

в окрестности только таких точек, в которых при переходе через линию касания указанных отсеков направление касательной изменяется на противоположное, когда имеет место обратное касание двух отсеков (рис.1, в);

г) локальные отсеки излома. К этому типу относятся нерегулярные локальные микроучастки, образующиеся при формировании характеристических линий номинальных поверхностей по схеме огибания. Они располагаются в дифференциальной окрестности точек линии пересечения двух гладких регулярных локальных отсеков кинематической поверхности (рис.1, г);

д) особые локальные отсеки. К этому типу относятся нерегулярные изолированные локальные микроучастки, образующиеся при обработке поверхностей осесимметричных деталей на токарных операциях формообразующими кромками с углами в плане не равными нулю или при получении поверхностей по схеме огибания. Эти участки располагаются в дифференциальной окрестности изолированных, особых точек поверхности (конических точек, особых точек первого, второго и более высоких порядков), гладких нерегулярных особых точек; точек касания, пересечения или касания одновременно трех и более гладких регулярных отсеков кинематических поверхностей и т.п. (рис.1, д).

Рассмотрим методику моделирования кинематических поверхностей, сформированных по различным схемам формообразования.

Наибольшее распространение получил метод, описывающий поверхность или ее локальные отсеки уравнениями, связывающими декартовы координаты точек

$$F(x, y, z) = 0; z = z(x, y). \quad (1)$$

В практике проектирования инструмента [5–7 и др.] широко используется более общее аналитическое представление, введенное К.Ф. Гауссом. Оно основано на том, что все координаты точек поверхности выражаются через два независимых параметра u и v :

$$x = x(u, v); y = y(u, v); z = z(u, v). \quad (2)$$

Тогда поверхность можно задать в виде

$$r = r(u, v) = x(u, v) i + y(u, v) j + z(u, v) k, \quad (3)$$

где r – радиус-вектор точки поверхности.

Например, запишем уравнение кинематической поверхности в параметрической форме если:

$x = Cu$; уравнения формообразующей кромки инструмента, а $y = Cv$;
 $z = -D/C - Au - Bv$ – уравнение траектории ее движения. Тогда

$$r = \{Cu, Cv, -D/C - Au - Bv\} = \{0, 0, -D/C\} + u\{C, 0, -A\} + v\{0, C, -B\}.$$

Таким образом, u и v – общие координаты точки M плоскости с началом координат в точке $(0, 0, -D/C)$ и масштабными векторами $e_x = \{C, 0, -A\}$ и $e_y = \{0, C, -B\}$.

Уравнения (2) и (3) задают поверхность только в том случае, когда u и v независимые параметры. Необходимым и достаточным условием зависимости u и v явля-

ется коллинеарность векторов $\partial \tau / \partial u$ и $\partial \tau / \partial v$ в каждой точке поверхности, т.е. равенство нулю в каждой точке поверхности векторного произведения

$$\partial \tau / \partial u \times \partial \tau / \partial v = 0.$$

Требование независимости параметров u и v предполагает, что векторное произведение ортов касательных к координатным линиям однозначно определяет орт нормали n к поверхности в точке M .

Для облегчения моделирования кинематической поверхности, сформированной по схеме следа, можно воспользоваться простым выражением:

$$z = f_1(x) + f_2(y), \quad (4)$$

где $f_1(x)$ – уравнение формообразующей кромки инструмента;

$f_2(y)$ – уравнение траектории движения формообразования.

Поверхности вращения, образованные по схеме следа, можно получить, если в выражение, описывающее формообразующую кромку инструмента $z = f(x)$, подставить вместо x выражение

$$\sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (5)$$

Например, запишем уравнение кинематической поверхности при условии, что формообразующая кромка инструмента описывается уравнением $z = -c/a x + c$, а траектория движений формообразования – $z = -c/b y + c$.

Преобразовав эти уравнения к виду $z - c = -(c/a)x$; $z - c = -(c/b)y$, получим согласно (4) уравнение кинематической поверхности $x/a + y/b + z/c = 1$, что соответствует плоскости общего положения.

Запишем уравнение поверхности вращения для случая, когда формообразующая кромка инструмента задана уравнением $x^2/a^2 - z^2/b^2 = 1$. Тогда уравнение поверхности будет иметь вид

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = 1.$$

Как известно, это уравнение, описывающее поверхность однополостного гиперболоида.

Если формообразующую кромку не удастся описать простым аналитическим выражением, то необходимо попытаться описать ее многочленом второй степени. Коэффициенты многочлена можно определить из граничных условий. Кинематическая поверхность, образованная такой кромкой, также будет описываться аналогичного вида многочленом:

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0, \quad (6)$$

или

$$(a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14})x + (a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24})y + (a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z + a_{34})z + a_{41}x + a_{42}y + a_{43}z + a_{44} = 0, \quad (7)$$

где $a_{ik} = a_{ki}$; $i, k = 1, 2, 3, 4$.

Уравнение (7) можно записать в векторной форме:

$$\bar{r} A \bar{r}^T + 2a \bar{r}^T + a_{44} = 0,$$

где A – аффинор с координатами $A^i_k = a_{ik}$.

Так как уравнением (6) затруднительно пользоваться, то его можно свести к частным уравнениям простейших поверхностей путём соответствующих поворотов и переносов осей координат хуз.

При формировании поверхности по комбинированной схеме моделирование ее зависит от способа реализации этой схемы. Если образующая поверхности формируется по схеме следа, а направляющая – по схеме огибания, то достаточно моделировать один локальный отсек и записать поверхность в параметрическом виде

$$F(xyz) = 0. \quad (8)$$

Локальные отсеки могут быть описаны уравнениями, ранее полученными для поверхностей, сформированных по схеме следа.

Если же образующая кинематической поверхности формируется по схеме огибания, а направляющая – по схеме следа, то вид уравнений кинематической поверхности зависит от количества формообразующих кромок и вида траектории их движений. В случае одной формообразующей кромки поверхность может быть сформирована за один или несколько проходов. Такая поверхность состоит из локальных отсеков, и описывающее ее уравнение можно получить в параметрическом виде. Для этого необходимо записать уравнение формообразующей кромки в виде (1) или (2), а уравнение траектории движения формообразования – в виде (1, 3) и в зависимости от формы направляющей получить уравнение кинематической поверхности в виде уравнений (4) или (5).

Свойства любой поверхности, описываемой уравнением (6), можно определить, используя теорию инвариантов.

Уравнение (6) можно также привести к каноническому виду (5,6,8). При параллельном переносе системы координат на вектор r_0 , координаты которого удовлетворяют уравнению $A r_0 = -a$, в уравнении (6) исчезают линейные члены, и оно принимает вид

$$b_{11} x_1^2 + b_{22} y_1^2 + b_{33} z_1^2 + 2b_{12} x_1 y_1 + 2b_{13} x_1 z_1 + 2b_{23} y_1 z_1 + b_{44} = 0, \quad (9)$$

где x_1, y_1, z_1 – координаты точки поверхности относительно новой систем Σ_1 . В матричной форме уравнение (9) можно записать в виде

$$r_1 B r_1^T + b_{44} = 0; \quad r_1 = (x_1, y_1, z_1); \quad B = \|b_{ij}\|.$$

В результате такого переноса начало новой системы координат является центром симметрии поверхности, т.е. если $r_1 = (x_1, y_1, z_1)$ – точка поверхности, то $-r_1 = (-x_1, -y_1, -z_1)$ – также точка поверхности. Матрицы A и B – симметрические ($a_{ij} = a_{ji}$ и $b_{ij} = b_{ji}$), поэтому их собственные значения действительны, а собственные векторы ортогональны. При последующем преобразовании к системе координат

Σ_2 с началом координат, совпадающим с системой Σ_1 , и осями координат, совпадающими по направлению с собственными векторами, уравнение поверхности 2-го порядка приобретает вид

$$\lambda_1 x_2^2 + \lambda_2 y_2^2 + \nabla z_2^2 + c_{44} = 0, \quad (10)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – собственные значения матрицы B .

В матричной форме уравнение (10) примет вид

$$r_2 C r_2^T + c_{44} = 0, \quad r_2^T = (x_2, y_2, z_2),$$

$$C = \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{vmatrix},$$

где x_2, y_2, z_2 – координаты точки на поверхности 2-го порядка относительно Σ_2 .

При определении кинематической погрешности поверхности возникает потребность не только в ее аналитическом представлении, но и в определении касательной плоскости и расположения поверхности относительно декартовой системы координат.

Как известно [8 – 10], уравнение касательной плоскости в неособой точке (x_0, y_0, z_0) имеет вид

$$F_x'(x_0, y_0, z_0)(x-x_0) + F_y'(x_0, y_0, z_0)(y-y_0) + F_z'(x_0, y_0, z_0)(z-z_0) = 0, \quad (11)$$

где $F_x'(x_0, y_0, z_0)$, $F_y'(x_0, y_0, z_0)$, $F_z'(x_0, y_0, z_0)$ – частные производные по x , y и z уравнения (6).

Если не удастся записать аналитическое выражение, описывающее кинематическую поверхность, то ее можно задать каркасно. Из дискретных способов задания поверхностей наиболее разработанным является графический способ ботаксов и ватерлиний. Этот способ [11] заключается в построении системы параллельных сечений поверхности в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях. По рассматриваемому способу поверхности задаются определенным способом расположенной системой линий на ней. Такой подход нашел развитие в работах Д.А. Вильямса, И.И. Котова, В.А. Осипова, Д.В. Павлова, Н.Н. Рыжова, С.А. Фролова и др. В практике машиностроения дискретно заданную поверхность полностью или по частям аппроксимируют аналитическими функциями, чаще всего сплайнами [12,13] Наибольшее распространение получили кубические сплайн-функции, которые обладают хорошими аппроксимативными свойствами, что обеспечивает высокую точность воспроизведения поверхности (при достаточной простоте реализации на ЭВМ), универсальностью, позволяющей использовать одни и те же аппроксимирующие конструкции для различных типов сложных поверхностей.

При аппроксимации следует стремиться минимизировать число аппроксимирующих отсеков путем увеличения площади каждого из них, рациональной их взаим-

ной ориентации и обязательном обеспечении заданной точности. Изменение параметризации формообразуемой поверхности детали с помощью уравнения $u' = u'(u, v)$ и $v' = v'(u, v)$ приводит к первым производным уравнения поверхности

$$\frac{\partial \bar{r}}{\partial u'} = \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial u'} + \frac{\partial \bar{r}}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial u'}; \quad \frac{\partial \bar{r}}{\partial v'} = \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v'} + \frac{\partial \bar{r}}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial v'} \quad (12)$$

С учетом того, что

$$\dot{\bar{r}} = \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \dot{u} + \frac{\partial \bar{r}}{\partial v} \dot{v} = u \det [A],$$

где $[A] = [\partial \bar{r} / \partial u \quad \partial \bar{r} / \partial v]$,

из (12) следует, что

$$[A'] = [\partial \bar{r} / \partial u' \quad \partial \bar{r} / \partial v'] = [A][P],$$

где $[P] = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial u'} & \frac{\partial v}{\partial u'} \\ \frac{\partial u}{\partial v'} & \frac{\partial v}{\partial v'} \end{vmatrix}$ – матрица преобразования Якоби.

Поскольку для исходной (u, v) – параметризации формообразуемого отсека поверхности фундаментальная матрица основной квадратичной формы (Гаусса) равна

$$[G] = \begin{bmatrix} A^T \\ A \end{bmatrix} [A] = \begin{vmatrix} \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} & \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \frac{\partial \bar{r}}{\partial v} \\ \frac{\partial \bar{r}}{\partial v} \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} & \frac{\partial \bar{r}}{\partial v} \frac{\partial \bar{r}}{\partial v} \end{vmatrix}, \quad (13)$$

аналогичная матрица для новой (u', v') - параметризации того же отсека задаётся соотношением

$$[G'] = [A']^T [A'] = [P]^T [A]^T [A] [P] = [P]^T [G] [P] \quad (14)$$

Из уравнения (14) согласно известным свойствам детерминантов имеем $\det [G'] = \det [P]^2 \det [G]$.

Тогда из системы (12) следует, что вектор n единичной нормали к формообразуемой поверхности детали в результате преобразований не меняется.

Аналогично дифференцируя (12) и используя свойство инвариантности вектора n по отношению к виду параметризации, можно показать, что фундаментальную матрицу второй основной квадратичной формы можно преобразовать соотношением [2–4]

$$[D'] = [P]^T [D][P]. \quad (15)$$

По уравнениям (14) и (15) можно показать, что главные радиусы кривизны поверхности детали инварианты по отношению к способу параметризации формообразуемой поверхности детали.

Выводы. Предложенная классификация обработанных поверхностей обеспечивает системный подход к их моделированию, а введенная классификация кинематических поверхностей позволяет систематизировать их и облегчает применение известных аналитических моделей локальных отсеков для моделирования всей поверхности. Кроме того, предложенная методика последовательного моделирования значительно облегчает аналитическое описание широкого класса кинематических поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов М.И. Формообразование угловых поверхностей концевыми фрезами / Тез. докл. МНТК «Технические вузы – республике» – Мн.: БГПА, 1997 – С. 52.
2. Радзевич С.П. Новые достижения в области обработки деталей сложной формы на станках с ЧПУ. – М.: ВНИИТЭМР, 1987. – 48 с.
3. Позняк Э.Г., Шикин Е.В. Дифференциальная геометрия (первое знакомство). – М.: Из-во МГУ, 1990. – 384 с.
4. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. – М.: Наука, 1969. – 176 с.
5. Дружинский А.И. Сложные поверхности: математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1985. – 263 с.
6. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорезающих инструментов с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1975. – 392 с.
7. Лашнев С.И., Юликов М.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1980. – 208 с.
8. Моденов П.С. Аналитическая геометрия. – М.: МГУ, 1969. – 698 с.
9. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.
10. Ребане Ю.К., Портман В.Т., Тарамыкин Ю.П. Теория огибания и современные вычислительные методы при технологической подготовке зубообработки и проектировании зуборезных станков // Вестник машиностроения. 1995. №8. С. 42–45.
11. Armarego E.V.A., Rotenderg A. An investigation of drill point sharpening by the straight lip conical grinding method / Jnt. J.Mach. Tool Des. and Res., 1973, 13, №3, p.155–164.
12. Стрельченко О.А. Установление взаимно-однозначного соответствия между двумя семействами сетей на поверхности // Прикладная геометрия и инженерная графика. Вып. 35. – Киев: Будівельник, 1983. – с. 50–52.
13. Математика и САПР: В 2-х кн. Кн.1. Пер. с франц. / Шенен П., Гардан И. и др. – М.: Мир, 1988. – 204 с.

ТОЧЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С ПЕРЕМЕННОЙ ГЛУБИНОЙ РЕЗАНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Решение задачи оптимизации параметров режима резания при токарной обработке материалов неразрывно связано с необходимостью получения математических моделей периода стойкости и износа режущего инструмента. Большинство из известных теоретических и эмпирических моделей получены для стационарных процессов резания, характеризующихся постоянством средних значений (математических ожиданий) и полей рассеяния (дисперсий) внешних воздействий (глубины резания, подачи, скорости резания и т.д.) за период стойкости инструмента. Однако при точении деталей сложной формы (конической, сферической, эллиптической, фасонной и т.д.) для обеспечения постоянства глубины резания требуется предварительная механическая обработка детали или получение заготовки методом профильной штамповки, прокатки, литья и т.п. Но во многих случаях, особенно при обработке на станках с ЧПУ, точение сложных поверхностей целесообразно осуществлять с переменной глубиной резания, определяемой простой конфигурацией заготовки, чаще всего цилиндрической формы, и контуром готовой детали. В этом случае процесс точения является частным случаем нестационарного резания, отличающегося тем, что глубина резания изменяется непрерывно в течение рабочего хода инструмента.

В работе [1] получены исходные зависимости для определения периода стойкости T и величины износа резца h при точении с переменным режимом резания в виде

$$T = \frac{\tau_k - \tau_n}{\frac{1}{C_T} \int_{\tau_n}^{\tau_k} \frac{d\tau}{t^x s^y v^\mu}}; \quad (1)$$

$$h = C_h \int_{\tau_n}^{\tau_k} t^q s^u v^m d\tau, \quad (2)$$

где t, s, v — соответственно глубина резания, подача вдоль образующей линии обрабатываемой поверхности и скорость резания;

$C_T, C_h, x, y, \mu, q, u, m$ – эмпирические параметры в степенных зависимостях для определения периода стойкости и скорости изнашивания резца при стационарном резании, т.е. $T = C_T t^x s^y v^\mu$ и $V_h = C_h t^q s^u v^m$;

τ_k и τ_n – соответственно время конца и начала обработки элементарной поверхности.

При $s = \text{const}$ и $v = \text{const}$ из (1) и (2) следует:

$$T = C_T s^y v^\mu \frac{\tau_k - \tau_n}{\int_{\tau_n}^{\tau_k} \frac{d\tau}{t^x}}; \quad (3)$$

$$h = C_h s^u v^m \int_{\tau_n}^{\tau_k} t^q d\tau. \quad (4)$$

При точении конической поверхности (рис. 1) глубина резания определяется соотношением

$$t = \frac{\cos \alpha}{2} (D - d),$$

где D – диаметр заготовки;

d – диаметр обрабатываемой поверхности в момент времени τ ;

α – половина угла конуса.

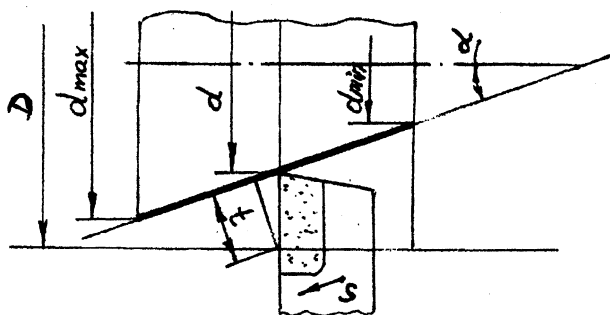


Рис. 1. Точение конической поверхности с переменной глубиной резания.

Зависимость между d и τ выражается уравнением

$$d = 2n\tau \sin \alpha,$$

где n – частота вращения конической детали, мин^{-1} ;
 s – подача на оборот обрабатываемой детали, мм/об .
 Тогда

$$\tau = \frac{d}{2ns \sin \alpha}; \tau_n = \frac{d_{\min}}{2ns \sin \alpha}; \tau_k = \frac{d_{\max}}{2ns \sin \alpha}, \quad (5)$$

где $d_{\min}$ и $d_{\max}$ – соответственно минимальный и максимальный диаметры обрабатываемой детали.

Из уравнений (3) – (5) с учетом соотношения $n = 1000v/\pi D$ после интегрирования получаем математические модели периода стойкости и износа инструмента при точении конической поверхности с переменной глубиной резания:

$$T = C_T s^y v^\mu \frac{\cos^x \alpha (1-x)(d_{\max} - d_{\min})}{2^x [(D - d_{\max})^{1-x} (D - d_{\min})^{1-x}]}; \quad (6)$$

$$h = C_h s^{u-1} v^{m-1} \frac{\pi D \cos^{q+1} \alpha}{10^3 \times 2^q (q+1) \sin 2\alpha} [(D - d_{\max})^{q+1} - (D - d_{\min})^{q+1}] \quad (7)$$

Если обозначить

$$t_{\text{экв}} = \left\{ \frac{\cos^x \alpha (1-x)(d_{\max} - d_{\min})}{2^x [(D - d_{\max})^{1-x} - (D - d_{\min})^{1-x}]} \right\}^{x^{-1}},$$

где $t_{\text{экв}}$ – эквивалентная глубина резания,
 то получим формулу для определения периода стойкости резца при точении конической поверхности с переменной глубиной резания, аналогичную зависимости Ф. Тейлора:

$$T_{\text{экв}} = C_T t_{\text{экв}}^x s^y v^\mu.$$

Аналогичным образом получены математические модели при точении сферической поверхности с переменной глубиной резания

$$T = C_T s^y v^\mu \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{2^x \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \frac{d\alpha}{\{[D - 2(R \sin \alpha + e)] \sin \alpha\}^x}}; \quad (8)$$

$$h = C_h s^u v^{m-1} \frac{\pi DR}{10^3 \times 2^q} \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \{ [D - 2(R \sin \alpha + e)] \sin \alpha \}^q d\alpha, \quad (9)$$

где R – радиус дуги сферовидной поверхности;

e – расстояние между осью вращения сферовидной поверхности и осью образующей сферической поверхности;

α – угол между осью вращения сферовидной поверхности и линией, проходящей через центр образующей сферической поверхности и вершину резца (рис. 2).

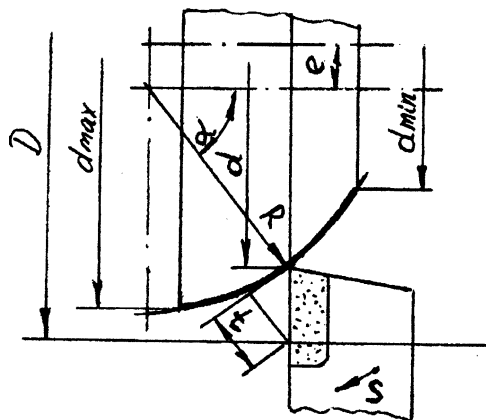


Рис. 2. Точение сферовидной поверхности с переменной глубиной резания.

Значения $\alpha_{\min}$ и $\alpha_{\max}$ определяются по формулам

$$\alpha_{\min} = \arcsin \frac{d_{\min} - 2e}{2R}; \quad \alpha_{\max} = \arcsin \frac{d_{\max} - 2e}{2R}.$$

Если $e=0$, то из формул (8) и (9) получим математические модели для точения сферической поверхности. Численные значения T и h определяются методами приближенного интегрирования или с помощью ЭВМ.

Аналогичные зависимости получены при точении параболических, гиперболических и др. элементарных поверхностей, а также деталей сложной формы, представляющих собой совокупность элементарных поверхностей, включая многопроходную обработку в условиях нестационарного режима резания.

В общем случае при точении из исходной цилиндрической заготовки элементарной поверхности, образующая которой описана уравнением $Y=f(X)$, математические модели периода стойкости и износа инструмента имеют вид:

$$T = C_T s^\gamma v^\mu \frac{\int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dX}{2^x \int_{x_n}^{x_k} \frac{\sqrt{1 + [f'(X)]^2} dX}{\{[D - 2f(X)] \cos[\arctg f'(X)]\}^x}},$$

$$h = C_h s^\eta v^m \frac{1}{2^q n s} \int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} \{[D - 2f(X)] \cos[\arctg f'(X)]\}^q dX,$$

где x_n и x_k – координаты вершины резца, соответствующие началу и концу обработки элементарной поверхности.

Значения x_n и x_k определяются соотношениями

$$x_n = F\left(\frac{d_{\max}}{2} - e\right); \quad x_k = F\left(\frac{d_{\min}}{2} - e\right),$$

где F – обратная функция от $Y=f(X)$.

Экспериментальная проверка полученных зависимостей производилась при точении конуса из цилиндрического прутка длиной 100 мм (материал прутка – сталь 45, HB = 215; материал резца – Т15К6, $\varphi = 60^\circ$, $\varphi_1 = 30^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\gamma = 7^\circ$, $\lambda = 0^\circ$), $n = 500$ мин⁻¹; $s = 0,2$ мм/об; $D = 90$ мм; $d_{\min} = 84$ мм; $d_{\max} = 89$ мм. Расчетные значения T и h , определенные по моделям (6) и (7), составили соответственно 168 мин и 0,09 мм. Экспериментальные значения математического ожидания T и h составили 156,2 мин. и 0,097 мм. В результате погрешность расчета не превышает 10,3 %, что свидетельствует о высокой точности полученных моделей.

Полученные зависимости позволяют оптимизировать методами математического моделирования параметры режима резания при обработке деталей сложной формы на токарных многоцелевых станках. Математическая оптимизационная модель обеспечивает получение максимальной производительности и минимальных затрат на обработку, а также оптимального варианта съема припуска. Оптимальные параметры режима резания и производительность обработки определяются свойствами обрабатываемого материала и инструмента, а также возможностями станка через уравнения связи $P=f_1(t, s, v)$ и $T=f_2(t, s, v)$, где P – мощность привода главного движения. Математические модели для T и h позволяют рассчитать ресурс режущего инструмента при обработке деталей с переменным режимом резания. Тем самым создаются возможности для оптимизации управления инструментом в инструментальных системах автоматизированного производства.

ЛИТЕРАТУРА

Ящерицын П. И., Туромша В. И., Чан Ким Тоан. Период стойкости и износ резцов при нестационарном резании на токарных станках с ЧПУ. // Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1993. №4. С. 40–48.

ВЛИЯНИЕ ТОНКОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СТАЛЕЙ НА ИХ ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ РЕЗАНИЕМ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Проведенными ранее исследованиями была установлена достаточно тесная взаимосвязь между показателями обрабатываемости и основными физико-механическими свойствами материалов. Вместе с тем, известно, что для состояния высокой прочности сталей характерно наличие больших искажений кристаллической решетки и дисперсности кристаллитов составляющих фаз, а разупрочнение сопровождается уменьшением кристаллической решетки и укрупнением блоков основного твердого раствора (матрицы) и выделяющейся фазы. Поскольку от тонкой кристаллической структуры (плотности дислокаций, величины блоков мозаики, степени искажения кристаллической решетки и т.п.) зависит большинство технически важных свойств металлов и сплавов, авторами была поставлена задача выявить ее влияние на основные показатели обрабатываемости. Опыты проводились на образцах из сталей 20ХН3А, ШХ15, 38ХМЮА, прошедших различную термическую обработку по специальному плану. Ниже в табл. 1 приводятся режимы термообработки этих сталей.

Таблица 1

Режимы термической обработки исследуемых сталей

Марка стали	Температура нагрева, Т, °С	Время выдержки, т, мин	Способ охлаждения
20ХН3А	840; 860; 880	6, 8 и 10 часов	В струе воздуха; на спокойном воздухе; вместе с печью до Т=500°С, а затем на спокойном воздухе
ШХ15	Закалка: 840°С в соляной ванне (BaCl ₂ + NaCl); отпуск: 150; 200; 250°С	60 мин 2; 2,5; 3 часа	В масле при Т=30–60°С В масле
38ХМЮА	Нормализация: 900; 950; 1000°С	40; 50; 60 мин	На спокойном воздухе

Тонкая кристаллическая структура сталей оценивалась по изменению суммарной ширины рентгеновских линий. Съемка образцов проводилась в кобальтовом монохроматическом излучении на дифрактометре ДРОН-2,0. Были сняты отражения от кристаллографических плоскостей (110) α , (220) α , (111) γ . Под суммарной шириной рентгеновских линий принималась общая ширина, вызванная как геометрическими условиями съемки (расстоянием от образца до детектора, скоростью вращения образца, скоростью перемещения диаграммной ленты, шириной щелей и т. п.), так и физическими факторами исследуемых образцов. Скорость вращения составляла 1 градус в минуту, скорость перемещения бумаги – 2400 мм/час, ширина щелей: №1 – 0,5 мм, №2 – 8 мм, №3 – 0,25 мм.

Интенсивность излучения каждый раз перед началом работы проверялась по монокристаллу кварца.

Поскольку геометрические условия съемки сохранялись постоянными для всех материалов, то можно считать, что зафиксированные значения ширины рентгеновских линий обусловлены только физическими факторами.

Площадь рентгенограммы определялась планиметрированием, а ширина рентгеновских максимумов – как частное от деления измеренной площади, ограниченной кривой распределения интенсивности и фоном, на высоту максимума. Износ резцов из быстрорежущей стали Р6М5 с геометрическими параметрами $\gamma=10^\circ$, $\alpha=12^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\varphi_1=15^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $r=0,3$ мм изучался при поперечном точении образцов из стали 20ХН3А от центра к периферии без применения смазывающе-охлаждающей жидкости на токарно-винторезном станке 16К20 на двух режимах: глубина резания $t=0,25$ мм, подача $s=0,08$ мм/об, скорости резания $V_1=30$ м/мин и $V_2=60$ м/мин. Ширина фаски износа по задней грани измерялась на инструментальном микроскопе после каждого из пяти проходов (рис. 1). При этом одним резцом обрабатывалась только одна деталь, затем резцы независимо от степени их износа перетачивались на универсально-заточном станке.

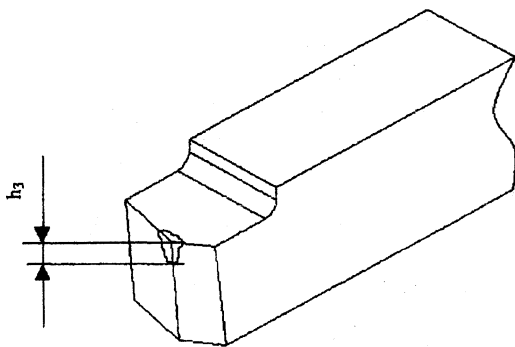


Рис. 1. Ширина фаски износа по задней грани.

Эксперименты по определению сил резания и средней температуры резания выполнялись одновременно на том же станке при продольном точении образцов из всех указанных выше сталей резцами с механическим креплением трехгранных пластин из твердого сплава Т15К6 ($\varphi=92^\circ$, $\gamma=19^\circ30'$, $\alpha=5^\circ30'$) без применения смазывающе-охлаждающей жидкости. Измерялись силы резания с помощью универсального динамометра УДМ-600. Возникающая при точении температура определялась по методу естественной термопары. Величина электродвижущей силы регистрировалась милливольтметром. Для большей достоверности опыты повторялись три раза. Режимы резания при определении влияния тонкой кристаллической структуры на P_z , P_y , P_x и Θ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы резания при определении влияния тонкой кристаллической структуры на силы P_z , P_y , P_x и температуру резания Θ

Марка стали	Глубина резания, t , мм	Подача, s , мм/об	Скорость резания, V , м/мин
20ХН3А	0,3	$s_1=0,08$; $s_2=0,47$	$V_1=30$; $V_2=60$
38ХМЮА	1,0	$s_1=0,07$; $s_2=0,47$;	97
ШХ15	0,3	$s_1=0,07$; $s_2=0,14$;	19,5

Влияние тонкой кристаллической структуры на шероховатость поверхности оценивалось при точении образцов из стали 20ХН3А на токарно-винторезном станке мод. 1616 резцами из быстрорежущей стали Р6М5 с геометрическими параметрами $\gamma=10^\circ$, $\alpha=12^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\varphi_1=15^\circ$, $\lambda=0^\circ$ на режимах $t=0,25$ мм, $s=0,08$ мм/об, $V=60$ м/мин, а из стали 38ХМЮА – после продольного точения резцами с механическим креплением пластин Т15К6 (Р20) на режимах: $t=1$ мм, $s_1=0,07$ мм/об, $s_2=0,47$ мм/об, $V=60$ м/мин. В обоих случаях смазывающе-охлаждающая жидкость не применялась.

С целью уменьшения влияния износа резцов на шероховатость поверхности среднее арифметическое отклонение профиля R_a и относительная опорная длина профиля на уровне сечения 20% измерялись на профилографе-профилометре мод. 252 во всех случаях только после первого прохода.

Из теории известно, что ширина линии $(110)\alpha$ характеризует изменение плотности дислокаций и величину блоков мозаики, а ширина линии $(220)\alpha$ – уровень искаженности кристаллической решетки материала.

При повышении температуры нагрева T и времени выдержки t ширина линии $(110)\alpha$ должна уменьшаться, т.к. блоки мозаики растут. При изменении одного из параметров, T или t , и неизменности второго в принципе должна наблюдаться

одинаковая тенденция: ширина передней линии уменьшается, что свидетельствует об уменьшении плотности дислокаций и увеличении блоков мозаики. Уменьшение ширины линии $(220)\alpha$ с увеличением либо температуры нагрева, либо времени выдержки при неизменности второго параметра свидетельствует об уменьшении искажений в кристаллической решетке.

При охлаждении образцов вместе с печью до 500°C , а затем на спокойном воздухе (1 режим) структурные превращения успевают произойти полностью, поэтому остаточный аустенит (ОА) отсутствует, превращение γ -железа в α -железо происходит полностью. Хотя утверждать о полном отсутствии ОА нельзя, т.к. данный способ фиксирует наличие ОА в том случае, если его содержание в структуре более 3–5%.

В случае охлаждения образцов на спокойном воздухе (3 режим) получается структура с присутствием бейнита (о чем свидетельствует более высокая твердость по сравнению с первым режимом охлаждения), что непременно сказывается на полноте превращения $\gamma \rightarrow \alpha$. При этом был обнаружен ОА.

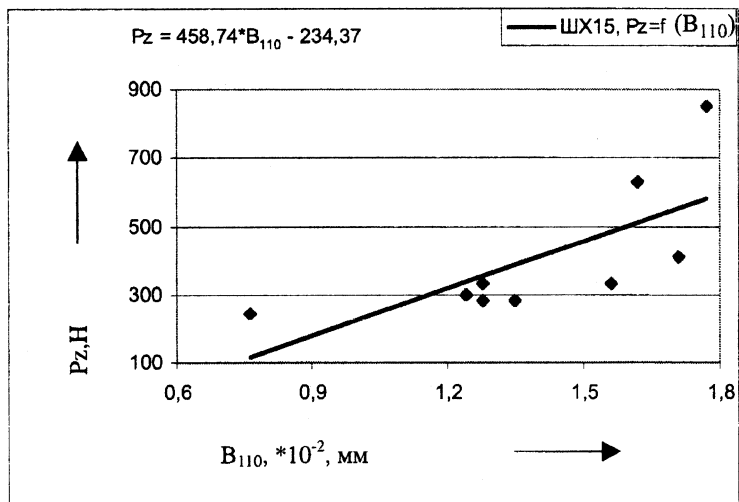


Рис. 2. Зависимость силы резания P_z от ширины линии B_{110} .

О том, что кристаллическая решетка более напряжена по сравнению с первым режимом охлаждения, свидетельствует возрастание ширины задней линии $(220)\alpha$. Ширина линии $(110)\alpha$ тоже больше, что косвенно подтверждает то, что конечная величина блоков мозаики при тех же термических параметрах выше (не хватает времени, чтобы они выросли).

Наконец, более жесткие условия охлаждения в струе воздуха (2 режим) приводят к тому, что количество ОА еще выше (8,5–16%), т.е., полнота превращения

$\gamma \rightarrow \alpha$ еще меньше, т.к. время на превращение значительно сократилось. Это говорит о том, что происходит частичная закалка.

Исследования, проведенные на стали ШХ15, показали, что силы резания P_z , P_y , P_x и температура Θ , возникающая в зоне резания, имеют определенную корреляционную связь с шириной рентгеновских линий B_{110} и B_{220} . Коэффициент корреляции составляет для зависимостей $P_z=f(B_{110})$, $P_y=f(B_{110})$, $P_x=f(B_{110})$ и $\Theta=f(B_{110})$ соответственно 0,71; 0,65; 0,5 и 0,72. Это значит, что между плотностью дислокаций и величиной блоков мозаики, с одной стороны и P_z , P_y , P_x и Θ — с другой существует достаточно четкая связь (рис. 2, 3). При этом с увеличением ширины линии B_{110} названные силы резания увеличиваются, а температура имеет тенденцию к снижению.

Коэффициент корреляции для зависимостей $P_z=f(B_{220})$, $P_y=f(B_{220})$, $P_x=f(B_{220})$ и $\Theta=f(B_{220})$ колеблется в пределах от 0,45 до 0,61, что указывает на то, что искажения кристаллической решетки влияют на указанные показатели обрабатываемости в меньшей степени, чем в первом случае.

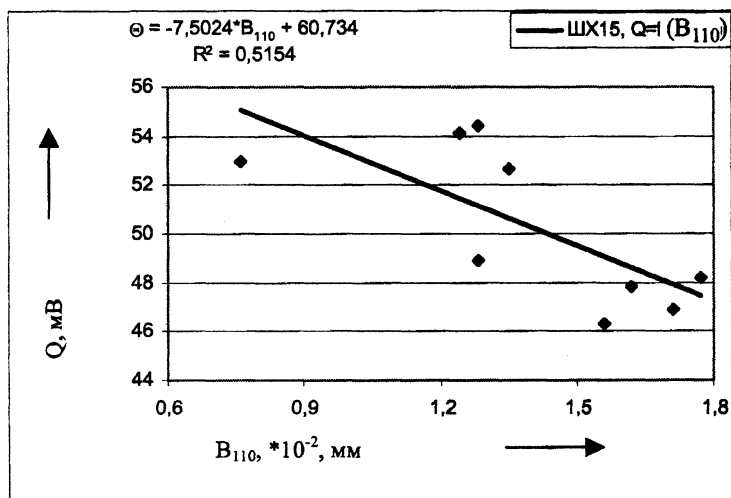


Рис. 3. Зависимость температуры резания от ширины линии B_{110}

Одновременно с этим при точении стали ШХ15 исследовалось влияние величины подачи на зависимости сил резания и температуры от параметров тонкой кристаллической решетки. Установлено, что изменение подачи с $s=0,07$ мм/об до $s=0,14$ мм/об незначительно повлияло на характер этих зависимостей.

Практически так же ведет себя сталь 20ХНЗА (рис. 4). Достаточно высокие для обработки металлов резанием коэффициенты корреляции свидетельствуют о наличии корреля-

ционных связей между силами резания при точении и температурой в зоне резания, с одной стороны и величиной блоков мозаики и плотностью дислокаций – с другой. Влияние искажений кристаллической решетки на силы резания и температуру более слабое.

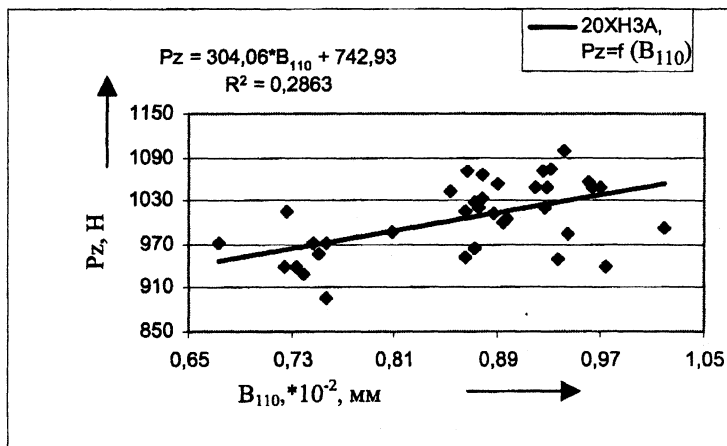


Рис. 4. Зависимость силы резания P_z от ширины линии B_{110} при точении стали 20ХН3А.

При увеличении ширины рентгеновской линии B_{110} силы резания и температура возрастают, т.е. находятся в прямой пропорциональной зависимости от плотности дислокаций и величины блоков мозаики.

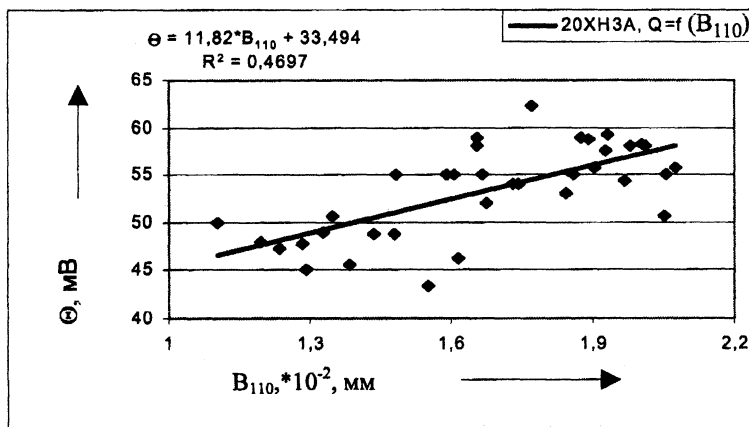


Рис. 5. Зависимость температуры, возникающей в зоне резания, от ширины линии B_{110} при точении стали 20ХН3А.

Исследования, проведенные на стали 38ХМЮА, позволили установить слабое влияние как плотности дислокаций и блоков мозаики, так и искажений кристаллической решетки на силы резания (коэффициенты корреляции малы). Вместе с тем, влияние плотности дислокаций и величины блоков мозаики на температуру в зоне резания существенное (рис.6).

Здесь же оценивалась связь между шероховатостью поверхности и параметрами тонкой кристаллической структуры. Изменение ширины линии B_{110} в указанных пределах не оказывает заметного влияния на среднее арифметическое отклонение профиля R_a (коэффициент корреляции 0,1–0,2).

Как и во всех предыдущих случаях, влияние искажений кристаллической решетки (линия B_{220}) на указанные показатели обрабатываемости значительно слабее. Так, для зависимости $\Theta=f(B_{220})$ коэффициент корреляции 0,603, а для $\Theta=f(B_{110})$ – 0,647. Исключение в данном случае составляет зависимость шероховатости от ширины линии B_{220} , где прослеживается четкая взаимосвязь между R_a и B_{220} , коэффициент корреляции 0,65.

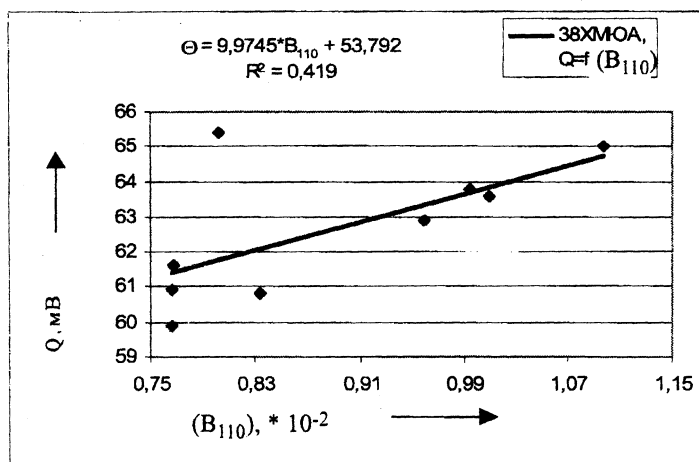


Рис. 6. Влияние ширины линии B_{110} на температуру, возникающую в зоне резания, при точении стали 38ХМЮА

Исследованиями установлено, что с увеличением ширины линий B_{110} и B_{220} износ резцов при обработке образцов из стали 20ХН3А также увеличивается. Это связано с тем, что с увеличением плотности дислокаций, блоков мозаики и искажений кристаллической решетки прочность материала повышается.

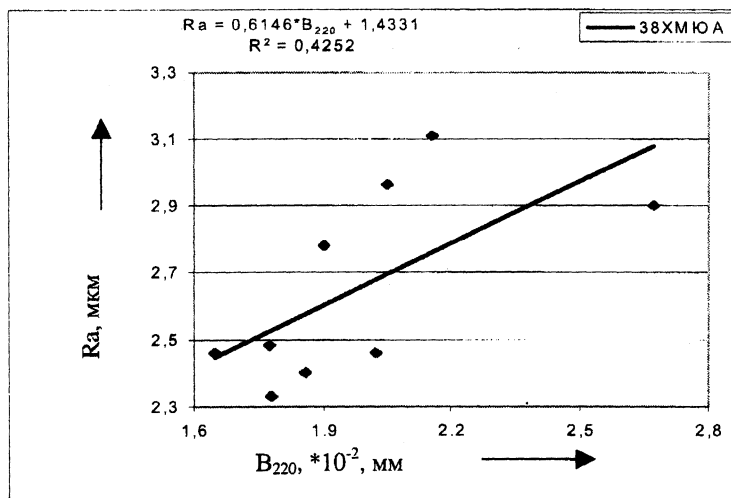


Рис. 7. Влияние ширины линии B_{220} на шероховатость поверхности при точении стали 38ХМЮА

Выводы

1. На основании многочисленных опытов авторами установлено, что параметры тонкой кристаллической структуры решетки оказывают определенное влияние на такие показатели обрабатываемости материала, как силы резания P_z , P_y , P_x , температуру в зоне резания Θ , среднее арифметическое отклонение профиля Ra .

При этом плотность дислокаций и величина блоков мозаики оказывают более существенное влияние на силы и температуру резания, чем искажения кристаллической решетки. В то же время, искажения кристаллической решетки оказывают большее влияние на шероховатость поверхности.

2. В целом параметры кристаллической решетки металла могут быть использованы в будущем в качестве косвенных показателей обрабатываемости при оценке обрабатываемости резанием металлических материалов.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

УДК 621.9.048.7

Г. Я. Беляев, С. Э. Крайко

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА, ОБРАБОТАННОГО ЛУЧОМ ЛАЗЕРА

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Высокая стойкость штампов является одним из основных условий рентабельности применения штамповки в производстве. Основные факторы, которые влияют на стойкость штампов, можно разделить на следующие группы: конструкционные факторы и условия эксплуатации; качество материала штампа, а также качество его изготовления; качество рабочих поверхностей; технологичность конструкции штампуемой детали. Низкая стойкость штампов приводит к нерациональному расходу штамповых сталей, снижает качество поковок и производительность труда и, как следствие, повышает себестоимость продукции [1]. В связи с широким внедрением новых процессов деформирования, освоением штамповки труднодеформируемых металлов и сплавов, а также неметаллических материалов, характеризующихся более тяжелыми условиями эксплуатации инструмента, актуальность проблемы повышения стойкости штампов возрастает.

Среди прогрессивных технологий увеличения длительности работы штампового инструмента широкое применение нашли процессы обработки с применением высококонцентрированных источников энергии [2, 3]. Одним из таких процессов является лазерная поверхностная закалка рабочих поверхностей штампового инструмента [4, 5].

Данная технология заключается в локальном нагреве режущих кромок и небольших прилегающих к ним участков поверхностей лазерным излучением и, после прекращения воздействия, охлаждении этих участков со сверхкритической скоростью за счет теплоотвода во внутренние слои металла. В процессе температурной обработки в металле происходят фазовые превращения: на этапе нагрева идет формирование аустенитной структуры, а затем, на этапе охлаждения – превращение ее в мартенсит. Наличие мартенситных структур в поверхностном слое приводит к увеличению его микротвердости и сопротивляемости износу [6].

К числу особенностей данной технологии относится и то, что воздействие лазерного излучения на обрабатываемый материал является поверхностным процессом.

Это в большинстве случаев приводит к тому, что термическое упрочнение осуществляется как заключительная операция изготовления штампового инструмента, без последующей механической обработки. Последнее, в свою очередь, повышает требования к качеству поверхности после воздействия лазерным излучением.

В работах [7, 8] указывается, что характеристики качества поверхности подразделяются на геометрические и физико-механические. Геометрические характеристики включают в себя характеристики шероховатости, волнистости и макрогеометрии. Согласно [7] многочисленные исследования показали, что наиболее широко и просто отражают эксплуатационные свойства обработанных поверхностей следующие параметры: высотные – среднее арифметическое отклонение профиля R_a , наибольшая высота неровностей профиля R_{max} , расстояние от линии выступов до средней линии R_p ; шаговые – средний шаг неровностей профиля S_m и относительная опорная длина профиля t_p . Через эти характеристики могут быть определены все остальные параметры, используемые в расчетах на износ, контактную жесткость, усталостную прочность и т.д.

Как указывалось выше, качество поверхности существенное влияет на стойкость штампового инструмента. В связи с этим были проведены исследования вышеуказанных параметров R_a , R_{max} , R_p , S_m и t_p поверхностей до и после обработки импульсным лазерным излучением.

Для проведения исследований были изготовлены три группы образцов размером $30 \times 20 \times 10$ из предварительно закаленных и отпущенных сталей следующих марок: У10, ХВГ и Х12М. С целью получения одинаковых геометрических характеристик исходной поверхности, образцы одновременно обрабатывались на шлифовальном станке до получения шероховатости в пределах R_a от 0,8 до 1,0 мкм.

Как отмечается в работе [9], шлифованные поверхности металлов отражают до 90% лазерного излучения. В связи с этим для увеличения эффективности использования лазерного излучения на поверхности подвергаемые воздействию лазерного луча, предварительно наносилось поглощающее покрытие из краски с наполнителем из оксидов металлов (гуашь желтая).

Облучение образцов производилось в импульсном режиме на установке «Квант-18М». Для получения более наглядной картины зависимости геометрических характеристик поверхности от воздействующего излучения был выбран диапазон плотности энергии от 1,3 Дж/мм², когда эффект закалки практически не наблюдается, до 2,5 Дж/мм², когда визуально наблюдается оплавление обрабатываемой поверхности.

После обработки образцов снимались характеристики поверхности на профилеграфе-профилометре (мод. 252 завода «Калибр»). Обработка профилеграмм и расчет характеристик микрогеометрии проводились в соответствии с рекомендациями [7, 8].

Результаты обработки полученных данных отображены на рисунках (рис. 1–4).

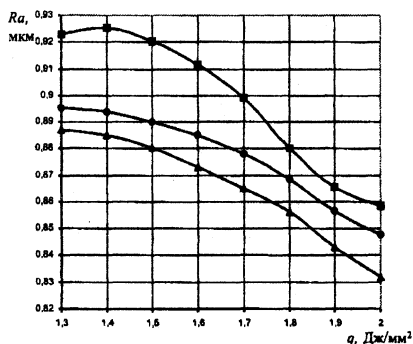


Рис.1. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля Ra от плотности энергии q : 1 - сталь У10, 2 - сталь ХВГ, 3 - сталь Х12М.

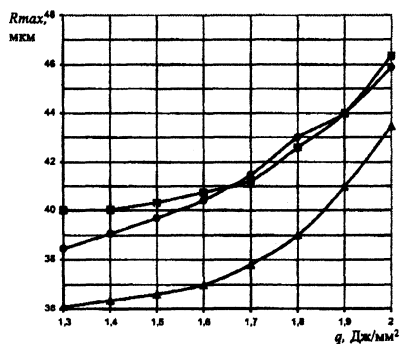


Рис.2. Зависимость наибольшей высоты неровностей профиля R_{max} от плотности энергии q : 1 - сталь У10, 2 - сталь ХВГ, 3 - сталь Х12М.

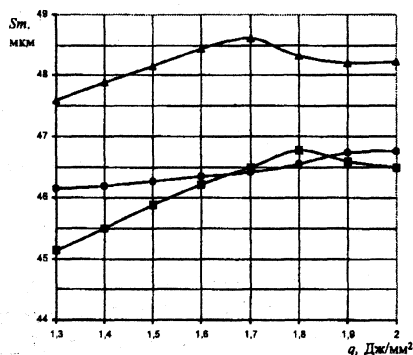


Рис.3. Зависимость среднего шага неровностей профиля S_m от плотности энергии q : 1 - сталь У10, 2 - сталь ХВГ, 3 - сталь Х12М.

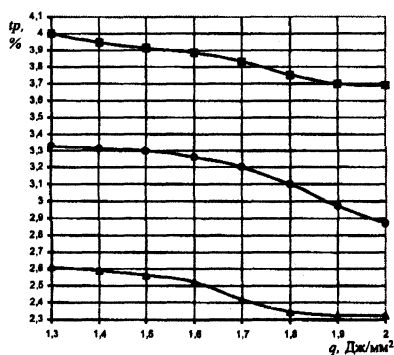


Рис.4. Зависимость относительной опорной длины профиля t_p от плотности энергии q : 1 - сталь У10, 2 - сталь ХВГ, 3 - сталь Х12М.

Как видно из графиков, при плотностях энергии от 1,3 до 2,0 Дж/мм² высотные параметры профиля Ra и R_{max} снижают свои величины относительно исходных значений. Это связано с тем, что с возрастанием плотности энергии увеличивается оплавленность микровыступов (наблюдается рост радиусов скругления вершин микронеровностей), происходит заваривание части микровпадин, то есть происходит сглаживание исходного микрорельефа поверхности. Параметр профиля S_m изменяется наиболее сильно и с возрастанием плотности энергии увеличивается, показатель относительной опорной длины профиля t_p также возрастает, так как он пропорционально связан с уменьшением высотных параметров микрорельефа [7].

Приложение больших энергий (свыше $2,0 \text{ Дж/мм}^2$) приводит к местному оплавлению поверхности. Связанные с этим выплески металла способствуют увеличению высотных показателей шероховатости, а также образованию своего рода кратеров, изменяющих характер микрорельефа поверхности коренным образом.

Анализ результатов проведенных исследований приводит к выводу о том, что лазерное упрочнение, проведенное при оптимальных режимах, способствует увеличению несущей способности шероховатости поверхности и уменьшает высотные параметры. Все эти параметры, наряду с увеличением микротвердости поверхностных слоев, приводят к повышению стойкости рабочих поверхностей штампового инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайленко Ф.П. Стойкость разделительных штампов. М.: Машиностроение, 1976. – 208 с.
2. Белый А.В. Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии. – Мн., 1990. – 78 с.
3. Коган Я.Д. Перспективы развития технологий поверхностного упрочнения материалов деталей машин и инструмента // МиТОМ. 1993. №8. С.5–9.
4. Маликов Л. С. и др. Лазерное упрочнение штампового инструмента // Технология и организация производства. – Киев, 1986. №2. С.46–48.
5. Жуков А.А., Кокора А.Н., Заря А.Н., Ермакова Т.С. Особенности структуры и свойств вырубных штампов после дополнительного поверхностного упрочнения режущей кромки при помощи лазерного излучения. – М.: АН СССР, ФизХОМ, 1977. №1. С.141–143.
6. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 6 Основы лазерного термоупрочнения сплавов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 159 с.
7. Рыжов Э.В. и др., Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М., Машиностроение, 1979. – 176 с.
8. Крагельский И.В. и др., Основы расчетов на трение и износ. – М., Машиностроение, 1977.
9. Коваленко В.С. Лазерная технология. – К.: Высш. шк., 1989. – 280 с.

УДК 621.789 – 977

Г. Я. Беляев, Н. А. Сакович

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ, УПРОЧНЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В настоящее время с целью восстановления-упрочнения деталей машин при ремонтах применяются различные виды наплавки. Однако ресурс работы восстановленных наплавкой деталей чаще бывает ниже серийных, так как в ре-

зультате наплавки не всегда удается получать покрытия с требуемыми физико-механическими свойствами.

Одним из перспективных способов повышения эксплуатационных характеристик металлопокрытий является поверхностная высокотемпературная термомеханическая обработка (ПВ ТМО), базирующаяся на создании в металлопокрытиях оптимальных для эксплуатации структуры и свойств.

В металлопокрытиях после проведения ПВ ТМО повышается характеристики вязкости разрушения, сопротивление усталостному разрушению, сопротивление контактному разрушению и износу, временное сопротивление и предел текучести при статических нагрузках [1, 2, 3].

Эффективность упрочнения металлопокрытий при ПВ ТМО определяется следующими технологическими параметрами: скоростью нагрева и температурой аустенизации, температурой и степенью деформации (наличием последеформационных выдержек), скоростью охлаждения и температурой отпуска.

Исследование влияния ПВ ТМО проводилось на цилиндрических образцах из стали 40Х, которые были предварительно наплавлены проволокой НП-65Г под слоем легированного флюса на стандартном оборудовании.

В результате наплавки были получены образцы диаметром 51 мм и длиной 400 мм при следующем химическом составе: С-0,53%, Cr-2,1%, Mn-1%, Si-0,42% и при толщине наплавленного слоя 2 мм. Затем для ПВ ТМО из образцов вырезали диски ($\varnothing 51 \times 20 \times 15$ мм), которые устанавливались на оправку, стягивались гайкой и шлифовались по наружному диаметру.

ПВ ТМО осуществлялось на специальном устройстве, которое включало: токарный станок, накатное однороликовое или трехроликовое приспособление, установку ТВЧ типа ЛЗ-32, индуктор, охлаждающее устройство (спрейер), фотоэлектрический пирометр ФЭП-60.

При этом частота вращения шпинделя станка составляла $300 \dots 320 \text{ мин}^{-1}$ при продольной подаче накатного приспособления 0,95 мм/об.

ПВ ТМО производилась по схеме: нагрев до температурного интервала $1210 \dots 1230 \text{ К}$ с учетом диаграммы изотермического распада аустенита металлопокрытия, выдержка при этой температуре в течение $6 \dots 10 \text{ с}$. в целях предотвращения рекристаллизации, поверхностная пластическая деформация путем обкатки роликами и немедленная закалка с последующим низкотемпературным отпуском (473 К в течение двух часов).

Усилие обкатки при ПВ ТМО изменялось от 980 до 5880 Н на ролик, диаметр и радиус которого составляли 100 и 10 мм соответственно.

Для получения сравнительных результатов часть образцов упрочняли с нагревом ТВЧ по такому же температурному режиму, но без деформирования. Наиболее важным параметром при ПВ ТМО является усилие обкатки. Ее величину определяли экспериментальным путем. Критерием эффективности обработки служило давление на обкатной ролик, обеспечивающее повышение износостойкости метал-

лопокрытия. С учетом этого оптимальное усилие обкатки составляло 3000 Н. При этом твердость образцов составляла HRC₃ 55...58.

Исследования по определению интенсивности изнашивания производилось по схеме «вкладыш–диск» на модернизированной машине трения СМТ-1. При этом образцы-диски шлифовались в размер $50 \pm 0,01$ мм при шероховатости рабочей поверхности $R_a = 0,16 \dots 0,32$ мкм. В качестве вкладыша использовался высокопрочный чугун ВЧ-100-4 с твердостью HB 302...363. Внутренний диаметр вкладыша шлифовался в размер $\varnothing 50^{+0,01}$ при шероховатости как и образцы-диски. При исследовании применялись диски и вкладыши шириной 15 мм и 5 мм соответственно. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовалось масло МГ-10. Площадь контакта диска и вкладыша составляла 50 мм².

При выборе оценки интенсивности изнашивания упрочненных образцов и эталона учитывалось следующее: применялось профилографирование изнашиваемой поверхности и базы. При снятии для этих двух участков профилограмм можно судить о величине износа, а также оценить изменение шероховатости. В нашем случае участок изнашивания имел кольцевую дорожку, а остальная часть служила базой. Профилографирование осуществлялось на профилографе-профилометре типа 252A1.

Исследование проводилось при величинах давления от 15 до 90 МПа и при скорости скольжения равной 2,5 м/с. Величина износа образцов определялась через 10×10^4 оборотов шпинделя машины (по счетчику оборотов). С целью сокращения опытов и более точного математического описания поверхности отклика в широком диапазоне в месте контакта при исследовании процессов трения и износа применялось ортогональное центральное композиционное планирование. Результаты исследований приведены на рисунке 1.

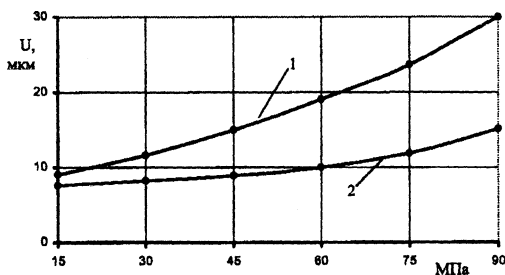


Рис. 1. Зависимость износа от величины давления в месте контакта: 1 – наплавка + закалка; 2 – наплавка + ПВ ТМО.

Одним из факторов, определяющих износостойкость трущихся поверхностей и их антифрикционные свойства является коэффициент трения. Для исследования коэффициента трения также применялась машина трения МСТ-1, которая настраивалась так же, как и для исследования износа образцов. Перед настройкой осуще-

ствлялась тарировка системы измерения момента трения, для чего на вал силоизмерителя устанавливалось тарировочное приспособление, предварительно отбалансированное с помощью противовеса. Тарировка производилась при помощи грузов, что соответствовало определенным моментам трения. Момент трения измерялся при помощи индуктивного датчика, встроенного в подвижный узел машины, показания которого регистрировались электронным потенциометром типа ПСР.

По моменту трения определялся коэффициент трения:

$$f = \frac{2M_{\text{тр}}}{ND},$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трения; N – номинальная нагрузка; D – диаметр диска.

Исследования коэффициента трения проводились при скорости скольжения и давлениях в местах контакта аналогично, как при исследовании износа образцов, а также применялось ортогональное центральное композиционное планирование.

Результаты исследований представлены на рисунке 2.

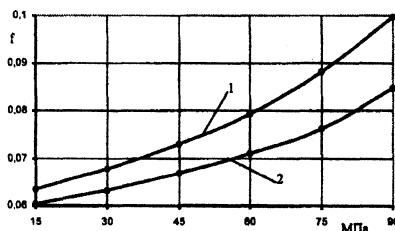


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от величины давления в месте контакта: 1 – наплавка + закалка; 2 – наплавка + ПВ ТМО.

Для наглядности различия в износе испытываемых материалов и их коэффициентов трения на рисунках 1 и 2 представлены фрагменты поверхностей отклика. В зависимости от величины давления в месте контакта (при $v = 2,5$ м/с) уравнения кривых имеют следующий вид:

– Для наплавки и закалки:

$$U = 15,20 - 1,80P + 1,23P^2, f = 0,0650 - 0,0045P + 0,0030P^2$$

– Для наплавки и ПВ ТМО:

$$U = 10,68 - 0,24P + 0,77P^2, f = 0,074 - 0,017P + 0,006P^2.$$

Из рисунков 1 и 2 видно, что с увеличением давления в месте контакта имеет место увеличение износа и коэффициента трения. Причем интенсивность увеличения износа и коэффициента трения с увеличением давления в месте контакта боль-

ше у наплавленных и закаленных образцов, чем у образцов, упрочненных ПВ ТМО. Уменьшение износа и коэффициента трения у образцов, упрочненных ПВ ТМО, связано с изменением структуры, увеличением количества и дисперсности карбидных образований, повышением плотности дислокаций и другими факторами, обуславливающими общий эффект ПВ ТМО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берштейн М.И. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Т.2. – М.: Металлургия, 1968. – 1171 с.
2. Шаврин О.И. Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин. – М.: Машиностроение. 1983. – 176 с.
3. Таратута А.И., Сверчков А.А., Прогрессивные методы ремонта машин. Минск, «Ураджай», 1975. – 344 с.

УДК 621.789 – 977

Г. Я. Беляев, Н. А. Сакович

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ НАГРЕВА ОБРАЗЦОВ ПРИ ТРЕНИИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

При исследовании износостойкости важным показателем является температурное состояние трущихся поверхностей. Повышение температуры вследствие преобразования механической работы в тепловую энергию может до некоторой степени характеризовать процесс изнашивания и в то же время существенным образом влиять на интенсивность износа.

При относительном скольжении генерируемое в пятнах контакта тепло распространяется в глубь обоих трущихся тел, а также в окружающую среду. Распределение тепловых потоков зависит от теплофизических свойств трущихся материалов, размеров тел, условий теплоотвода и т.д. Анализ расчетных формул показывает, что интенсивность теплового потока определяется работой трения и величиной площади, на которой она генерируется. При постоянных условиях испытания и одинаковых размерах испытываемых образцов температура последних будет зависеть только от работы трения и, следовательно, исключительно от интенсивности износа.

Измерение температур поверхностных слоев при трении затруднено в связи с отсутствием точных методов измерения. Существующие методы опреде-

ления температуры с применением естественных и искусственных термопар позволяют определять температуру на сравнительно большом расстоянии от поверхности трения. Однако исследование этого вопроса даже приближенными методами дает возможность судить о происходящих процессах в местах контактов.

В настоящей работе было проведено исследование влияния поверхностной высокотемпературной термомеханической обработки (ПВ ТМО) на температуру нагрева образцов при трении.

В качестве объекта исследований нами был выбран металл, наплавленный проволокой НП-65Г под слоем легированного флюса (С-0,51%, Cr-2%, Mn-0,91%, Si-0,46%). Наплавку производили на заготовки цилиндрической формы из нормализованной стали 40Х.

Выбор способа наплавки и наплавочных материалов обусловлен их массовым применением в ремонтном производстве.

ПВ ТМО производилась по схеме: нагрев до температуры 1210...1230К, поверхностная пластическая деформация путем обкатки роликом и немедленная закалка с последующим низкотемпературным отпуском.

Поверхностную пластическую деформацию осуществляли путем обкатки роликом с оптимальным усилием обкатки 3000 Н. Технологические параметры обкатки: диаметр ролика – 100 мм, радиус деформирующей части ролика – 10 мм, частота вращения заготовки – 320 мин⁻¹, продольная подача – 0,95 мм/об.

Для нагрева заготовок использовалась высокочастотная установка Л32-67. Все образцы после закалки и ПВ ТМО подвергались низкотемпературному отпуску при температуре 473 К в течение двух часов. При этом твердость заготовок составляла HRC₃ 55...58.

Исследование температуры, возникающей при трении, проводилось на модернизированной машине трения МСТ-1 в условиях обильной смазки методом искусственной термопары [1]. При этом применялись образцы размером 5×5×10 мм, которые вырезались из закаленных заготовок, а также упрочненных ПВ ТМО. В качестве контртела применялись диски из чугуна ВЧ-100-4 с твердостью HB 302...363. Шероховатость трущихся поверхностей образца и диска составляла Ra= 0,16...0,32 мкм. В качестве смазывающей жидкости использовалось масло МГ-10.

Медь-константановая термопара приваривалась в двух точках на боковых поверхностях образцов на расстоянии 0,4...0,5 мм от поверхности трения. Приварка электродов термопары производилась на машине точечной конденсаторной сварки типа ТКМ-7. Расстояние между точками приваривания составляло 1,5...2 мм.

Свободные концы спая термопары соединялись отводными проводниками и помещались вне испытательной машины. Термопары были предварительно про-

тарированы по ртутному термометру. Изменение термоЭДС, возникающих в термопаре при нагреве образцов в процессе трения и тарировке термопар, производилось милливольтметром.

Температура образцов исследовалась при скорости скольжения 2,5 м/с и давлении от 15 до 90 МПа.

Запись показаний милливольтметра производилась после установившегося режима трения. Для получения средней величины измерения при различных давлениях производилось в общей сложности 12...15 измерений на шести образцах. Температура масляной ванны оставалась практически постоянной. Это обеспечивалось охлаждением. Результаты исследований приведены на рис.1.

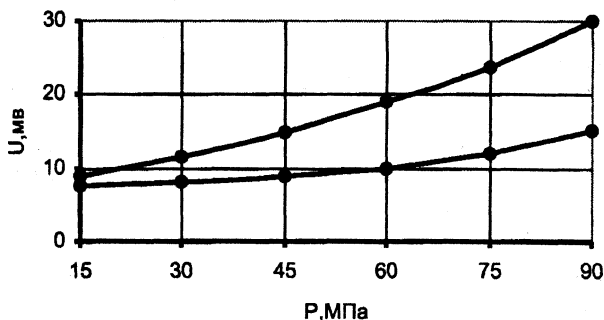


Рис. 1. Зависимость температуры нагрева от величины давления: 1 – наплавка + закалка; 2 – наплавка + ПВ ТМО.

Из рис.1 видно, что с увеличением давления при трении температура образцов повышается. Более интенсивный рост температуры наблюдается у образцов закаленных с нагревом ТВЧ. Образцы, упрочненные ПВ ТМО, во всех случаях имеют меньшую температуру. Это можно объяснить уменьшением работы трения и увеличением износостойкости, являющихся следствием ПВ ТМО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зедгинидзе Г.П. Измерение температуры вращающихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1962. – 272 с.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Электроимпульсное полирование (ЭИП) металлов по сравнению с электрохимическим обладает рядом существенных преимуществ: более высоким (на 8...10 %) относительным сглаживанием поверхности, высокой стабильностью получаемых результатов в широком диапазоне технологических режимов, малостадийностью и универсальностью технологии, не критичностью к качеству предварительной подготовки поверхности, более высокой экологической безопасностью [1].

К недостаткам существующих технологий ЭИП можно отнести высокую энергоемкость процесса, низкий коэффициент использования по мощности источника технологического тока, высокие рабочие температуры электролитов, низкую стабильность электрогидродинамического режима полирования, неравномерность растворения структурных составляющих полируемых сплавов. Совершенствование технологии ЭИП ведется в направлении оптимизации технологических режимов обработки и разработки новых электролитов, позволяющих устранить указанные недостатки.

Из-за большого разнообразия структурных составляющих коррозионностойких сталей, а также с целью изучения механизма съема металла, влияния технологических режимов на качество поверхности и их оптимизации возникла необходимость исследовать равномерность растворения в процессе ЭИП основных структурных составляющих этих сталей. Исследовалось также влияние добавок в электролит органических комплексообразователей (ОКО) на качество поверхности и напряжения полирования на минимально достижимую шероховатость.

Зависимость минимально достижимой шероховатости поверхности стали 12X18H10T от напряжения полирования приведена на рис. 1, а внешний вид поверхности при разных напряжениях полирования – на рис. 2.

Объектами исследований были выбраны: из мартенситного класса коррозионностойких сталей – сталь 20X13, из аустенитного класса – сталь 12X18H10T. Образцы Ø 10 мм и толщиной 2 мм полировались методом ЭИП в течение 5 мин. Режимы полирования и составы электролитов приведены в табл. 1.

Рентгенофазовый анализ поверхности образцов проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН 3,0 по стандартной методике.

Таблица 1

Составы электролитов и режимы полирования образцов (1–7)
из стали 20X13 и образцов (8–12) из стали 12X18H10T

Номер образца	Состав электролита	Концентрация электролита*, мас. %	Температура электролита, °C	Напряжение обработки, В
1**, 8**	—	—	—	—
2; 9	$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$	4	70	250
3	$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$	4	70	300
4; 10	$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$	4	70	450
5; 11	$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4 + \text{ОКО}^{***}$	4 + 0,5	70	250
6	$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4 + \text{ОКО}^{***}$	4 + 0,5	70	300
7; 12	$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4 + \text{ОКО}^{***}$	4 + 0,5	70	450

Примечания: * остальное вода; ** эталонный образец после механического полирования; *** ОКО.

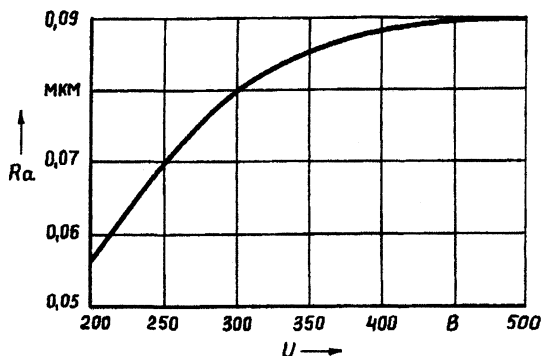


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности стали 12X18H10T от напряжения обработки.

Анализ полученных рентгенограмм показал, что образцы №1...7 имеют идентичные рентгенограммы, а все рентгеновские линии принадлежат одной фазе — α -железу (ферриту). На линиях (200), (211) и (220) эталонного образца №1 наблюдается тетрагональное расщепление вследствие частичного образования мартенсита. Линии других фаз отсутствуют, т.к. содержание их в образце недостаточно для получения дифракционной картины, а массовые коэффициенты ослабления рентгеновских лучей выше, чем у феррита.

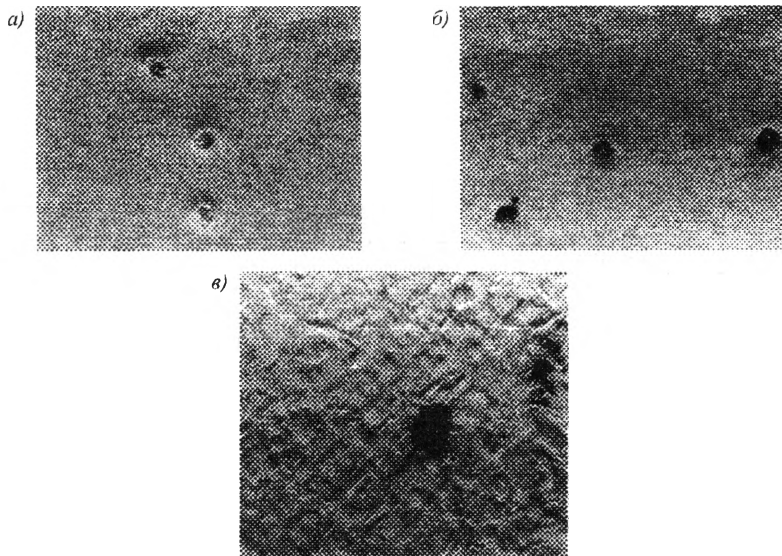


Рис. 2. Внешний вид поверхности стали 12X18H10T, обработанной при напряжении 250 В (а), 300 В (б) и 450 В (в), $\times 400$.

Сравнение рентгеновских линий образцов №2; 3; 4 с линиями эталонного образца позволило установить, что полирование при напряжении 250 В приводит к растворению преимущественно ферритной составляющей структуры, при напряжении 300 В незначительно возрастает скорость растворения мартенсита, при напряжении 450 В растворяются как феррит, так и мартенсит, но феррит растворяется более интенсивно. При исследованных режимах ЭИП растворение феррита неравномерно по различным кристаллографическим плоскостям.

Полирование стали 20X13 при 450 В приводит к возникновению питтинговой коррозии поверхности. При исследовании на микроскопе Neophot-21 поверхности электрополированных образцов на ней обнаружены равномерно распределенные мелкие белые кристаллы и крупные зерна правильной формы. Для определения фазового состава этих структурных составляющих был сделан металлографический анализ стали 20X13 методом избирательного электрохимического травления с последующей съемкой рентгенограммы, с помощью которой было установлено, что мелкие белые кристаллы, расположенные внутри зерен феррита и мартенсита, являются цементитом Fe_3C , а крупные зерна правильной формы – карбидом хрома Cr_{23}C_6 . Таким образом, центрами возникновения питтинговой коррозии при ЭИП являются зерна цементита, вокруг которых интенсивно растворяется феррит. Наблюдаемое избирательное растворение феррита в электролите, содержащем толь-

ко серноокислый аммоний, при исследованных напряжениях полирования увеличивает возможную минимально достижимую при ЭИП шероховатость поверхности.

Анализ рентгенограмм образцов №5, 6, 7 позволил сделать вывод о том, что при напряжениях полирования 250 и 300 В введение в электролит ОКО выровняло скорости растворения феррита и мартенсита по всем кристаллографическим плоскостям и обеспечило снижение шероховатости полированной поверхности.

Изучение дифракционных линий эталонного образца №8 показало наличие в стали 12Х18Н10Т двух фаз – твердого раствора углерода в γ -железе (аустенита) и феррита.

После ЭИП образцов № 9 и 11 на рентгенограммах исчезают дифракционные линии феррита, а интенсивность линий аустенита возрастает, что свидетельствует о преимущественном растворении феррита. При напряжении 450 В интенсивность линий аустенита снижается – начинается растворение зерен аустенита, причем оно происходит с разной скоростью по разным кристаллографическим плоскостям. "Рябь" на полированной поверхности (см. рис. 2) обусловлена избирательным растворением феррита, карбидов и неравномерным растворением аустенита по разным кристаллографическим плоскостям. Топография поверхности соответствует рельефу растворенных зерен феррита и аустенита.

Таким образом, ЭИП стали 12Х18Н10Т в электролитах как с добавкой, так и без добавки ОКО имеет одинаковый характер, однако равномерность растворения структурных составляющих стали выше в электролите с добавкой ОКО при напряжении 250 В, что способствует получению меньшей шероховатости и отсутствию "ряби" на полированной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метод электроимпульсного полирования металлов / Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов, Ю.В. Синькевич, О.И. Авсеевич // Машиностроение. – Мн., 1988. – Вып.13. – С. 40–43.

УДК 674.05:539.53

А. М. Буглаев, Т. И. Шуленина

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПОВ

*Брянская государственная инженерно-технологическая академия
Брянск, Россия*

Анализ возможностей повышения срока службы твердосплавных деталей штампов показывает, что существенный эффект может быть достигнут за счет использования поверхностной лазерной упрочняющей обработки, позволяющей концент-

ривать энергию в требуемой зоне и локально изменять характеристики качества поверхностных слоев для достижения благоприятной совокупности свойств и оптимальной структуры, что обеспечивает повышенную стойкость инструмента, в частности разделительных штампов.

Увеличение стойкости твердосплавных деталей штампов при воздействии на них лазерным излучением может быть достигнуто за счет: минимизации процесса изнашивания путем микровыкрашивания; увеличения микротвердости рабочих зон пуансонов и матриц. Однако, учитывая конструктивные особенности штампового инструмента, достижение этих целей возможно только за счет разности степени упрочнения прикромочных зон и прилегающих к ним рабочих поверхностей деталей штампа (матриц и пуансонов) с сохранением запаса ударной вязкости микрообъемов инструментального материала, непосредственно прилегающих к режущим кромкам, а также за счет создания геометрически однородных поверхностей прикромочных зон. Но, учитывая механизм изнашивания твердосплавных деталей штампов, лазерное упрочнение следует осуществлять исходя из конкретных условий фрикционного взаимодействия локальных участков рабочей части пуансонов и матриц с обрабатываемым материалом, что является весьма затруднительным при существующих схемах лазерного воздействия.

Исходя из вышесказанного, нами была разработана схема лазерного воздействия на наиболее подверженные изнашиванию участки деталей штампов с целью обеспечения благоприятного уровня физико-механических и микрогеометрических характеристик по зонам с различными механизмами изнашивания в области режущих кромок и на поверхностях, прилегающих к ним. Упрочняющая обработка по предлагаемой схеме заключалась в создании в прикромочных зонах участков с переменным уровнем отражательной способности, что позволяет обеспечить различную степень лазерного воздействия. С целью меньшего энергетического воздействия на режущие кромки пуансона и матрицы и поверхности, их образующие, на прикромочном участке, 0,5–1,0 мм от кромок, формировались поверхности с высокой отражательной способностью. Далее, с целью увеличения сопротивляемости изнашиванию истиранием, в прикромочных зонах на удалении от кромок 0,5–1,0 мм предлагалось формирование поверхностей с увеличенной способностью поглощать световую энергию при воздействии луча лазера, обеспечивая тем самым за счет этого подвод большей плотности энергии в зону обработки, что способствовало бы увеличению микротвердости поверхностного слоя и глубины упрочнения. На удалении от кромки на 2,0–2,5 мм, согласно предложенной схеме лазерного воздействия предлагалась возможность формирования поверхностей с регулярными микрорельефами с целью снижения абразивного воздействия, минимизации протекания химических и электрохимических процессов в зоне контакта матрица - обрабатываемый материал - пуансон. Учитывая то, что отражательная способность металлических поверхностей в значительной степени определяется микрогеометрическими параметрами, нами были выполнены исследования влияния

параметров шероховатости твердосплавных поверхностей на коэффициент отражения R . Исследованиям подвергались образцы из твердых сплавов вольфрамкобальтовой группы с различным содержанием в них кобальта (ВК6, ВК10, ВК15). Для этого на исследуемых образцах создавались поверхности с различными параметрами шероховатости ($R_a=1,55; 0,81; 0,16$ мкм) и оценивалась их отражательная способность (результаты исследований представлены в таблице 1).

Так, на основании проведенных исследований можно заключить, что по отражательной способности можно судить о значениях параметров шероховатости исследуемых поверхностей.

Таблица 1

Зависимость коэффициента отражения твердосплавных поверхностей от параметров шероховатости

Шероховатость поверхностного слоя, R_a , мкм	Коэф. отражения поверхностей R , %		
	ВК6	ВК10	ВК15
1,55	19	21	23
0,81	59	60	62
0,16	83	85	88

Кроме того, в процессе исследований было установлено, что на исследуемых поверхностях в результате лазерного воздействия формируется особый характер микрорельефа, отличающийся образованием микровозвышений в зоне действия луча. Причем высота этих возвышений определяется как параметрами шероховатости обрабатываемых поверхностей, так и плотностью подводимой энергии. В результате проведенных исследований были установлены зависимости изменения высоты следа лазерного воздействия на поверхности образцов с различным содержанием в них кобальта от режимов обработки (рис.1).

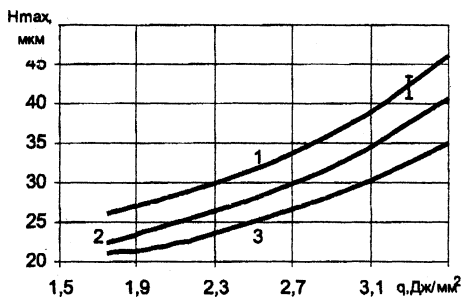


Рис. 1. График зависимости изменения высоты следа лазерного воздействия от плотности подводимой энергии при обработке сплавов: 1- ВК15, 2-ВК10, 3-ВК6, (коэффициент отражения $R = 20\%$).

На рис. 2 представлены графики зависимости изменения геометрических параметров поверхности твердого сплава ВК6 от плотности энергии при упрочняющей обработке.

Анализируя полученные зависимости, можно заключить, что максимальное увеличение высоты следа лазерного воздействия луча на поверхность с плотностью энергии 1,8 Дж/мм² наблюдается при коэффициенте отражения поверхности 19 %. Увеличение коэффициента отражения до 59 % вызывает снижение высоты следа лазерного воздействия до 15,0 мкм. Дальнейшее увеличение коэффициента отражения поверхности до 83 % приводит к снижению высоты следа до 9,5 мкм.

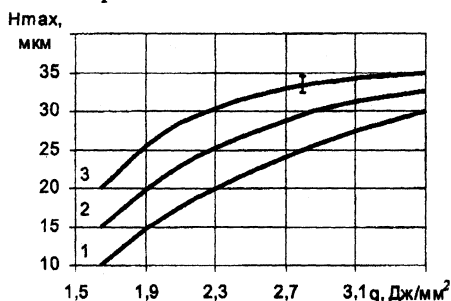


Рис. 2. Зависимость изменения геометрических параметров поверхностного слоя твердого сплава ВК6 от плотности энергии лазерного излучения: 1 - $R=83\%$; 2 - $R=59\%$; 3 - $R=19\%$.

При увеличении плотности энергии до 2,4 Дж/мм² наблюдается некоторое возрастание высоты следа лазерного воздействия. В частности, при упрочнении поверхности с коэффициентом отражения 19 % $H_{\max}$ увеличивается, но в то же время это вызывает трещинообразование в поверхностном слое.

Таким образом, можно заключить, что для формирования на исследуемых твердосплавных поверхностях благоприятного уровня физико-механических и микрогеометрических характеристик в наибольшей степени отвечает требованиям поверхность с коэффициентом отражения $R=19\%$ (в частности для сплава ВК6).

Кроме того, исследованиями установлено, что при воздействии лазерного излучения на поверхности с переменным уровнем отражательной способности согласно предложенной схеме обработки наблюдается увеличение микротвердости обрабатываемых поверхностей.

На рис. 3 представлены графики зависимости микротвердости поверхностного слоя твердого сплава ВК6 от режимов лазерного воздействия при различных коэффициентах отражения. Из представленных графиков видно, что с увеличением коэффициента отражения поверхности микротвердость исследуемых образцов из сплава ВК6 снижается. Это можно, по-видимому, объяснить тем, что с увеличением степени отражения снижается глубина упрочненного слоя,

температура в зоне воздействия лазерного луча при одинаковой его плотности и, как следствие, микротвердость поверхности в месте действия луча по сравнению с участком с меньшей отражательной способностью.

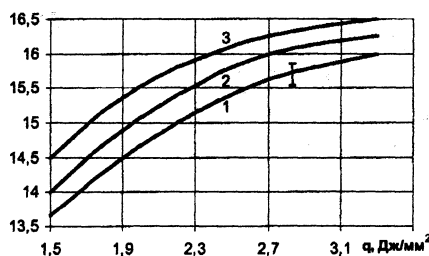


Рис. 3. Зависимость микротвердости поверхности образца из сплава ВК6 от плотности энергии лазерного излучения при коэффициенте отражения R: 1 – 83 %; 2 – 59 %; 3 – 19 %

На основании выполненных исследований установлено, что, варьируя режимами лазерной обработки, можно, наряду с улучшением эксплуатационных показателей работоспособности поверхностей с переменным уровнем отражательной способности, добиться улучшения характеристик качества рабочих поверхностей твердосплавных деталей штампов.

УДК 621.9.048.7

О. Г. Девойно, А. Л. Кочеров, А. П. Пилипчук

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОМОДОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА КАК ЭТАП СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИИ ОПЛАВЛЕНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь

Комбинированная технология формирования износостойких покрытий, включающая газотермическое напыление порошковых материалов и последующее их оплавление лучом лазера, в настоящее время является одним из перспективных способов поверхностного упрочнения металлических деталей, позволяющим получить материалы с заранее заданными свойствами [1, 2]. На эффективность процесса лазерного оплавления существенное влияние оказывают параметры лазерного излучения (ЛИ) и, в частности, характер распределения энергии по сечению

лазерного луча [2–4]. Однако, в большинстве известных работ, посвященных моделированию процесса лазерной обработки, рассматриваются упрощенные модели, что, естественно, приводит к большим погрешностям при численной реализации разработанных моделей.

Основу изучения тепловых полей, возникающих в обрабатываемой детали под воздействием ЛИ, составляет уравнение теплопроводности, которое может быть записано в виде [3]:

$$c\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}\vec{W} = Q(x, y, z, t), \quad (1)$$

где $\vec{W} = -\lambda(T)\overline{\operatorname{grad}T}$ – тепловой поток;

$c\gamma$ – объемная теплоемкость;

λ – коэффициент теплопроводности;

$Q(x, y, z, t)$ – объемная плотность тепловых источников.

Вполне очевидно, что точность расчета температурного поля обусловлена адекватностью модели (1). Здесь уместно заметить, что выявлению и учету особенностей правой части модельного представления (1) уделяется значительное внимание. Сюда следует отнести, в частности, учет температурной зависимости теплоемкости и теплопроводности обрабатываемых материалов. С другой стороны, учет особенностей пространственно-временной структуры теплового источника наталкивается на ряд существенных затруднений. Это в первую очередь относится к многомодовому режиму излучения лазера [2].

Для рассматриваемой задачи лазерной обработки $Q(x, y, z, t)$ задается в виде граничного условия (например, при $z=0$) на поверхности обрабатываемой детали. Причем пространственная структура поверхностного источника тепла повторяет распределение интенсивности ЛИ $I(x, y)$ по поверхности материала [2–4]. Наиболее распространенными аналитическими представлениями распределения интенсивности ЛИ являются равномерное и гауссовское, которые в случае многомодового излучения очень грубо и неточно описывают реальный поток мощности ЛИ и в силу этого не могут быть признаны адекватными.

Данное положение проиллюстрировано на рис. 1, где представлено экспериментальное нормированное одномерное распределение интенсивности ЛИ $K(x)$ многомодового лазера «Комета-2». На рис. 1, кроме того, изображены равномерная $R(x)$ и гауссовская $G(x)$ аппроксимации, построенные в предположении

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} R(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} G(x) dx.$$

Для оценки ошибки аппроксимации будем использовать функционал

$$\psi[H] = \int_{-\infty}^{\infty} |K(x) - H(x)| dx \cdot \left(\int_{-\infty}^{\infty} K(x) dx \right)^{-1}, \quad (2)$$

что дает $\psi[R] \approx 40,7\%$ и $\psi[G] \approx 55,8\%$ соответственно. Полученные оценки точности аппроксимации свидетельствуют о необходимости поиска новых способов аналитического описания распределения интенсивности излучения многомодового лазера.

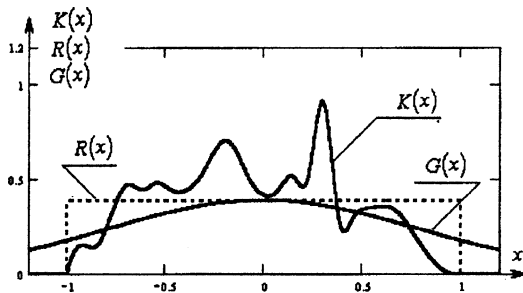


Рис. 1. Экспериментальное распределение интенсивности ЛЛ $K(x)$, равномерная $R(x)$ и гауссовская $G(x)$ аппроксимации

Основной идеей решения сформулированной задачи является аналитическое представление моделей распределения интенсивности излучения многомодового лазера в виде многообразия сдвигов базисной функции.

Отправным пунктом предлагаемого представления являются работы американского ученого Н. Винера, развитые в дальнейшем советским математиком Н.И. Ахиезером [5, 6]. В этих работах доказана возможность аппроксимации произвольной функции $K(x)$ математической конструкцией $W(x, N)$ вида

$$W(x, N) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot F(x - \lambda_n), \quad (3)$$

которая, по сути, является линейным многообразием сдвигов базисной функции $F(x)$. Данное аналитическое представление полностью определено вектором параметров, составленным из значений коэффициентов разложения

$$\{A_n\}_N = \{A_1, \dots, A_N\}$$

и величин соответствующих сдвигов

$$\{\lambda_n\}_N = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}.$$

Особенностью полученных Винером доказательств является то, что процесс их получения существенно различается для пространства L_1 абсолютно суммируемых функций и пространства L_2 функций с суммируемым квадратом. Кроме того, отсутствуют процедуры вычисления параметров сдвиговых приближений, что делает малоприменимым их практическое применение.

Если область определения $\mathfrak{A}$ функции $K(x)$ имеет бесконечную меру, то между двумя рассмотренными выше классами (L_1 и L_2) не существует строгого отношения включения. Это приводит к ряду особенностей их практического применения. Физически это означает, в частности, что если амплитуда поля описывается функцией $K(x) \in L_1$, то поток мощности такого поля, описываемый интегралом от квадрата функции ($K^2(x)$), может быть бесконечным. Для того чтобы получаемые аналитические представления удовлетворяли закону сохранения энергии, определим класс допустимых функций L как множество суммируемых функций с интегрируемым квадратом, т.е.

$$L = L_1 \cap L_2.$$

Такое определение наполняет параметры получаемых моделей физическим смыслом и, кроме того, позволяет продуктивно использовать и основные математические свойства пространств L_1 и L_2 , такие как теорему Планшереля, ограниченность интегралов, свойство Фурье преобразования функции пространства L и аксиому треугольника для метрик евклидова пространства L .

Идея построения доказательной базы основана на использовании теоремы об аппроксимации сверткой в трактовке Винера, которая выявляет условия, при которых произвольная свертка функций $A(x) \in L$ и $F(x) \in L$ сколь угодно близко приближается к аппроксимируемой функции $K(x) \in L$. Детали доказательства определяют условия, при которых сдвиговое приближение стремится к свертке и тем самым, в силу аксиомы треугольника сколь угодно близко приближается к $K(x) \in L$.

Такие условия найдены. Они касаются выбора базисной функции разложения и способа построения сетки сдвигов, а именно:

- Фурье-преобразование базисной функции может обращаться в нуль лишь на множестве конечной меры;
- способ построения сетки сдвигов должен быть выбран так, чтобы при безграничном увеличении числа сдвигов максимальное расстояние между сдвигами асимптотически стремилось к нулю.

Выполнение этих условий обеспечивает возможность сколь угодно близкого приближения сдвигового многообразия (3) к аппроксимируемой функции $K(x) \in L$. Причем общей закономерностью является увеличение точности аппроксимации с ростом числа членов разложения (3).

В ходе построения доказательной базы получена вычислительная процедура нахождения коэффициентов разложения $\{A_n\}_N$ по результатам интегрирования обратного преобразования Фурье от частного Фурье преобразований исходной функции $k(u)$ и базисной функции $f(u)$:

$$A_n = \int_{\Omega_n} A(x) dx = \int_{\Omega_n} \mathcal{F}^{-1}\{a(u)\} dx = \int_{\Omega_n} \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{k(u)}{f(u)}\right\} dx, \quad n = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где $\mathcal{F}^{-1}\{a(u)\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} a(u) \cdot e^{iux} du$ – оператор обратного преобразования

Фурье;

Ω_n – элемент счетной непересекающейся системы областей $\{\Omega_n\}_N$, причем каждый элемент Ω_i содержит одну и только одну точку λ_i из сетки разложения $\{\lambda_n\}_N$ и $\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset$ для всяких $i \neq j$.

Практическое применение процедуры (4) часто наталкивается на значительные трудности, поэтому найдена вычислительная процедура, основанная на оценивании коэффициентов разложения по методу наименьших квадратов, которая позволяет определять наилучшее в смысле значения квадратической ошибки аппроксимации приближение. Применение данной вычислительной процедуры сводит нахождение коэффициентов разложения к решению линейного векторно-матричного уравнения. Данная процедура алгоритмична, а результаты вычислений определяют наилучшее (в смысле квадратичной ошибки) приближение [7]. Кроме того, можно показать, что сдвиговые модели (3) удовлетворяют свойству линейности.

Для решения уравнения теплопроводности (1) в качестве базисной функции $F(x)$ разложения (3), на наш взгляд, предпочтительнее всего использование гауссовой функции. Данный выбор основывается на том, что гауссова функция удовлетворяет необходимому требованию к базисной (ее Фурье-преобразование не обращается в нуль на всей прямой), а кроме того, гауссоида является собственной функцией линейного стационарного уравнения теплопроводности. Поэтому в ряде случаев решение уравнения (1) можно находить как суперпозицию все тех же гауссовских функций.

В заключение приведем пример построения аналитической модели описанного выше экспериментального распределения многомодового ЛИ. В качестве базисной функции выберем гауссоиду

$$F(x) = \exp\left[-(\alpha x^2)/2\right],$$

где α – параметр формы кривой Гаусса.

Положим $\alpha = 100$ (вопрос параметризации базисной функции в данной статье детально не рассматривается). Для равномерной сетки сдвигов и $N = 10$ получим модель (3) с параметрами

$$\{\lambda_n\}_{10} = \{-0,9; -0,7; -0,5; -0,3; -0,1; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9\};$$

$$\{\lambda_n\}_{10} = \{0,072; 0,395; 0,327; 0,467; 0,508; 0,264; 0,641; 0,143; 0,329; 0,027\}.$$

При этом точность аппроксимации составила $\psi \approx 13,6\%$; при числе сдвигов $N = 20$ точность $\psi \approx 9,8\%$, а при $N = 30 - \psi \approx 6,4\%$. На рис. 2 построено приближение $W(x, 10)$ экспериментального распределения интенсивности ЛИ $K(x)$.

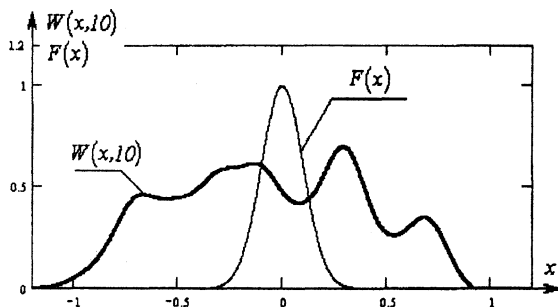


Рис.2. Аналитическая модель $W(x, 10)$ и базисная функция $F(x)$.

Таким образом, описанный выше способ представления модели распределения интенсивности многомодового ЛИ позволяет более точно учесть особенности взаимодействия излучения и обрабатываемой поверхности. Тем самым повышается степень адекватности модели реальному процессу лазерного оплавления газотермических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / Пер. с яп. В.Н. Попова; Под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
2. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Процессы плазменного нанесения покрытий: Теория и практика / А.Ф. Ильющенко, С.П. Кундас и др.; Под ред. А.П. Достанко, П.А. Витязя. – Мн.: Научный центр исследований политики и бизнеса «Армита», – 1999. – 544 с.
5. Винер Н. Интеграл Фурье и его приложения / Пер. с англ. Н.Я. Виленкина. – М.: Физматгиз, 1963. – 256 с.
6. Ахиезер Н.И. Лекции по теории аппроксимации. – М.: Наука, 1965. – 407 с.
7. Кочеров А.Л. Способ определения оптимальных коэффициентов разложения при сдвиговой аппроксимации функций // Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях: Материалы первой междунар. конф. / Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси. – Минск, 1998. – Т.1. – С.124-127.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ

*Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Беларусь*

Расчет магнитного поля и его градиента в рабочей зоне при электромагнитной наплавке представляет собой довольно сложную задачу, так как зависит от многих факторов: конфигурации полюсного наконечника, коэффициента заполнения порошком рабочего пространства, магнитных свойств порошка и детали. Известно несколько методов расчета магнитных полей: аналитический, графический и экспериментальный [1, 2]. В случае электромагнитной наплавки сплошных цилиндрических деталей (рис. 1) магнитное поле можно рассчитать аналитически, применив уравнение Лапласа [2]:

$$\nabla^2 \varphi = 0,$$

где ∇^2 – оператор Лапласа; φ – магнитный скалярный потенциал.

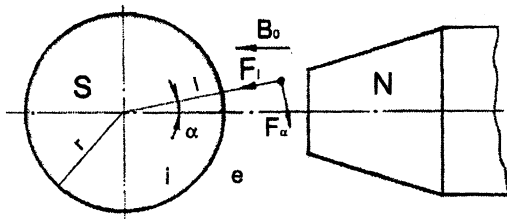


Рис. 1. К расчету магнитного поля в технологической зоне обработки.

Допуская, что длина образца достаточно велика по сравнению с его диаметром, уравнение Лапласа для среднего сечения в цилиндрических координатах можно записать в виде

$$\frac{1}{l} \cdot \frac{\partial}{\partial l} \left(l \frac{\partial \varphi}{\partial l} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{l^2 \partial \alpha^2} = 0, \quad (1)$$

где l – расстояние от центра детали до точки, в которой определяется магнитный потенциал; α – угол, отсчитываемый от направления вектора магнитной индукции исходного магнитного поля B_0 .

Решение уравнения (1) методом Фурье заключается в определении постоянных коэффициентов в выражениях для потенциала в области внешнего магнитного поля φ_e и внутри цилиндра φ_i :

$$\varphi_i = \left(C_1 l + \frac{C_2}{l} \right) \cdot \cos \alpha; \quad (2)$$

$$\varphi_e = \left(C_3 l + \frac{C_4}{l} \right) \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

где φ_i , φ_e – соответственно скалярные потенциалы магнитного поля в области детали и пространстве рабочей зоны; C_1 , C_2 , C_3 , C_4 – постоянные коэффициенты, определяемые из граничных условий.

Во внутренней области (i) потенциал должен оставаться конечным (при конечном B_0), поэтому $C_2 = 0$. Во внешней области (e) вдали от детали, т.е. при $l/r \gg 1$, возмущающее влияние детали на внешнее поле отсутствует, и потенциал определяется этим внешним полем:

$$\varphi_e = -H_0 \cdot l \cdot \cos \alpha,$$

где H_0 – напряженность исходного магнитного поля; r – радиус заготовки. Отсюда следует, что $C_3 = -H_0$.

На поверхности раздела двух сред, т.е. при $l = r$, выполняется как равенство потенциалов, так и равенство нормальных составляющих вектора магнитной индукции:

$$\varphi_i = \varphi_e; \quad \mu_i \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial l} = \mu_e \cdot \frac{\partial \varphi_e}{\partial l}, \quad (4)$$

где μ_i – магнитная проницаемость детали; μ_e – магнитная проницаемость внешней среды.

Перепишем выражения для потенциалов (2) и (3) с учетом полученных результатов:

$$\varphi_i = C_1 \cdot l \cdot \cos \alpha; \quad (5)$$

$$\varphi_e = \left(-H_0 \cdot l + \frac{C_4}{l} \right) \cdot \cos \alpha. \quad (6)$$

Продифференцировав (5) и (6) по l и с учетом условий (4), получаем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \mu_i \cdot C_1 &= \left(-H_0 - \frac{C_4}{r^2} \right) \cdot \mu_e \\ C_1 &= -H_0 + \frac{C_4}{r^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решая систему уравнений (7), получаем

$$C_1 = -H_o \cdot \frac{2\mu_o}{\mu_i + \mu_e}; \quad C_4 = H_o \cdot \frac{\mu_i - \mu_e}{\mu_i + \mu_e} \cdot r^2.$$

Подставив значения найденных коэффициентов C_1, C_2, C_3, C_4 в уравнения (2) и (3) и приняв во внимание, что $H_{el} = -\frac{\partial \varphi_e}{\partial l}$ и $H_{e\alpha} = -\frac{\partial \varphi_e}{l \partial \alpha}$, получим составляющие напряженности магнитного поля вне детали:

$$H_{e,l} = -\frac{\partial \varphi_e}{\partial l} = H_o \left[1 + \frac{\mu_i - \mu_e}{\mu_i + \mu_e} \cdot \left(\frac{r}{l} \right)^2 \right] \cdot \cos \alpha;$$

$$H_{e,\alpha} = -\frac{\partial \varphi_e}{l \partial \alpha} = -H_o \left[1 - \frac{\mu_i - \mu_e}{\mu_i + \mu_e} \cdot \left(\frac{r}{l} \right)^2 \right] \cdot \sin \alpha.$$

Известно [3], что между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H существует следующая связь:

$$B = \mu \mu_o H, \quad (8)$$

где μ_o – магнитная постоянная ($\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); μ – магнитная проницаемость среды.

С учетом (8) запишем выражения для определения составляющих магнитной индукции в пространстве рабочей зоны:

$$B_{e,l} = B_o \cdot \left[1 + \frac{\mu_i - \mu_e}{\mu_i + \mu_e} \cdot \left(\frac{r}{l} \right)^2 \right] \cdot \cos \alpha; \quad (9)$$

$$B_{e,\alpha} = -B_o \cdot \left[1 - \frac{\mu_i - \mu_e}{\mu_i + \mu_e} \cdot \left(\frac{r}{l} \right)^2 \right] \cdot \sin \alpha. \quad (10)$$

Переведем уравнения (9) и (10) из цилиндрической системы координат в декартовы координаты при помощи соотношений

$$B_{ex} = B_{el} \cdot \cos \alpha - B_{e\alpha} \cdot \sin \alpha;$$

$$B_{ey} = B_{el} \cdot \sin \alpha + B_{e\alpha} \cdot \cos \alpha;$$

$$x = l \cdot \cos \alpha;$$

$$y = l \cdot \sin \alpha;$$

$$l = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

С учетом преобразований получаем

$$B_{ex} = B_o \cdot \left[1 + \frac{k_1}{l^4} \cdot (x^2 - y^2) \right]; \quad B_{ey} = 2B_o k_1 \frac{xy}{l^4};$$

$$\text{где } k_1 = r^2 \left[\frac{\mu_i - \mu_e}{\mu_i + \mu_e} \right].$$

При соблюдении условий дифференцируемости выражений $\varphi = \varphi(x, y)$ и $B = B(x, y)$ составляющие градиента вектора магнитной индукции по осям координат определяются как частные производные второго и первого порядка по соответствующим направлениям:

$$\text{grad} \bar{B}_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \cdot \bar{x}_o = \frac{\partial B}{\partial x} \cdot \bar{x}_o;$$

$$\text{grad} \bar{B}_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \cdot \bar{y}_o = \frac{\partial B}{\partial y} \cdot \bar{y}_o.$$

где $\bar{x}_o, \bar{y}_o$ – единичные векторы.

Тогда, применяя правило дифференцирования сложных функций, получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_{ex}}{\partial x} &= \bar{B}_{ex} + \bar{B}_{ex} \bar{l} = 2B_o \frac{k_1}{l^4} \cdot x + \left[-4 \frac{k_1}{l^5} (x^2 - y^2) \right] \cdot \frac{x}{l} \cdot B_o = \\ &= 2B_o \frac{k_1}{l^4} \cdot x \cdot \left[1 - 2 \frac{(x^2 - y^2)}{l^2} \right], \end{aligned}$$

где $\bar{B}_{ex}, \bar{B}_{ex} \bar{l}$ – частные производные соответствующей функции по переменной,

выраженной в явном виде. Аналогично

$$\frac{\partial B_{ex}}{\partial y} = -2B_o \frac{k_1}{l^4} \cdot y \cdot \left(1 + 2 \frac{x^2 - y^2}{l^2} \right); \quad (11)$$

$$\frac{\partial B_{ey}}{\partial x} = 2B_o \frac{k_1}{l^4} \cdot y \cdot \left(1 - 4 \frac{x^2}{l^2} \right); \quad (12)$$

$$\frac{\partial B_{ey}}{\partial y} = 2B_o \frac{k_1}{l^4} \cdot y \cdot \left(1 - 4 \frac{y^2}{l^2} \right). \quad (13)$$

Таким образом, получены аналитические выражения (9)...(13), позволяющие рассчитать величину магнитной индукции и ее градиент в любой точке пространства рабочей зоны.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект №Т99М-007.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов Н.В. Квадратичные формы и матрицы. – М.: Наука, 1972. – 159 с.
2. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч3. Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2. – М.: Энергия, 1966. – 407с.

УДК 621.792

Ж. А. Мрочек, А. П. Ракомсин, Л. М. Кожуро, Д. Н. Хилько

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ

*Белорусская государственная политехническая академия
Государственное предприятие «МАЗ»
Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Беларусь*

Процесс формирования покрытия при электромагнитной наплавке (ЭМН) объединяет явления различной физической природы. К числу важнейших следует отнести структурные и фазовые превращения, условия протекания которых определяет структуру и физико-механические свойства покрытий. Формирование покрытия прежде всего связано с процессами кристаллизации и охлаждения капель расплава частиц ферропорошка при их взаимодействии с основой.

Решение задачи кристаллизации жидкой частицы при ЭМН точными аналитическими методами не предоставляется возможным [1]. Это обусловлено нелинейностью граничных условий, конечными размерами тел, изменением теплофизических свойств покрытия и основы. Поэтому для изучения теплообмена в контакте основы с жидкой каплей расплава порошка воспользуемся приближенным методом А.И. Вейника [2].

Рассмотрим задачу кристаллизации и охлаждения жидкой частицы порошка на основе. Математическая модель процесса кристаллизации и охлаждения жидкой

частицы включает в себя систему уравнений, описывающих температурное поле в покрытии и основе, начальные условия (распределение температуры по сечению тел в начальный момент времени), граничные условия теплового взаимодействия системы тел основа–покрытие–окружающая среда, геометрические параметры (размеры, конфигурация) и теплофизические свойства взаимодействующих тел.

Пусть в момент времени $t_0=0$ жидкий расплав, имеющий температуру кристаллизации T_m , соприкасается с массивной основой, имеющей начальную температуру T_0 (рис.1). Теплоотдачу в окружающую среду не учитываем. Тогда поля температур в затвердевшем объеме покрытия и основы можно представить в виде следующих функций [2]:

$$T_1 = -\left(T_m - T_k\right)\left(\frac{x}{x_1}\right)^{n_1} + T_m;$$

$$T_2 = \left(T_k - T_0\right)\left(\frac{x}{x_2}\right)^{n_2} + T_0,$$

где x_1 – толщина закристаллизовавшейся капли к моменту времени t ; x_2 – глубина прогретого слоя основы в тот же момент времени; T_k – температура в точке контакта; T_m – температура кристаллизации жидкого расплава; n_1 и n_2 – параметры кривой.

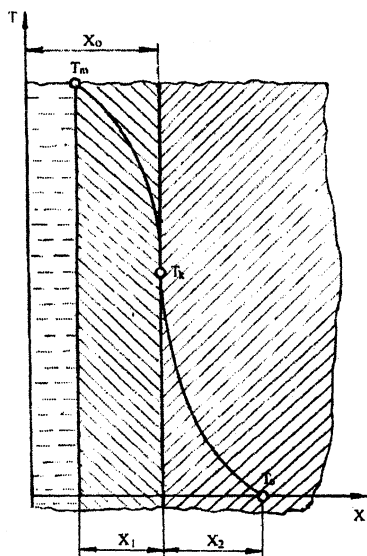


Рис. 1. Схема распределения температуры в сечениях покрытия и основы.

Точка контакта находится в тепловом равновесии, т.е.

$$dQ_1 = dQ_2. \quad (1)$$

Уравнение теплового баланса для единицы длины формируемого покрытия имеет следующий вид:

$$dQ_1 = dQA_1 + dQ_m. \quad (2)$$

Левая часть уравнения (2) выражает накопление теплоты в покрытии сечением F в единицу времени

$$dQ_1 = \lambda_1 n_1 \frac{T_m - T_k}{x_1} F dt,$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности материала частицы.

Первый член правой части уравнения (2) представляет собой количество аккумулированной теплоты покрытием сечением F :

$$dQ_{A1} = \frac{1}{n_1 + 1} F \rho_1 C_1 (T_m - T_k) dx_1,$$

где ρ_1 , C_1 – соответственно плотность и теплоемкость материала частицы.

Второй член правой части уравнения (2) равен количеству теплоты кристаллизации покрытия сечением F

$$dQ_m = FL \rho_1 dx_1,$$

где L – скрытая теплота кристаллизации.

Уравнение теплового баланса нагрева основы можно представить как

$$dQ_2 = dQA_2. \quad (3)$$

Левая часть уравнения (3) представляет собой накопление теплоты в основе в единицу времени:

$$dQ_2 = \lambda_2 n_2 \frac{T_m - T_k}{x_2} F dt,$$

где λ_2 – коэффициент теплопроводности материала основы.

Правая часть уравнения (3) выражает количество аккумулированной теплоты основой:

$$dQ_{A2} = \frac{1}{n_2 + 1} \rho_2 C_2 (T_k - T_o) dx_2,$$

где ρ_2 , C_2 – соответственно плотность и теплоемкость материала основы.

Равенство (1) можно переписать в виде:

$$\lambda_1 n_1 \frac{T_m - T_k}{x_1} = \lambda_2 n_2 \frac{T_k - T_o}{x_2} \quad (4)$$

или

$$\frac{1}{n_1 + 1} \rho_1 C_1 (T_m - T_k) + L \rho_1 x_1 = \frac{1}{n_2 + 1} \rho_2 C_2 x_2 (T_k - T_o). \quad (5)$$

Выразив из (4) разность температур и подставив в (5), получим следующее квадратное уравнение:

$$\beta v^2 - \gamma v - (1 + \gamma) = 0, \quad (6)$$

где приняты следующие обозначения:

$$\beta = \frac{1}{k_\epsilon^2} \frac{n_2 (n_1 + 1)}{n_1 (n_2 + 1)}; \quad k_\epsilon = \frac{\sqrt{\lambda_1 C_1 \rho_1}}{\sqrt{\lambda_2 C_2 \rho_2}}; \quad v = \frac{\lambda_1 n_1 x_2}{\lambda_2 n_2 x_1}; \quad \gamma = (n_1 + 1) \frac{L}{C_1 (T_m - T_o)}.$$

Решению уравнения (6) соответствует корень

$$v = \frac{\gamma + \sqrt{\gamma^2 + 4\beta(1 + \gamma)}}{2\beta}.$$

Так как $v = \text{const}$, то постоянной будет и температура контактной поверхности, определяемая выражением

$$T_k = \frac{v T_m + T_o}{1 + v}.$$

Запишем дифференциальное уравнение теплового баланса для покрытия:

$$\lambda_1 n_1 \frac{T_m - T_k}{x_1} dt = \frac{1}{n_1 + 1} \rho_1 C_1 (T_m - T_k) dx_1 + L \rho_1 dx_1. \quad (7)$$

Интегрируя (7), получим полное время кристаллизации слоя расплава толщиной x_o

$$t = \left[\frac{1}{n_1 (n_1 + 1)} + \frac{L}{n_1 C_1 (T_m - T_k)} \right] \frac{x_o^2}{2a_1}, \quad (8)$$

где $a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 C_1}.$

На основании полученных выражений (1)...(7) с помощью пакета прикладных программ MATHCAD PLUS 6.0 и MATHEMATICA 2.2 осуществили расчет термического цикла контакта капле расплава частиц различных ферропорошков с основой. Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3.

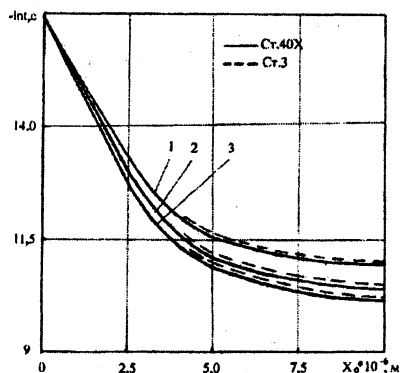


Рис. 2. Продолжительность кристаллизации капле расплава частиц ферропорошков Сталь45-1%B (1), Fe-9%B (2), P6M5 (3) по толщине покрытия

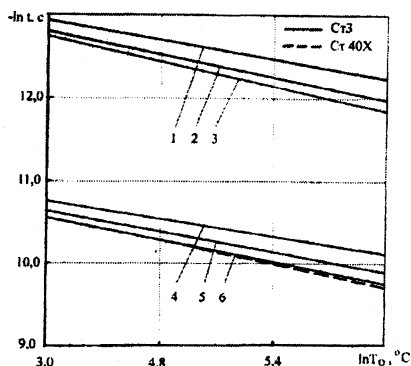


Рис. 3. Зависимость времени кристаллизации капле расплава частиц ферропорошков Сталь45-1%B (1, 4), Fe-9%B (2, 5), P6M5 (3, 6) от начальной температуры основы для различных толщин частицы: 1, 2, 3 - 10^{-6} м, 4, 5, 6 - 10^{-5} м.

Анализ последних показывает, что продолжительность кристаллизации капле расплава порошка находится в степенной зависимости от величины начальной температуры основы T_0 . При кристаллизации капле различной толщины характер этой зависимости не изменяется. Как следует из выражения (8), аналогичное влияние на изменение временного интервала кристаллизации капле оказывает ее начальная температура T_m .

Таким образом, приведенные результаты позволяют количественно оценить влияние основных теплофизических параметров материалов покрытия и основы на продолжительность цикла термического взаимодействия. Изменяя путем варьирования данных параметров интенсивность теплового потока в направлении плоскости контакта капли расплава с основой, можно получить требуемое время кристаллизации, что создает предпосылки для регламентированного управления процессом ЭМН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Есьман Р.И., Бахмат В.А., Королев В.М. Теплофизика литейных процессов. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 144 с.
2. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 184 с.

Е. А. Памфилов, П. Г. Пыриков, А. С. Рухлядко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТА

*Брянская государственная инженерно-технологическая академия
Брянск, Россия*

Возросшие в последнее время требования к качеству отечественной продукции обусловили повышенное внимание к вопросам обеспечения работоспособности деталей промышленного оборудования и режущего инструмента. Весьма существенное влияние на их эксплуатационные характеристики оказывает фактор износоустойчивости, определяющий продолжительность оперативного периода работоспособности. Широкое многообразие технологических приемов ее обеспечения не снижает актуальности совершенствования технологий упрочнения материалов и разработки новой, высокоэффективной методологии их реализации.

Значительная роль в управлении прочностными свойствами металлических материалов отводится свойству их магнитной восприимчивости и, в частности, магнитной анизотропии. Влияние указанного фактора выражено в возможности обеспечения направленной (регламентированной) кристаллизации металлов при упрочнении высокоэнергетическими источниками, в результате которого в зонах износа формируется благоприятное с позиций износостойкости параметрическое состояние в форме управляемой текстуры, способной характеризоваться анизотропией упругих и пластических свойств.

Данный метод весьма эффективен, поскольку наряду с кристаллографической регламентацией субструктуры он позволяет обеспечить упорядоченность и в зернограницных формах. Однако в ряде случаев влияние ориентировки субструктуры на износостойкость металла оказывается малозначительным, и доминирующая роль отводится более высоким кристаллографическим порядкам. В этой связи применение относительно сложной технологии формирования многозонального текстурирования (анизотропии), обязательным условием для которого является эффект перекристаллизации, оказывается нецелесообразным.

Упорядоченность в дислокационных скоплениях, регламентацию межзеренных границ представляется возможным обеспечить в управляемых магнитных полях, не прибегая к термическому воздействию. Для этого упрочняемый объект помещают в однородное магнитное поле, конфигурацию которого устанавливают с учетом формы объекта и размагничивающих потерь. Напряженность магнитного поля оп-

ределяют с учетом необходимости обеспечения трансляционного перемещения дислокаций и самих зерен, в ряде случаев представляющих однодоменную структуру, в регламентированных направлениях.

Таким образом, добиваются регламентированной упорядоченности в движении точечных дефектов, суммирующихся в трансляционные дислокационные группировки, искажающие симметрию решетки на уровне субструктуры. При этом отношение размера зерен и блоков субструктуры уменьшается, а их аддитивное влияние на критическую величину трансляционного смещения, описанную уравнениями Петча и Болла, оказывается равнозначным.

Источниками трансляционного перемещения доменов в поликристаллической структуре следует считать линейные несовершенства, обуславливающие неравномерность в сопротивлении сдвиговым напряжениям по ортогональным плоскостям. Каскадное перемещение дислокаций облегчается их взаимной аннигиляцией при стоках к когерентным коллекторам – границам зерен и переходе через межзеренные границы. При этом имеет место повышение плотности дислокаций в приграничных областях до некоторого критического значения, характеризующего переход экстраплоскости в полные плоскости кристаллов зонального ряда и коагуляцию доменов. Интенсивность их взаимопоглощения (деформация зерен) оказывается обратно пропорциональной углу между векторами намагниченности доменов и напряженности поля.

Таким образом, энергетической стимуляцией к перемещению дислокаций следует считать упорядоченность магнитных моментов атомов в пределах домена, а также ориентацию вектора напряженности поля. Избирательность в направлениях трансляции, кроме того, обусловлена ратикулярной плотностью кристаллов, при которой скольжение облегчается в плотноупакованных плоскостях.

Интенсивность данного процесса имеет отрицательный градиент от поверхности, что, по-видимому, связано с краевыми эффектами намагничивания. Период его протекания коррелирует с магнитной восприимчивостью материала, напряженностью поля, а также с рядом механических и структурных характеристик. С превышением некоторой критической величины напряженности поля дислокационное перемещение становится одноосным. Структурная стабилизация имеет определенную связь с коэрцитивной силой, характерной для данного материала, однако, по-видимому, приоритет здесь принадлежит необратимым процессам пластического деформирования, обуславливающим появление уровня остаточных напряжений 2 и 3 рода.

В последнее время проводятся исследования по оценке влияния температурного и механического фактора нагружения на сохраняемость магнитной структуры и ее связь с сопротивляемостью металлических материалов изнашиванию в различных формах его проявления.

ПРИМЕНЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

*Брянская государственная инженерно-технологическая академия
Брянск, Россия*

Повышение износостойкости инструмента является одной из важных задач, решение которой способствует достижению более высокой эффективности производства. Особенно актуальна эта задача в условиях эксплуатации инструмента при низких климатических температурах и при резании мерзлой древесины, когда интенсивность его изнашивания резко возрастает.

Снижение сопротивляемости изнашиванию в указанных условиях связано с изменением под действием температур физико-механических свойств древесины и материала инструмента. Затупление режущего инструмента существенно интенсифицируется вследствие возрастания выкрашивания и сколов в результате увеличения нагрузки на лезвие из-за роста прочностных характеристик древесины и снижения пластических свойств инструментального материала, происходящего за счет активного воздействия продуктов деструкции древесины и температурного охрупчивания.

В связи с вышеизложенным важно выбрать эффективные методы упрочняющей обработки для указанных условий эксплуатации инструмента.

Для достижения этой цели перспективными являются методы, основанные на обработке поверхностей концентрированными потоками энергии. Воздействие высоких энергий на поверхностные слои позволяет направленно и в существенной степени изменять их свойства.

Среди них вызывают интерес электроискровое упрочнение и плазменная обработка. Насыщение поверхностных слоев при электроискровом легировании карбидообразующими элементами, например хромом, молибденом и вольфрамом, препятствует газонасыщению металла. Однако возникающие в процессе электроискрового воздействия дефекты поверхности и повышенная ее шероховатость делают затруднительным использование упрочненного инструмента без последующей обработки.

Плазменное упрочнение способствует формированию поверхностного слоя, обладающего высокими значениями микротвердости, и существенному измельчению размеров зерен.

Однако при работе инструмента в рассматриваемых условиях повышения износостойкости каждым методом в отдельности недостаточно. Для снижения отрицательного влияния от совместного действия климатически низких температур и наводороживания предлагается проведение электроискрового легирования и последующей плазменной обработки. При этом происходит формирование поверхностного слоя повышенной износ- и водородостойкости, насыщенного легирующими элементами, и нижележащего слоя металла с более высокими пластическими свойствами, способствующими снижению выкрашивания режущей кромки. Плазменный нагрев после электроискрового легирования приводит к диффузии легирующих веществ на большую глубину, что снижает степень воздействия температуры на пластические свойства материала. Многократный плазменный нагрев приводит к дополнительной диффузии легирующих элементов в глубь металла, увеличивает степень дисперсности микроструктуры и достигается более равномерное распределение карбидов в массе основного металла.

Для определения рациональных режимов плазменного упрочнения дереворежущих пил были проведены эксперименты на образцах из стали 9ХФ. В качестве величины, характеризующей тепловой режим нагрева, была использована погонная мощность плазменной струи, варьируемая за счет изменения силы тока.

Плазменный нагрев производился на установке «Plasma-Technik» (Швейцария) при следующих режимах: напряжение на плазмотроне 45–50 В, ток 180–300 А, расстояние от упрочняемой поверхности до плазмотрона 8–10 мм, скорость перемещения пилы относительно плазмотрона 8–9 см/с.

Электроискровое легирование выполнялось на установке ЭФИ-46 электродами из хрома, молибдена и вольфрама при силе тока короткого замыкания 3,8–4,0 А и числе разрядов на 1 см²– 320–340.

Анализ результатов экспериментов показал, что в результате применения комплексного упрочнения, заключающегося в электроискровом легировании и последующем многократном плазменном воздействии, происходит формирование высокого уровня физико-механических характеристик поверхностных слоев. На рис.1 приведены экспериментальные данные, характеризующие изменение микротвердости поверхности и глубины упрочненного поверхностного слоя от погонной мощности плазменной струи. Как видно из этих графиков, с увеличением Q_p микротвердость и размеры зоны упрочнения увеличиваются и достигают наиболее высокого значения при мощности, равной 0,25–0,27 кДж/см. При этом режиме комплексного упрочнения микротвердость достигает HV 950–980. При дальнейшем увеличении погонной мощности плазменной струи значения микротвердости снижаются и при 0,3–0,32 кДж/см происходит оплавление поверхности. В случае электроискрового упрочнения микротвердость повышается с HV 400–430 до – HV 790–810, при плазменном до HV 900–930.

Обработка профилограмм показала, что электроискровое легирование повышает шероховатость упрочненной поверхности до Ra 2,7–3,2. Плазменное воздей-

ствие в случае неоплавления поверхности параметры исходной шероховатости не изменяет. При комплексном упрочнении в зоне плазменного воздействия наблюдается сглаженный микрорельеф, шероховатость поверхности уменьшается по сравнению с исходной, сформированной в результате электроискровой обработки на 20–30% и достигает Ra 2,1–2,3.

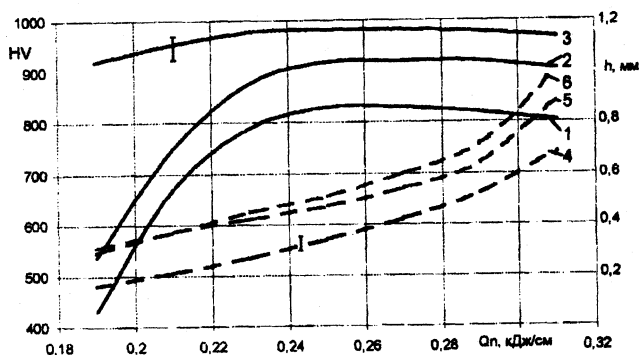


Рис. 1. Зависимость микротвердости поверхности HV (—) и глубины зоны упрочнения h (---) от погонной мощности плазменной струи: 1, 4 – однократное плазменное воздействие (ПВ); 2, 5 – трехкратное ГТВ; 3, 6 – комплексное упрочнение с трехкратным ПВ.

В упрочненных поверхностных слоях наблюдается рост микродеформации кристаллической решетки и повышение уровня дисперсности микроструктуры. Наиболее рациональное сочетание микродеформации и дисперсности микроструктуры достигается при комплексном упрочнении с трехкратным плазменным воздействием (рис. 2).

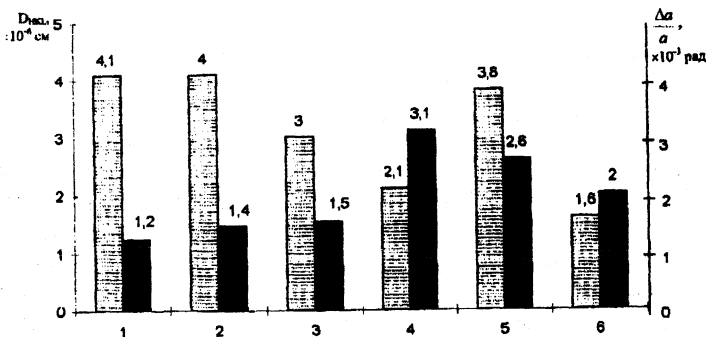


Рис. 2. Размеры блоков мозаики v и микронапряжений $\Delta\sigma$ в кристаллической решетке: 1 – без упрочнения; 2 – электроискровое упрочнение; 3 – однократное ПВ; 4 – трехкратное ПВ; 5 – комплексное упрочнение с однократным ПВ; 6 – комплексное упрочнение с трехкратным ПВ.

Рентгеноспектральный анализ позволил установить, что в зоне плазменного воздействия при комплексном упрочнении происходит диффузия легирующих элементов вглубь металла. Толщина поверхностного слоя, насыщенного легирующими элементами, при этом увеличивается в 2,5–3 раза, достигая 0,2–0,3 мм.

С целью экспериментального подтверждения эффективности комплексного метода упрочнения для дереворежущего инструмента были проведены испытания упрочненных стальных круглых пил при торцовке заготовок из древесины сосны влажностью 120–150 % и температурой -15–18°C. Установлено, что износостойкость исследуемого инструмента при применении упрочняющей обработки возрастает в 2,9–3,5 раза.

Для практического использования метода комплексного упрочнения стальных круглых и рамных пил рекомендуются следующие режимы упрочняющей обработки: сила тока короткого замыкания – 3,8–4,0 А, плотность разрядов на 1 см² 320–340, материал легирующих электродов – Cr, W, Mo, погонная мощность плазменной струи – 0,25–0,28 кДж/см, число циклов плазменного воздействия – 2–3. Использование данных рекомендаций позволяет повысить износостойкость инструмента, обеспечить его более продолжительную работу между переточками и увеличить срок службы.

УДК 691.175

Н. В. Спиридонов, А. С. Володько, Л. И. Пилецкая, Д. В. Степук

ДЕКОРАТИВНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Одной из важнейших областей применения термопластических материалов является антикоррозионная защита, независимо от того, применяется ли пластмасса в качестве конструкционных элементов или как покрытие на несущие конструкции. С помощью полимеров и композиций на их основе можно решать такие технические задачи, которые невозможно решить при использовании обычно применяемых при напылении материалов.

При газоплазменном напылении применяется в основном порошковый полимерный материал, частицы которого оплавляются при прохождении через пламя, а нагретая до температуры плавления полимера поверхность изделия способствует полному расплавлению напыленного слоя и образованию однородного покрытия.

Напыление полимеров в виде проволоки невозможно, т.к. низкая теплопроводность полимеров и низкая температура их разложения препятствуют расплавлению проволоки в пламени: она у поверхности разлагается прежде, чем ее внутренняя зона нагревается до температуры плавления.

При напылении полимеров наибольшее распространение получили полиолефины (полиэтилен, полипропилен), пентопласт, фторпласт, эпоксидные, акриловые и полиэфирные материалы. Полиолефиновые покрытия выполняют преимущественно защитную функцию, т.к. отличаются высокой химической стойкостью к действию многих агрессивных сред. Полиэтиленовые покрытия также обладают хорошей эластичностью, ударной стойкостью и сопротивлением истиранию. Покрытия обладают высокой стойкостью к моющим средствам, солям, влаге, кислотам. Благодаря высокому электрическому сопротивлению их можно применять как электроизоляционные.

Обладая защитно-декоративными свойствами, полимерные композиции на основе полиэтилена с красящими добавками должны найти применение при нанесении защитных покрытий на элементы зданий, сооружений, оборудования.

В настоящее время метод газотермического напыления защитных покрытий применяется в основном для упрочнения и восстановления деталей машин и технологического оборудования.

Однако в начале своего развития метод газопламенного напыления применялся в основном для нанесения покрытий с целью декорирования различных предметов. Например, на изделия из обожженной глины можно наносить покрытия из бронзы или меди. В этой связи можно рекомендовать этот метод для декоративной отделки элементов зданий и сооружений из красного кирпича. Покрытия из бронзы, меди или латуни применяются только для внутренней отделки сооружений, где нет наружной коррозии, в противном случае применяются цинковые или алюминиевые напыленные покрытия. Толщина таких покрытий не превышает 0,5 мм, а подготовка поверхности в этом случае не нужна [1]. Имеется ряд неметаллических материалов, на поверхности которых можно напылять покрытия. На стекло и фарфор покрытия наносят с применением струйной обработки. На гипс, бетон, камень можно напылять покрытия без специальной подготовки поверхности, однако на таких поверхностях не должно быть следов грязи, масла, краски или влаги, т.к. образовавшиеся водяные пары могут отделить покрытие от основы.

Из целого ряда элементов здания для напыления была выбрана металлическая кровля – наиболее подверженная коррозии часть сооружения. Из оборудования для восстановления были выбраны раскатные валики красочных аппаратов типа «Котмаиог», служащие для растирания типографской краски и корродирующие под ее воздействием. В качестве основы полимерной композиции был выбран ПЭВД (полиэтилен высокого давления) и ПЭНД (полиэтилен низкого давления) грануляцией до 200 мкм в состоянии поставки.

Покрyтия при применении чистого полиэтилена низкого давления имеют склонность к растрескиванию и поэтому предпочтение отдается смесям из полиэтилена низкого и высокого давления [1].

Широкому использованию полиэтилена для защиты изделий препятствует низкая адгезия его к металлу, обусловленная невысокой полярностью полимера. Для увеличения адгезии полиэтилена и других полярных полимеров применяются различные методы: введение катализаторов, активизирующих процесс окисления; нанесение полимеров на окисленный слой металла; нанесение подслоя с развитой шероховатостью; струйная обработка.

В настоящее время на практике не применяются покрытия из чистого полиэтилена, все они соответствующим образом модифицированы различными добавками.

В качестве катализатора применялась окись хрома (Cr_2O_3) – для повышения прочности сцепления с основой и как декоративная красящая добавка в покрытие. Хорошие декоративные свойства покрытия получаются при напылении композиции с применением добавки, начиная с 7% от общего веса. Основным критерием при выборе композиции была взята прочность сцепления покрытия с основой, которая позволяет определить область применения и эксплуатационные характеристики покрытия. Прочность сцепления в основном зависит от подготовки поверхности и свойств напыляемого и основного материалов. Соединение напыленного слоя с основой происходит преимущественно путем механического сцепления распыляемых частиц с неровностями шероховатой и увеличенной поверхности обрабатываемого изделия, а также возможной адгезии, сил усадки, частичного приваривания.

Для повышения прочности сцепления напыленного слоя с основой широко применяется дробеструйная обработка. Такая подготовка очищает поверхность и выводит ее из состояния динамического равновесия со средой, освобождает межатомные связи поверхностных атомов, т.е. активизирует подложку.

Для определения прочности сцепления применялся известный штифтовой метод.

Напыляемая поверхность образца подвергалась струйной обработке. Шероховатость поверхности определяли на профилографе-профилометре 252. Наносилось покрытие толщиной 3 мм из ПЭВД в состоянии поставки и ПЭВД, модифицированного 10% Cr_2O_3 . Введение наполнителя Cr_2O_3 позволяет повысить прочность сцепления покрытия, поскольку Cr_2O_3 является катализатором, активизирует процесс окисления и образования полярных кислородосодержащих групп на поверхности раздела металл–полимер.

На рис. 1 показана зависимость прочности сцепления покрытия из полиэтилена с основой из стали 3 от шероховатости поверхности.

Следует учитывать то обстоятельство, что на участке между поверхностью штифта и основой происходит концентрация напряжений, приводящая к разрушению покрытия при более низких значениях нагрузки. Поэтому полученные значения прочности сцепления несколько занижены. Применение других катализаторов, например активной сажи, не позволяет получить хороший декоративный вид.

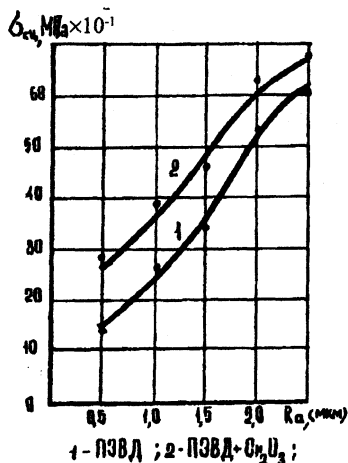


Рис. 1. Зависимость прочности сцепления покрытий из ПЭВД с основой из ст. 3 от шероховатости поверхности

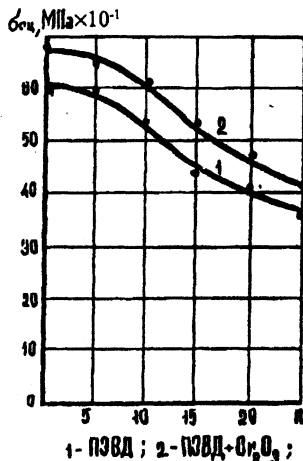


Рис. 2. Зависимость прочности сцепления покрытий из ПЭВД с основой из ст. 3 от количества циклов в морозильной камере

Поэтому составлялась композиция ПЭВД + 10% Cr₂O₃, что позволяет повысить прочность сцепления и получить насыщенный зеленый цвет.

Повышение шероховатости также приводит к увеличению прочности сцепления. Поэтому следует рекомендовать струйную обработку для подготовки поверхности под напыление полимерных композиций.

Так как кровля здания находится на открытом воздухе и зимой подвержена перепадам температур, были проведены исследования по определению морозостойкости покрытий.

Образцы закаливались в воде в течение 24 ч., затем замораживались при -20°C в морозильной камере (4 ч.), затем оттаивались в водопроводной воде (2 ч.) График зависимости прочности сцепления от количества циклов в морозильной камере приведен на рис. 2.

Термораспылительная установка ТРУ обеспечивает высокую производительность, равномерную подачу порошковой композиции, которая подается в горелку от отдельного питателя.

При выборе режимов напыления учитывалось то обстоятельство, что полиэтилен имеет температуру плавления 220–240°C. Поэтому газопламенную горелку настраивали на короткий факел пламени и высокую скорость подачи газопорошковой смеси. Напыление осуществлялось на пропан-бутан-кислородной смеси, для транспортировки порошка, обжима факела и охлаждения сопла применялся сжатый воздух.

После напыления покрытия имеют избыточную пористость и шероховатость. С целью ликвидации пор для улучшения прочности сцепления и коррозионной стойкости применяют термообработку покрытий.

На рис. 3 показаны графические зависимости прочности сцепления от температуры и времени термообработки покрытия. В результате термообработки улучшаются и декоративные свойства – покрытие приобретает ровную глянцевую поверхность.

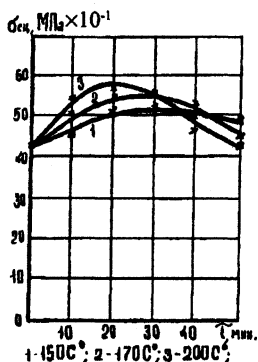


Рис. 3. Влияние температуры и времени термообработки на прочность сцепления покрытий из ПЭВД на ст. 3.

Для испытания защитных покрытий в различных климатических условиях были смоделированы условия, соответствующие испытанию на морозоустойчивость, стойкость к ультрафиолетовому излучению (солнечному воздействию) и возможность попадания покрытий под кислотный дождь (коррозионную стойкость).

Так как подобному характеру воздействия больше других элементов зданий подвержена кровля, то выбрали для изготовления образцов кровельное железо с напыленным покрытием (ПЭВД+10% Cr_2O_3) толщиной 0,3...0,4 мм.

Поскольку в естественных условиях процесс занял бы много времени, применяли камеры для климатических испытаний строительных материалов при интенсивных нагрузках. Одна партия образцов замачивалась в течение 24 ч., затем замораживалась в морозильной камере 42 ч., а после оттаивалась в водопроводной воде. Образцы выдержали 30 циклов без отслоения покрытия и изменения внешнего вида.

Таким образом, разработанные полимерные композиции могут применяться в качестве защитно-декоративных покрытий на элементы зданий, сооружений и оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Металлургия, 1992. – 429 с.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ АРМИРОВАННЫЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ВЫТЯЖКИ ПРОВОЛОКИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

При разработке состава газотермического покрытия для вытяжки проволоки была взята композиция самофлюсующийся сплав на основе никеля и карбида вольфрама (WC) и исследовались следующие зависимости: влияние гранулометрического состава самофлюсующегося порошка и конгломерированного порошка карбида вольфрама на пористость, твердость и структуру покрытия, температуру плавления порошка: формирование структуры от времени нагрева.

Шихта для спекания готовилась двух составов: а) 40 и 60; б) 60 и 40 весовых частей порошка ПГ-ХН80С4Р4 и конгломерированного карбида вольфрама (WC) соответственно. Температура плавления выбиралась из следующих соображений: в процессе плавления не должно происходить химических превращений в карбиде вольфрама, появление тонких прослоек окислов по границам зерен препятствует сплавлению порошка. Температура плавления конгломерированного карбида вольфрама – от 1350 до 1470°C. Температура плавления ПГ-ХН80С4Р4 – около 980–990°C, ПГ-ХН80СЗР3 – 1050–1100°C. Поэтому температуру плавления шихты следует выбирать в интервале температур 900–1400°C, т.к. самофлюсующийся сплав должен расплавиться, а порошок карбида вольфрама должен находиться в нагретом состоянии достаточное время, чтобы в граничных областях гранул произошла диффузия в никелевый сплав, но в центре гранул не должны происходить процессы коагуляции зерен, т.к. при этом теряются прочностные свойства порошка. Кроме того, самофлюсующийся сплав на основе никеля представляет собой пластичную матрицу на основе никелевого раствора, армированного разветвленным остовом развитых непрерывных эвтектических колоний, упрочняющих сплав наподобие арматуры в железобетоне.

В таком виде в покрытии оптимально сбалансированы прочностные и пластические свойства. Воздействующие на поверхность покрытия нагрузки распределяются по всей толщине. Введение в покрытие конгломерированного порошка WC размером до 100 мкм (по толщине покрытия может быть уложено 8–10 слоев таких частиц) значительно влияет на распределение нагрузки. Возможны три варианта сцепления введенных частиц с покрытием. Первый – без образования химической, диффузионной или металлической связи частиц армирующего порошка при недо-

греве. В этом случае матрица из никелевого сплава образует непрерывную среду, в ней расположены механически закрепленные частицы с резко отличающимися прочностными свойствами. В процессе изнашивания происходит усталостное разрушение более мягкой составляющей – самофлюсующегося сплава, обнажение более твердой составляющей и его последующее выкрашивание. Причем, отколовшиеся частицы сами становятся абразивом, разрушающим покрытие. Вторым возможным вариантом – жидкофазное спекание.

В этом случае происходит спекание двух многокомпонентных систем, одна из которых находится в жидком состоянии, другая – в твердом. Появление жидкой фазы при спекании существенно активизирует процессы усадки и формирования структуры за счет снижения вязкости системы, более легкого межчастичного скольжения и перегруппировки, интенсификации массопереноса. Жидкофазное спекание существенно зависит от смачивания жидкими компонентами твердых поверхностей. При полном смачивании краевого угол равен нулю. Как следует из [1], краевого угла равен нулю при смачивании жидким никелем карбида вольфрама при температуре 1450°C. Обычно температура сплавления в присутствии жидкой фазы или температура пропитки превышает температуру появления жидкой фазы эвтектики самофлюсующегося сплава на 70-100°C. Принято различать несколько стадий сплавления: заполнение жидкой фазой зазоров между частицами (жидкие прослойки играют роль своеобразной смазки, образуя стягивающие «манжеты»). На этой стадии особенно важна роль гранулометрического состава шихты. Вторая стадия – это растворение-осаждение (химическая перегруппировка), придающая частицам правильную форму. Именно на этой стадии происходит проникновение жидкой фазы (твердого раствора никеля) по границам зерен в частицу карбида вольфрама, с одной стороны, и диффузное распространение карбида в никелевом растворе, с другой стороны. При охлаждении из этой стадии по границам конгломерированных частиц карбида межзеренная прослойка обогащается никелем, образуя с ним неограниченный твердый раствор, а с другой стороны, в никелевой матрице, окружающей частицу, выделяется в виде эвтектики сложный карбид типа $(W, Cr)_7C_3$. Именно этой стадией должен ограничиваться процесс сплавления, а, следовательно, температура должна быть выбрана в очень ограниченном интервале – достаточная для плавления легкоплавкой эвтектики $Cr-B-Ni_3B$, Cr_7C_3-N , но недостаточная для превращения WC в WC_2 .

Третья фаза в спекании – это полное (на всю глубину частицы) проникновение жидкой фазы по границам зерен (своеобразное межкристаллитное разрушение) с последующим растворением мелких частиц, выравниванием концентрации твердого раствора никеля по порошинке и фактическим распадом частицы. Это происходит при увеличении температуры и времени нагрева. При отсутствии перемешивания говорить о получении однородной структуры нельзя. После кристаллизации покрытие будет представлять собой никелевую матрицу, в которой отсутствуют инородные частицы. В матрице будут наблюдаться зоны размеров до 100 мкм с повышенной концентрацией карбида вольфрама, с повышенной хрупкостью и твер-

достью, не уравновешенные пластичной связкой. В этом случае реализуется третий из возможных вариантов сцепления частицы с матрицей из самофлюсующегося сплава — полное взаимное растворение элементов. Появление зон повышенной хрупкости приводит к быстрому разрушению покрытий.

Таким образом, из требований, предъявляемых к структуре и составу покрытия, следует, что температура задается в узком интервале 1100–1250°C, время нагрева зависит от массы детали.

Минимальная пористость получена в сплаве с размером частиц 60–80 мкм. Однако замечено, что нельзя одновременно использовать порошок с разным гранулометрическим составом, т.е. нельзя использовать порошок размером 40–80 мкм, т.к. в процессе коагуляции из-за ухудшения смачиваемости образуются поры, отсутствует сплавление, что отрицательно влияет на эксплуатационные свойства.

Исследовали влияние гранулометрического состава самофлюсующегося порошка на пористость. Необходимо использовать порошок равной или более мелкой фракции, т.к. в связи с неправильной формой частиц не вся граница смачивается, частица сплавляется не по всей поверхности.

Содержание армирующего порошка в шихте определяется не только требованиями к повышению твердости покрытия, но и характером внешних нагрузок. Предполагается, что покрытие с шероховатостью поверхности 0,12 мкм (по ТУ шероховатость должна быть менее 0,20 мкм) подвергается трению проволокой с высоким содержанием углерода, латунированной, движущейся по поверхности покрытия со скоростью 25 м/с. Среда трения — масляная эмульсия с pH 8+/-0,5. Рифления на поверхности проволоки в первую очередь будут разрушать более мягкую матрицу из самофлюсующегося сплава. Поэтому расстояние между армирующими частицами должно быть таким, чтобы в процессе трения проволока базировалась на них по всей поверхности конуса. Отсюда требования к содержанию порошка в шихте — более 50%. Однако расстояние между упрочняющими частицами должно быть достаточным для обеспечения равномерного распределения прикладываемой к твердой и хрупкой частице нагрузки на упругую никелевую матрицу. Окончательное содержание компонентов в них было принято: 40% ПГХН80С4Р4 — + 60% карбида вольфрама.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения. — М.: Металлургия, 1978. — 176 с.

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЦЕЛЬНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

*Брянская государственная инженерно-технологическая академия
Брянск, Россия*

Условия эксплуатации большинства деталей машин и инструментов характеризуются ударно-циклическим нагружением, в ряде случаев сопровождающимся интенсивным газонасыщением поверхностных слоев конструкционных и инструментальных материалов. Закономерности их изнашивания в данных условиях реализуются по механизмам поверхностного микровыкрашивания и истирания, причем с наибольшей интенсивностью при образовании поверхностных микротрещин, имевшихся перед началом работы или образовавшихся в процессе эксплуатации.

Учитывая, что сочетание определенных параметров материала, формирующееся на стадии приработки, способно определить интенсивность его изнашивания и в последующие периоды, повышенное внимание в данной работе уделялось обеспечению сопротивляемости материалов трещинообразованию и охрупчиванию.

Установлено, что зарождение усталостной микротрещины происходит чаще всего в поверхностных слоях, поэтому характер приложения внешней нагрузки, знак, величина и глубина распространения остаточных напряжений являются доминирующими факторами по степени влияния в комплексе параметрического состояния.

Охрупчивание поверхностных слоев, стимулирующее трещинообразование и, как следствие, микровыкрашивание, интенсифицируется под воздействием повышенных температур на контакте и присутствия агрессивных летучих соединений, в которых наибольшее влияние на разрушение материала оказывает водород. Проникая в микротрещины он ускоряет процесс их развития за счет создания дополнительного напряженного состояния (растягивающих напряжений) в вершинах.

Совместное действие остаточных напряжений растяжения в поверхностных слоях и их газонасыщение, по нашим данным, способно снизить износостойкость конструкционных и инструментальных материалов на 25 – 30%.

Таким образом, для обеспечения экономически обоснованной стойкости требуется проведение эффективной упрочняющей обработки, позволяющей создать в зонах износа благоприятную с позиций сопротивляемости изнашиванию совокупность свойств поверхностных слоев: микрогеометрию, микротвердость, остаточные напряжения, наличие слоев, препятствующих насыщению водородом и др.

Среди отмеченных характеристик управляемое формирование требуемого уровня остаточных напряжений и минимизация наводороживания поверхностных слоев представляют достаточно серьезную технологическую сложность, что связано с проблемой взаимоувязки уровней факторов, составляющих качество поверхностного слоя.

В связи с этим нами разработан метод комплексной упрочняющей обработки, включающий в себя направленное упругое деформирование поверхностных слоев в зоне упрочнения, электроискровое легирование, последующее снятие нагрузки и доводку упрочненной поверхности эластичным шлифованием. На рис. 1 представлена схема обработки.

Обработка ножей сборных фрез



Рис. 1. Принципиальная схема упрочняющей обработки ножей с созданием регламентированного уровня остаточных напряжений.

Учитывая, что при электроискровой обработке в поверхностных слоях инструмента образуются остаточные напряжения растяжения, способствующие появлению и распространению микротрещин, деформацию инструмента предполагалось назначать таким образом, чтобы направление действия формируемых остаточных напряжений сжатия было ориентировано перпендикулярно плоскости распространения трещины.

Затем выполняется упрочняющая обработка поверхности с соблюдением принципа воздействия электрических разрядов в области регламентированной технологической деформации. Причем за счет направленной деформации увеличивается глубина проникновения легирующих элементов, способствуя уменьшению насыщения водородом рабочих поверхностей.

Режимы выполнения упрочняющей обработки устанавливаются с учетом необходимости формирования благоприятного сочетания параметров микротвердости и шероховатости упрочненной поверхности.

С целью обеспечения равномерного упрочняющего воздействия на инструмент по длине прикромочной зоны упрочняющая обработка проводится сплошной полосой, параллельно действию растягивающих напряжений (вдоль режущей кромки).

После завершения упрочнения деформирующая нагрузка снимается и обрабатываемый инструмент приобретает первоначальную форму; при этом в поверхностных слоях образуются благоприятные по величине остаточные напряжения сжатия.

Нами разработана экспериментальная установка, обеспечивающая управление величинами деформации упрочняемого образца и регулирование положения источника упрочнения относительно обрабатываемой поверхности.

Источником упрочнения являлась модернизированная нами установка ЭФИ-46, включающая высокоскоростную электродную головку – электрододержатель, приводимую во вращение пневмодвигателем, компрессор привода и генератор импульсов. Пневмотурбина обеспечивает частоту вращения упрочняющего электрода до 1500 с^{-1} . Цилиндрический электрод диаметром 2,3–3 мм закрепляется в цанговом зажиме головки – электродержателя. Токоподвод импульсов от генератора к электроду осуществляется через подпружиненные угольные контакты. Для измерения частоты вращения электрода использовался электронный тахометр ТЕСА завода «Тбиприбор».

Положение источника упрочнения до упрочняемой поверхности образца устанавливается с учетом значения силы тока короткого замыкания и контролируется подвижным роликом, жестко связанным с блоком источника упрочнения. При выполнении упрочняющей обработки ролик, контактируя с обрабатываемой поверхностью, при перемещении тележки катится по образцу, "копируя" его кривизну и при этом вызывая коррекцию положения источника упрочнения в вертикальной плоскости. Вертикальное перемещение источника упрочнения происходит по направляющим.

В качестве легирующего материала использовались хром, молибден, вольфрам и твердый сплав ВК6-ОМ.

Упрочнение проводилось в диапазоне величин силы тока короткого замыкания от 2,8 до 3,6 А, емкости конденсаторного блока 300 мкФ и числе разрядов 290–310 $1/\text{см}^2$.

Оценка эффективности разработанного способа упрочнения проводилась на ножах сборных фрез для обработки древесины березы влажностью 10–12%. Ножи изготовлены из сталей Р6М5, 8Х6НФТ с твердостью HRC 58 ... 62 и шероховатостью Ra 0,63–1,25 мкм.

Испытания после упрочнения проводились на фрезерном станке Ф-4. Величина износа определялась как разность ширины ножа до и после испытания. Ширина ножа замерялась длиномером ИЗВ-2 с точностью 1 мкм.

Износостойкость определялась как отношение величины износа исследуемых образцов ножей к величине износа неупрочненного образца.

Результаты проведенных исследований показали, что износостойкость стали 8Х6НФТ в 1,4, а стали Р6М5 в 1,6 раза больше чем у неупрочненных образцов, а насыщение водородом снизилось на 35–40% для обеих марок сталей. В настоящее время разрабатываются рекомендации для промышленного использования этого метода упрочнения.

И. С. Фролов, Ж. А. Мрочек, С. А. Иващенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ КОНДЕНСАТОВ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Все вакуумно-плазменные способы формирования покрытий основаны на конденсации компонентов паровой (плазменной) фазы при бомбардировке обработки поверхности частицами высоких энергий. Конденсация атомов и ионов на подложке происходит при температуре ниже точки плавления основных компонентов материала катода ($T < 0,5 T_{пл}$). Фазовые превращения в этом случае протекают в неравновесных условиях, когда скорость конденсации намного больше скорости испарения. Наличие таких условий обеспечивает образование в осаждаемых покрытиях метастабильных фаз, а также возникновение избыточного объема, что способствует образованию микропор типа решеточных вакансий, сквозных пор и пустот [1]. Кроме того, при формировании покрытий из плазмы вакуумной дуги происходит дополнительное образование пор из-за наличия в пароплазменном потоке капельной составляющей. Высокая пористость вакуумно-плазменных покрытий может стать основной причиной их коррозии, снижения износостойкости в условиях сухого трения и ухудшения декоративных свойств. Уменьшение пористости обычно обеспечивают путем оптимизации параметров осаждения покрытий или введением дополнительных технологических операций [2].

Для исследования пористости вакуумных электродуговых покрытий TiN использовались образцы из стали 12X18H10T и алюминиевого сплава Д16Т с размерами 40x25x10 мм, которые обрабатывались вначале шлифованием, а затем электроимпульсным полированием (R_a 0,1...0,15 мкм). Нанесение покрытий TiN проводилось с использованием вакуумной установки УРМЗ.279.048. Очистка поверхности образцов ионами титана осуществлялась при ускоряющем напряжении 1000 В и токе дуги 90 А в течение 60 с. Параметры осаждения покрытия изменялись в следующих пределах: ток дугового разряда $I = 80...130$ А; напряжение на подложке $U_n = 0...200$ В; давление реакционного газа (азота) $P = (2...14) \times 10^{-2}$ Па. Толщина покрытия составляла 3...4 мкм.

Пористость покрытия определялась методом индикаторных паст (ГОСТ 9.302-88). Для повышения производительности и облегчения процесса считывания пор в состав индикаторной пасты добавлялся поливинилацетатный клей (ПВА), который смешивался с индикаторной пастой [3].

Добавление в состав индикаторной пасты клея ПВА приводит к значительному (в десятки раз) увеличению сил сцепления пасты после ее застывания с контролируемым покрытием. При этом полностью исключается осыпание застывшего слоя индикаторной пасты с контролируемых поверхностей, особенно большой площади или сложной конфигурации (наклонных, винтовых, ребристых и т. п.). Использование поливинилацетатного клея дает возможность исключить из состава применяемых паст некоторые составляющие (наполнители). Это приводит к упрощению приготовления паст и улучшению их механических свойств. Введение в состав индикаторной пасты клея ПВА обеспечивает улучшение отражательной способности исследуемой поверхности, что является особенно важным для проведения автоматического считывания количества пор в покрытии.

Анализ результатов исследований (рис.1) показывает, что с увеличением тока дуги пористость покрытия увеличивается и начинает интенсивно расти при достижении величины тока 100 А. Можно предположить, что это связано с увеличением в плазменном потоке содержания капельной фазы, доля которой значительно возрастает в диапазоне 100...140 А [4]. Большое количество капель и макроблоков материала катода, конденсирующихся на подложке, приводит к повышенной дефектности покрытия и увеличению в нем сквозной пористости из-за эффектов затенения и неплотного срастания элементов структуры [5]. На алюминиевых подложках более интенсивный рост пористости происходит, очевидно, из-за подплавления поверхности, вызванного увеличением теплового потока в направлении подложки.

С увеличением напряжения на подложке пористость уменьшается, что связано, очевидно, с формированием более плотной структуры покрытия и интенсификацией процесса распыления пиков микронеровностей из-за увеличения энергии ионов. Однако при напряжении примерно, около 100 В влияние этих факторов резко снижается, и поэтому при дальнейшем повышении потенциала на подложке пористость покрытия на стальных подложках практически не уменьшается, а на алюминиевых подложках даже несколько увеличивается.

Зависимость пористости от давления реакционного газа носит экстремальный характер. С увеличением давления в вакуумной камере до 8×10^{-2} Па пористость покрытия уменьшается, что связано с уменьшением содержания капельной фазы в продуктах эрозии материала катода [5]. Дальнейшее повышение давления азота приводит к тому, что нитрид титана частично образуется не на поверхности конденсации, а в газовой фазе [1] и осаждается на поверхность в виде неомогенного пористого покрытия. Кроме того, избыток реакционного газа приводит к появлению газовой пористости, связанной с замуровыванием азота в объеме формирующегося конденсата. В результате пористость конденсата TiN начинает увеличиваться, а покрытие теряет свою работоспособность.

В результате исследований установлено, что преобладающее влияние на формирование сквозной пористости покрытия оказывает капельная составляющая плазменного потока материала катода. Основным методом уменьшения капельной фазы является сепарация плазменного потока. Ее можно достичь, например, с использованием принципов плазмооптики [6]. Однако разработанные криволинейные плазмооптические системы имеют невысокий коэффициент пропускания, особенно для тяжелых ионов, что резко снижает производительность процесса, а это с учетом высокой стоимости таких систем препятствует широкому использованию их на практике.

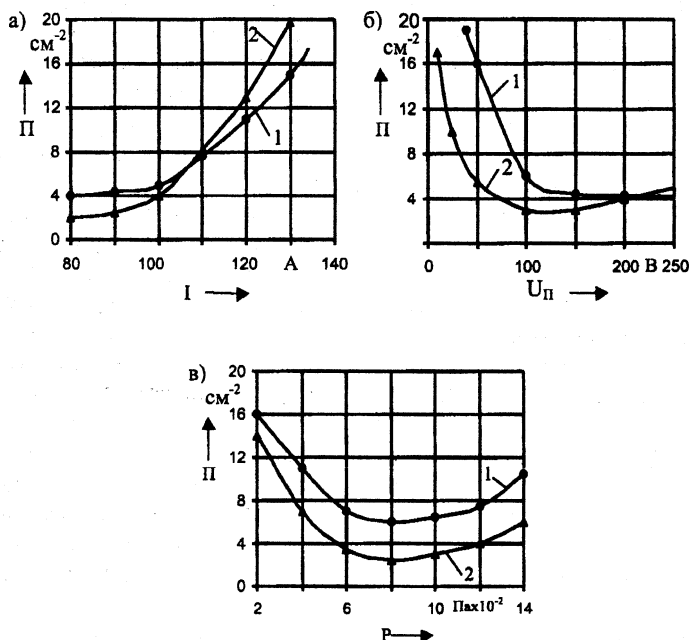


Рис. 1. Зависимость пористости покрытия TiN от тока дуги при $P = 8 \times 10^{-2} \text{ Па}$ и $U_{\Pi} = 100 \text{ В}$ (а); напряжения на подложке при $P = 8 \times 10^{-2} \text{ Па}$ и $I = 100 \text{ А}$ (б); давления реакционного газа при $I = 100 \text{ А}$ и $U_{\Pi} = 100 \text{ В}$ (в); подложка – сталь 12X18H10T (1) и алюминиевый сплав Д16Т (2).

Более эффективной и дешевой является сепарация плазменного потока методом экранирования. Данный метод основан на использовании экрана обтекаемой формы, находящегося под потенциалом анода и установленного по оси испарителя на расстоянии от него 40...100 мм. Результаты экспериментов с применением экрана показывают, что пористость покрытия уменьшается на 30...65% в зависимости

от параметров процесса осаждения покрытия. Оставшаяся пористость, очевидно, связана с факторами, не зависящими от режимов осаждения покрытия. К этим факторам в первую очередь относится исходная шероховатость поверхности подложки, причем на пористость влияют как высота, так и форма микронеровностей. Как показано в работе [7], обработка шлифованных подложек с Ra 0,3...0,5 мкм электроимпульсным полированием в течение 4...5 мин. снижает пористость покрытия в 9...10 раз, что объясняется как снижением высоты микронеровностей (в 4...5 раз), так и формированием благоприятного микрорельефа поверхности с большими радиусами закругления вершин и впадин микронеровностей, что сводит к минимуму влияние эффекта затенения на пористость покрытия.

Еще одним фактором, влияющим на пористость, является толщина покрытия. Результаты определения количества сквозных пор при различных толщинах покрытия TiN и способах предварительной подготовки поверхности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Пористость покрытий TiN

Способ подготовки поверхности	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Параметры покрытия TiN	
		Толщина h, мкм	Пористость П, см ⁻²
Электроимпульсное полирование	0,1...0,15	1	14
		3	4
		5	3
		7	2
Шлифование абразивным кругом	0,4...0,6	1	36
		3	12
		5	9
		7	7

Анализ результатов показывает, что с увеличением толщины покрытия количество сквозных пор уменьшается. Покрытия толщиной около 1 мкм характеризуются значительной мелкой пористостью. С увеличением толщины покрытия до 3 мкм пористость резко снижается, а при дальнейшем наращивании толщины уменьшается незначительно.

Оставшееся небольшое количество сквозных пор объясняется, очевидно, дефектами обработки поверхности подложки. Практически беспористыми покрытия становятся при толщине более 10...12 мкм.

Таким образом, пористость вакуумно-плазменного покрытия определяется в основном параметрами процесса осаждения, толщиной покрытия и шероховатостью поверхности подложки и практически не зависит от материала подложки. При этом сепарация плазменного потока методом экранирования снижает пористость

покрытия на 30...65%. На пористость покрытия оказывает влияние как высота, так и форма микронеровностей поверхности подложки. Для получения минимальной пористости шероховатость подложки должна быть в пределах $Ra\ 0,08\ldots 0,16\ \mu\text{м}$, а толщина наносимого покрытия превышать 3 $\mu\text{м}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закономерности формирования покрытий в вакууме / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, Б.С. Митин и др. // ФХОМ. – 1986. – № 5. – С. 92-97. 2. Транспортировка плазменных потоков в криволинейной плазмооптической системе / И.И. Аксенов, В.А. Белоус, В.Г. Падалка, В.М. Хороших // Физика плазмы. – 1978. – Т. 4. № 4. – С. 758-763. 3. А.с. 1704029 СССР, МКИЗ G01N 15/08. Способ определения пористости неорганических покрытий на металлических подложках / Е.В. Макаревич, В.И. Плахотнюк, С.А. Иващенко, И.С. Фролов. – № 4802969/25; Заявлено 19.03.90; Опубл. 07.01.92, Бюл. № 1 // Изобретения. – 1992. – №1. – С. 171. 4. Карпенко Г.Д., Лойко В.А. Исследование структуры покрытий на основе нитрида титана // Известия АН БССР. Сер. физ. техн. наук. – 1986. – № 1. – С. 31–34. 5. Палатник Л.С., Черемской П.Г., Фукс М.Я. Поры в пленках. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с. 6. Об условиях протекания химических реакций при конденсации потоков металлической плазмы / И.И. Аксенов, В.Г. Брень, В.Г. Падалка, В.М. Хороших // ЖТФ. – 1978. – Т. 48. № 6. – С. 1165-1169. 7. Синькевич Ю.В., Фролов И.С., Симонович Л.П. Использование электроимпульсного полирования для повышения качества ионно-плазменных покрытий // Упрочнение и защита поверхностей газотермическим и вакуумным напылением: Материалы III междунар. науч.-техн. конф., Киев, окт. 1990 г. / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. – Киев, 1991. – С. 111–115.

УДК 621.792

П. И. Ящерицын, А. П. Ракомсин, И. П. Филонов, Л. М. Кожуро

ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Физико-технический институт НАН Беларуси

Государственное предприятие "МАЗ"

Белорусская государственная политехническая академия

Белорусский государственный аграрный технический университет

Минск, Беларусь

Научно-технический прогресс во всех отраслях экономики определяется техническим уровнем машиностроения. В Республике Беларусь оно по праву занимает

одно из ведущих мест. Приоритетными направлениями являются автомобиле- и тракторостроение, производство сельскохозяйственных машин, станков и инструментов, разработка новых материалов и технологий их обработки. Учитывая, что республика работает в значительной степени на привозном сырье, особенно актуальным является создание новых металло- и энергосберегающих технологий обработки материалов, способных создавать конкурентоспособные изделия.

Для повышения конкурентоспособности изделий машиностроения необходимо в первую очередь повышать их надежность и долговечность технологическими методами, так как достигнутый уровень последних не соответствует возросшим современным требованиям. Об этом свидетельствует тот факт, что удельный вес новых запасных частей за последние годы увеличился и составил более 65 % от стоимости приобретенных технических средств [1]. Одной из основных часто встречающихся причин выхода из строя деталей машин является износ их рабочих поверхностей, так как форсирование любого рабочего процесса в машине неизбежно вызывает интенсификацию процессов изнашивания трущихся деталей.

Для упрочнения и восстановления деталей машин применяют различные способы нанесения покрытий, позволяющие получать поверхность с требуемым химическим составом, высокой твердостью и износостойкостью. Каждый из известных способов упрочняющей обработки в силу своих особенностей имеет рациональную область применения и не всегда решает задачи, вызванные необходимостью повышения долговечности деталей машин. Поэтому наряду с совершенствованием известных способов упрочняющей обработки необходима разработка новых, дополняющих уже известные и расширяющих их технологические возможности. При этом актуальным является совмещение способов упрочняющей обработки, использующих комбинированное воздействие потоков энергии различного вида на обрабатываемую поверхность детали. Это позволяет получать качественно новые эксплуатационные характеристики поверхностей деталей, а также снижать энергоемкость процессов за счет использования технологического тепла.

В последние годы широко исследуются и получают практическое применение методы обработки деталей машин, использующих энергию магнитного и электрического полей. К ним можно отнести электромагнитную наплавку (ЭМН) и магнитно-абразивную обработку (МАО). Поскольку связкой порошка при указанных методах обработки служит энергия магнитного поля, появляется возможность существенным образом изменить условия упрочнения и восстановления, а также полирования изделий. В связи с этим применение этих методов обработки становится задачей первостепенной важности.

Электромагнитная наплавка [2...4], к достоинствам которой следует отнести высокую прочность сцепления наплавляемого покрытия с основой, минимальное тепловыделение и расплавление материала основы, что исключает термическое деформирование обрабатываемых деталей, является прогрессивным методом упрочнения и восстановления изделий. Сочетание ЭМН с поверхностным пласти-

ческим деформированием (ППД) способствует повышению эксплуатационных свойств различных деталей, так как при этом снижается шероховатость поверхности и пористость покрытия, увеличивается плотность и твердость поверхностного слоя, повышается сопротивление усталости и др.

Использование технологического тепла ЭМН при упрочнении ППД позволяет совместить операции наплавки и термомеханического упрочнения и создать условия для комбинированного формирования параметров качества поверхностного слоя, наиболее полно, с точки зрения эксплуатационной наследственности, отвечающих служебному назначению деталей машин.

Известно, что наплавленный металл отличается неоднородностью структуры и химического состава, наличием сварочных дефектов, значительными колебаниями твердости, высокой внутренней напряженностью и другими дефектами, поэтому представляет интерес оценка эксплуатационных свойств покрытий, полученных электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием различных ферропорошков по критериям износостойкости и усталостной прочности.

Износостойкость покрытий, полученных ЭМН с ППД, изучалась в условиях гидроабразивного изнашивания при трении скольжения на машине для испытаний материалов на трение и износ 2070 СМТ-1 по схеме "вал-колодка" линейным методом.

Покрытия толщиной 1 мм на диаметр наносили на образцы из стали 45 с наружным диаметром 40 мм, внутренним 16 мм и высотой 12 мм, подвергнутых нормализации. Колодка из чугуна ХТВ имела высоту 10 мм, что позволило сохранять измерительную базу, так как по краям образца оставались цилиндрические ленточки. Измерение образцов производили в двух взаимноперпендикулярных плоскостях по двум сечениям, используя оптический длинномер ИЗВ-1, точность измерения которого составляла 0,001 мм. Для ускорения процесса изнашивания использовали масляно-абразивную смесь (масло индустриальное 20, содержащее 2 % карбида бора зернистостью 4...5 мкм), которую в количестве 40 мл заливали в камеру для масла. При этом для каждой партии испытываемых образцов использовали свежую порцию смеси.

Абразивные частицы во взвешенном состоянии в период испытаний поддерживались лопастями крыльчатки, посаженной на одном валу с образцом, а стабильность температурного режима смеси – пропусканием воды через двойное дно камеры.

Образцы после нанесения покрытий шлифовались. Затем они прирабатывались с колодкой. Окончание приработки определяли по стабилизации момента трения пары, регистрируемого аппаратурой машины.

Режим испытаний соответствовал условиям работы деталей автотракторных и сельскохозяйственных машин, для которых характерна скорость скольжения до 2,5 м/с и удельная нагрузка 1,5...3,0 МПа. Испытывали партии по пять образцов.

Результаты испытаний сопоставляли с эталоном (сталь 45 нормализованная и закаленная с нагрева ТВЧ на глубину 1,2...1,6 мм до 52...54 HRC). Кроме того, учитывали, что абразивное изнашивание имеет преимущественно механический

характер разрушения поверхности. Интенсивность его, как известно [5, 6], в наибольшей степени зависит от твердости сопрягаемых материалов, удельной нагрузки и скорости перемещения.

Исследования эксплуатационных свойств покрытий проводили на образцах, наплавленных и обработанных при оптимальных условиях и режимах процессов, установленных в работе [4] (образцы после ЭМН и ЭМН с ППД подвергали абразивному шлифованию и МАО для получения шероховатости поверхности $Ra = 0,8 \dots 0,6$ мкм).

Триботехнические характеристики покрытий приведены в таблице 1, где в числителе представлены результаты покрытий, полученных ЭМН, а в знаменателе – ЭМН с ППД. Их анализ показывает, что решающее влияние на износостойкость покрытий оказывают химический и фазовый составы покрытий и метод их нанесения. Так, покрытия, полученные ЭМН с ППД, для всех исследуемых материалов ферропорошков имеют более высокую износостойкость по сравнению с покрытиями, полученными ЭМН. Обусловлено это тем, что ППД: повышает плотность и однородность покрытия; воздействует на формирование его структуры, делая ее более дисперсной; приводит к изменению характера распределения упрочненного слоя, в котором происходят превращения, соответствующие полной закалке. Вместе с тем момент трения и коэффициент трения для методов нанесения покрытий не имеют существенных различий, а для ферропорошков они значительны.

Таблица 1

Триботехнические характеристики покрытий, полученных
ЭМН и ЭМН с ППД

Материал ферропорошка	Интенсивность изнашивания, мкм/км	Параметр			
		Момент трения, нм		Коэффициент трения	
		с маслом	всухую	с маслом	всухую
ПР-Сталь 45-1%B	3,6/3,2	$\frac{0,86}{0,76}$	$\frac{1,37}{1,26}$	0,13/0,12	0,21/0,19
Fe-6,5%Cr	2,2/2,0	$\frac{0,79}{0,70}$	$\frac{1,06}{1,00}$	0,12/0,11	0,16/0,15
Fe-9%B	2,8/2,2	$\frac{0,93}{0,90}$	$\frac{1,10}{0,98}$	0,14/0,13	0,16/0,15
Fe-5%V	3,4/2,9	$\frac{0,99}{0,86}$	$\frac{1,58}{1,45}$	0,15/0,13	0,24/0,22
P6M5K5	2,1/1,6	$\frac{0,73}{0,67}$	$\frac{0,87}{0,80}$	0,11/0,10	0,13/0,12
Сталь 45 (эталон)	4,1	0,84	1,26	0,12	0,19

Известно, что основная причина разрушения деталей, работающих в условиях циклического нагружения, – усталость металла. Усталостное разрушение начинается с поверхностного слоя, от физико-механических свойств которого зависит в значительной степени предел выносливости.

Поэтому в работе проводились исследования усталостной прочности деталей, упрочненных ЭМН с ППД. При этом исследовалось влияние на усталостную прочность наплавленных поверхностей только метода наплавки и химического состава ферропорошка.

Исследование проводили на образцах круглого сечения из нормализованной стали 45, имеющих соотношение $l/d = 15$, где $l = 150$ мм – длина и $d = 10$ мм – диаметр. В качестве ферропорошков применили Fe-5%V и Fe-6,5%Cr. Образцы после ЭМН с ППД подвергались абразивному шлифованию и МАО, обеспечивая шероховатость поверхности $Ra = 0,8 \dots 0,6$ мкм. Испытания образцов на усталостную прочность проводили на машине типа У-20М в условиях действия знакопеременной нагрузки с постоянной амплитудой.

Кривые выносливости строили в двойной логарифмической системе координат, благодаря чему функциональная зависимость напряжений от числа циклов $\sigma = f(N)$ представлена уравнением

$$m \lg \sigma + \lg N = \lg C,$$

где σ – напряжение, МПа; m – параметр кривой, $m = 10$; N – число циклов нагружения; C – коэффициент.

Следовательно, криволинейная зависимость $\sigma = f(N)$ в логарифмических координатах была приведена к уравнению прямой, что позволило применять метод линейной корреляции.

Анализ полученных результатов испытаний (рис. 1) показывает, что при циклическом нагружении образцов покрытия имеют различную способность к сопротивлению усталостному разрушению. Это может быть объяснено неодинаковой чувствительностью материалов покрытий к дислокационному скольжению, то есть к процессам, влияющим на усталостное разрушение. Видно, что усталостная прочность наплавленных поверхностей ферропорошками Fe-5%V и Fe-6,5% Cr выше эталона соответственно в 1,4 и 1,3 раза. Обусловлено это тем, что ЭМН с ППД формирует в системе покрытие–основа остаточные напряжения сжатия, увеличивает зону термического влияния [3, 4]. Кроме того, происходит выделение дисперсных карбидов и интерметаллидов, блокирующих сдвиги по плоскости скольжения. Это обеспечивает повышение поверхностной прочности, особенно проявляющейся в покрытиях со следующими структурами: мартенсит, легированные дисперсные карбиды и интерметаллиды [3, 4]. Кроме того, ЭМН с ППД уменьшает пористость [5], что также повышает усталостную прочность наплавленных поверхностей.

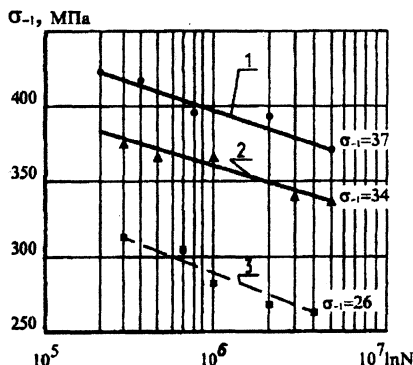


Рис. 1. Влияние химического состава ферропорошка на усталостную прочность упрочненных электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием деталей: 1 – Fe-5%V; 2 – Fe-6,5%Cr; 3 – сталь 45

Таким образом, применение ЭМН с ППД для упрочнения или восстановления деталей машин, работающих в условиях повышенного абразивного изнашивания и циклического нагружения, позволяет увеличить их износостойкость до 2,5 раза и усталостную прочность до 1,4 раза по сравнению с закаленной ТВЧ на глубину 1,2...1,6 мм до 52...54 HRC сталью 45.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильюшенко и др. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
2. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 232 с.
3. Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Ракомсин А.П. и др. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле. – Мн.: ФТИ НАН Беларуси, 1997. – 416 с.
4. Ракомсин А.П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле. – Мн.: Парадокс. 2000. – 200 с.
5. Филонов И.П., Кожуро Л.М., Фельдштейн Е.Э. Износостойкость покрытий, полученных электромагнитной наплавкой / XXIII jesienna szkola tribologiczna. – Zielona Gora – Lubiatow, 21-24 wrzesien, 1999. – S. 35...38.
6. Rakomsin F.P., Kozhuro L.M., Minevich A.A. Tribological properties of coating produced by electromagnetic facing / 12-th International colloquium «Tribology 2000 – Plus». – Stuttgart, 2000. – V. 3. – P. 1981–1995.

О РАСПРОСТРАНЕНИИ ИЗГИБНЫХ ВОЛН В ВЯЗКОУПРУГОЙ НЕКРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Рассматривается задача о движении тонкой некруговой вязкоупругой цилиндрической оболочки с косыми краями после сообщения ей начальных перемещений и скоростей, локализованных в окрестности некоторой образующей.

1°. В качестве исходной используем систему уравнений движения пологих оболочек, записанную в безразмерном виде, учитывающую влияние вязкости [1]:

$$\mu^3 \Delta^2 W - \mu k(\varphi) \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \frac{\partial W}{\partial t} = 0, \quad \mu^2 \Delta^2 F + k(\varphi) \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

где

$$\mu^4 = \frac{h^2}{12(1-\nu^2)R^2}, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad x = \frac{x'}{R}, \quad y = \frac{y'}{R}, \quad k = \frac{R}{R_2},$$

$$W = \mu^2 \frac{W^*}{R}, \quad F = \frac{\mu^{-2} F^*}{hE}, \quad t = t_*/t_c, \quad t_c^2 = \frac{R^2 \rho}{Eh\mu^2}.$$

Здесь $0 < \mu$ – малый параметр, $W(x, \varphi)$, $F(x, \varphi)$ – искомые безразмерные нормальный прогиб и функция напряжений, x' , φ' – длины дуг образующей и направляющей соответственно, R – характерный размер срединной поверхности, $R_2(\varphi)$ – радиус кривизны направляющей, t_* – время, t_c – характерное время, h , E , ν , ρ – толщина оболочки, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность материала оболочки соответственно, γ – коэффициент вязкого трения.

Решение системы (1) ищем в области $x_1(\varphi) \leq x \leq x_2(\varphi)$ при $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2$.

Предположим, что функции $x_1(\varphi)$, $x_2(\varphi)$, $k(\varphi)$ достаточное число раз дифференцируемы и вместе со своими производными являются величинами порядка $\sim O(1)$ при $\mu \rightarrow 0$.

При $x = x_1(\varphi)$, $x = x_2(\varphi)$ рассмотрим условия шарнирного опирания

$$W = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 0, \quad F = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0. \quad (2)$$

Зададим начальные условия [2]

$$W|_{t=0} = W_0^*(x, \varphi, \mu) \Phi_0, \quad \dot{W}|_{t=0} = i\mu^{-1} V_0^*(x, \varphi, \mu) \Phi_0, \quad (3)$$

$$\Phi_0 = \Phi_0(\varphi, \mu) = \exp \left\{ i\mu^{-1} \left(a_0 \varphi + \frac{1}{2} b_0 \varphi^2 \right) \right\}, \quad \text{Im } b_0 > 0,$$

где a_0 – вещественное число, а W_0^* , V_0^* – комплекснозначные функции, такие что

$$\frac{\partial^m W_0^*}{\partial x^m}, \quad \frac{\partial^m V_0^*}{\partial x^m} \sim \mu^{-m} \quad \text{при } \mu \rightarrow 0, \quad m = 0, 1, \dots, \quad (4)$$

и имеющие в направлении φ конечное число осцилляций с изменяемостью $\mu^{-1/2}$.

Вещественные и мнимые части функций в условиях (3) задают пару начальных волновых пакетов, локализованных в окрестности образующей $\varphi = 0$ и экспоненциально убывающие при удалении от нее. В настоящей работе исследуется реакция оболочки на начальные возмущения (3) при учете вязкости материала.

2°. Учитывая большую изменяемость решения в направлении оси, введем новую осевую координату по формуле

$$x = \mu s. \quad (5)$$

Тогда края оболочки будут описываться функциями $s = s_i(\varphi) = \mu^{-1} x_i(\varphi)$, $i = 1, 2$.

Ввиду линейности уравнения (1) и однородности граничных условий (2) будем искать решение в виде суперпозиции

$$W = \sum_{n=1}^N W_n, \quad F = \sum_{n=1}^N F_n, \quad (6)$$

где W_n , F_n – пара функций, называемая в дальнейшем n -м волновым пакетом. Следуя [2], полагаем, что n -ый волновой пакет в момент времени t локализован в окрестности образующей $\varphi = q_n(t)$, называемой центром n -го волнового пакета. Функция предполагается дважды дифференцируемой, такой, что $q_n(0) = 0$.

Введем локальную систему координат, связанную с центром n -го волнового пакета, по формуле

$$\varphi = q_n(t) + \mu^{1/2} \xi_n. \quad (7)$$

Новая окружная координата ξ_n характеризует удаленность образующей φ от центра n -го волнового пакета $q_n(t)$.

Так как функции W_0^* , V_0^* из (3) удовлетворяют граничным условиям (2), их можно разложить [3] по системе функций $\{z_n\}$

$$z_n(s, \varphi) = \sin \{ \lambda_n(\varphi) [s - s_1(\varphi)] \}, \quad \lambda_n(\varphi) = \frac{\pi n}{s_2(\varphi) - s_1(\varphi)} \quad n = 1, 2, \dots \quad (8)$$

в ряды равномерно сходящиеся по s на $[s_1(\varphi), s_2(\varphi)]$ для любого $\varphi \in [\varphi_1, \varphi_2]$.

Используя это разложение, получим начальные условия для n -го волнового пакета, которые здесь не приводятся. Функции $z_n(s, \varphi)$ – система собственных функций

краевой задачи $\frac{d^4 z}{ds^4} - \lambda^4 z = 0$ с граничными условиями $z = \frac{d^2 z}{ds^2} = 0$ при

$s = s_i(\varphi)$, $i = 1, 2$, а $\lambda_n^4(\varphi)$ – соответствующие собственные числа.

Следуя [2], решение задачи (1)–(3) с учетом замен (5), (7) и суперпозиции (6) будем искать в виде

$$\{W_n, F_n\} = \sum_{m=0}^{\infty} \mu^{m/2} \{w_{nm}(s, \xi_n, t), f_{nm}(s, \xi_n, t)\} \Phi_n, \quad (9)$$

$$\Phi_n = \exp \left\{ i \left[\mu^{-1} \int_0^t \omega_n(\tau) d\tau + \mu^{-1/2} p_n(t) \xi_n + \frac{1}{2} b_n(t) \xi_n^2 \right] \right\}.$$

Здесь $\omega_n(t)$, $p_n(t)$, $b_n(t)$ – дважды дифференцируемые функции порядка $O(1)$, $\text{Im } b_n(t) > 0$ для любого $t \in [0, T]$, а w_{nm}, f_{nm} – полиномы по ξ_n . Механический смысл параметров ω_n, p_n, b_n обсуждался в [2].

Разложим функцию $k(\varphi)$ в ряд Тейлора по степеням $\mu^{1/2} \xi_n$ в окрестности центра n -го волнового пакета $\varphi = q_n(t)$. Учитывая это разложение и подставляя анзатц (9) в (1) с учетом (6), приравняем нулю коэффициенты при одинаковых степенях $\mu^{1/2}$. В результате придем к последовательности уравнений

$$\sum_{j=0}^m L_{nj} X_{nm-j} = 0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (10)$$

где

$$L_{n0} = \begin{pmatrix} l_{n11} & l_{n12} \\ l_{n21} & l_{n22} \end{pmatrix}, \quad X_{nk} = (w_{nk}, f_{nk})^T,$$

$$l_{n11} = \left(\frac{\partial^2}{\partial s^2} - p_n^2 \right)^2 - (\omega_n - \dot{q}_n p_n)^2 + i\gamma (\omega_n - \dot{q}_n p_n),$$

$$l_{n12} = -l_{n21} = -k \frac{\partial^2}{\partial s^2}, \quad l_{n22} = \left(\frac{\partial^2}{\partial s^2} - p_n^2 \right)^2.$$

Здесь значок Т означает транспонирование. Выражения для L_{n1} , L_{n2} , представляющие собой линейные комбинации производных матрицы-оператора L_{n0} по параметрам ω_n , p_n , b_n , здесь не приводятся ввиду их громоздкости.

Подставляя анзац (9) в граничные условия (2) с учетом (5) и раскладывая функции $s_1(\varphi)$, $s_2(\varphi)$ в ряды Тейлора по степеням $\mu^{1/2} \xi_n$ в окрестности образующей $\varphi = q_n(t)$, приходим к последовательности граничных условий для векторов X_{ni} , $i = 1, 2, \dots$, совпадающие по виду с (2.11)–(2.13) из [2] после замены w_{ni} на X_{ni} . В нулевом приближении граничные условия имеют вид (2) с заменой функций W , F на w_{n0} , f_{n0} соответственно.

3°. Однородная краевая задача в нулевом приближении ($m = 0$) имеет решение

$$X_{n0} = P_{n0}(\xi_n, t) Y_n(q_n(t)) z_n(s, q_n(t)), \quad (11)$$

если

$$\omega_n = \dot{q}_n p_n + \frac{i\gamma}{2} - H_n(p_n, q_n), \quad (12)$$

$$H_n = \pm \sqrt{(\lambda_n^2 + p_n^2)^2 + \frac{k^2 (q_n(t)) \lambda_n^4}{(\lambda_n^2 + p_n^2)^2} - \frac{\gamma^2}{4}}, \quad (13)$$

$$Y_n = (1, \Lambda_n)^T, \quad \Lambda_n = k\lambda_n^2 (\lambda_n^2 + p_n^2)^{-2},$$

где H_n – функция Гамильтона, соответствующая n -му волновому пакету. Учитывая (9), мнимая составляющая в (12) способствует затуханию колебаний с течением времени в случае наличия вязкого трения ($\gamma > 0$).

Решения неоднородных краевых задач, получаемых в первом и втором приближениях ($m = 1, 2$), ищем в виде

$$X_{ni} = P_{ni}(\xi_n, t) Y_n(q_n(t)) z_n(s, q_n(t)) + X_{ni}^{(p)}(s, \xi_n, t), \quad i = 1, 2, \quad (14)$$

где P_{ni} – полином по ξ_n , а $X_{ni}^{(p)}$ – какое-либо частное решение соответствующей краевой задачи. Условия разрешимости задачи в первом приближении приводят к системе Гамильтона

$$\dot{q}_n = H_p(p_n, q_n), \quad \dot{p}_n = -H_q(p_n, q_n) \quad (15)$$

с начальными условиями $q_n(0)=0, p_n(0)=a_0$. Здесь и ниже индексы p, q означают дифференцирование по соответствующему параметру.

Во втором приближении получаем уравнение Риккати [2]

$$\dot{b}_n + H_{pp} b_n^2 + 2H_{pq} b_n + H_{qq} = 0, \quad (16)$$

где $b_n(0)=b_0$, и амплитудное уравнение для определения P_{n0} вида

$$h_{n0}(t) \frac{\partial^2 P_{n0}}{\partial \xi_n^2} + h_{n1}(t) \xi_n \frac{\partial P_{n0}}{\partial \xi_n} + h_{n2}(t) \frac{\partial P_{n0}}{\partial t} + h_{n3}(t) P_{n0} = 0, \quad (17)$$

4°. Рассмотрим пример. Пусть направляющая шарнирно опертой цилиндрической оболочки представляет собой эллипс с полуосями a, b ($a > b$), края оболочки – прямые. Расположим начальный волновой пакет на образующей, которой соответствует наименьшая кривизна (наиболее «слабая» образующая). Вычисления проводим для

$$a=1, 2, b=1, a_0=0,5, b_0=i, h=0,02, R=50, n=0,3,$$

$$\lambda_n=0,6, \quad \gamma=0,02, \quad W_0^* = V_0^* = z_n.$$

На рис.1 приведены результаты вычислений. Как видим, в данном случае имеют место многократные отражения волнового пакета от некоторых образующих $\pm\varphi^{(r)}$, ограничивающих области с большой кривизной.

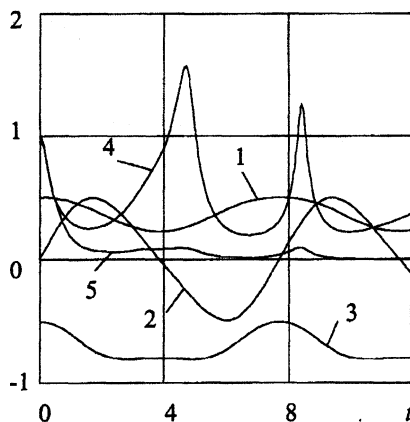


Рис. 1. Графики функций $p_n(t)$, $q_n(t)$, $\text{Re } \omega_n(t)$, $\text{Im } b_n(t)$, $\text{Re } w_{n\text{max}}(t)$ (кривые 1–5 соответственно) для оболочки с эллиптическим поперечным сечением

При этом отражения сопровождаются фокусировкой волнового пакета (рост $\text{Im } b_n(t)$) и всплесками $\text{Re } w_{n\text{max}}(t)$. График $\text{Re } w_{n\text{max}}(t)$ указывает на то, что наличие вязкого трения приводит к затуханию колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Товстик П.Е. Устойчивость тонких оболочек: асимптотические методы. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 320 с. 2. Михасев Г.И. Локализованные семейства изгибных волн в некруговой цилиндрической оболочке с косыми краями // Прикл. мат. и мех. – 1996. – Т. 60. № 4. – С. 635–643. 3. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики. Т. 1. – М.; Л.: Гостехиздат, 1951. – 476 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЕРАТОРОВ БЕСКОНЕЧНО ВЫСОКОГО ПОРЯДКА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ОБЩИХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Рассмотрим изотропное однородное тело. Уравнения эластокинетики в перемещениях, без учета массовых сил, имеют вид [1]

$$C_2^2 \nabla \bar{U} + (C_1^2 - C_2^2) \text{grad div} \bar{U} = \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2} \quad (1)$$

где $\bar{U}$ – вектор перемещений упругой среды,

∇ – оператор Лапласа,

grad и div – дифференциальные операторы векторного поля,

C_1 и C_2 – скорости продольных и поперечных волн.

Общее решение уравнения (1) можно записать посредством формулы Ламе

$$\bar{U} = \overline{\text{grad}} \Phi + \text{rot} \bar{\Psi}, \quad (2)$$

где скалярная Φ и векторная $\bar{\Psi}$ функции удовлетворяют соответствующим волновым уравнениям

$$\nabla_1 \Phi = \left(\nabla - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Phi = 0, \quad \nabla_2 \bar{\Psi} = \left(\nabla - \frac{1}{C_2^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \bar{\Psi} = 0 \quad (3)$$

Если тело ограничено, то продольные и поперечные волны распространяются от места возмущения до границы, а затем отражаются. В ограниченном теле функции Φ и $\bar{\Psi}$ связаны между собой граничными условиями.

В случае двумерной задачи перемещения и напряжения выражаются посредством формул [1]

$$U = \partial_1 \Phi - \partial_2 \Psi, \quad V = \partial_2 \Phi - \partial_1 \Psi, \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_{11}}{G} = (\gamma_2 \partial_2^2 + \gamma \partial_1^2) \Phi - 2 \partial_1 \partial_2 \Psi,$$

$$\frac{\sigma_{22}}{G} = (\gamma_2 \partial_1^2 + \gamma \partial_2^2) \Phi + 2\partial_1 \partial_2 \Psi, \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_{12}}{G} = 2\partial_1 \partial_2 \Phi + (\partial_1^2 - \partial_2^2) \Psi,$$

где $\partial_1 = \frac{\partial}{\partial x}$, $\partial_2 = \frac{\partial}{\partial y}$, $\gamma = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}$, $\gamma_2 = \gamma - 2$,

ν – коэффициент Пуассона,

G – модуль Юнга второго рода.

Для иллюстрации нового подхода, заключающегося в представлении общего решения посредством операторов бесконечно высокого порядка, рассмотрим задачу о распространении плоской волны в неограниченном упругом слое толщиной $2h$. Волна движется вдоль слоя в положительном направлении оси x . Рассмотрим два типа колебаний: симметричные и антисимметричные относительно срединной плоскости слоя. Первому случаю соответствует растяжение слоя, а второму – его изгиб.

Для симметричной формы колебаний (задача А) решение будем разыскивать в виде

$$\Phi = \left[A \frac{\cos(y\sqrt{\nabla_1})}{\sin(h\sqrt{\nabla_1})} \right] * f(x, t), \quad \Psi = \left[B \frac{\sin(y\sqrt{\nabla_2})}{\sin(h\sqrt{\nabla_2})} \right] * f(x, t), \quad (6)$$

где ∇_1 и ∇_2 – волновые операторы, описываемые формулой (3),

$f(x, t)$ – произвольная аналитическая функция,

знак «*» обозначает действие оператора на функцию.

Входящие в решение операторные коэффициенты A и B найдем из условия равенства нулю напряжений на поверхности слоя:

$$\sigma_{22} = 0, \sigma_{12} = 0, \text{ при } y = \pm h \quad (7)$$

Используя краевые условия (7), после подстановки соотношений (6) в (5) приходим к системе уравнений:

$$\begin{cases} \left[A(\gamma_2 \partial_1^2 - \gamma \nabla_1) \operatorname{ctg}(h\sqrt{\nabla_1}) + 2B\partial_1 \sqrt{\nabla_1} \operatorname{ctgh} \sqrt{\nabla_2} \right] * f(x, t) = 0 \\ \left[-2A\partial_1 \sqrt{\nabla_1} + B(\partial_1^2 + \nabla_2) \right] * f(x, t) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Легко видеть, что при $B = 2\partial_1$ и $A = \frac{\partial_1^2 + \nabla_2}{\sqrt{\nabla_1}}$ условие $\sigma_{12} = 0$ выполняется

тождественно. Подставляя эти значения в выражение для σ_{22} , с учетом $\gamma_2\partial_1^2 - \gamma\nabla_1 = -(\partial_1^2 + \nabla_1)$ получим:

$$\frac{\sigma_{22}}{G} = \left[-\frac{(\partial_1^2 + \nabla_2)^2}{\sqrt{\nabla_1}} \operatorname{ctgh} \sqrt{\nabla_1} + 4\partial_1^2 \sqrt{\nabla_2} \operatorname{ctgh} \sqrt{\nabla_2} \right] * f(x, t) = 0$$

Отметим, что полученное выражение с точностью до множителя совпадает с детерминантом системы (8).

Полагая $f(x, t) = e^{i(\omega t - kx)}$, предварительно устанавливаем

$$\left[\cos h \sqrt{\nabla_1} \right] * e^{i(\omega t - kx)} = ch(h\lambda_1) e^{i(\omega t - kx)},$$

где $\lambda_1 = \sqrt{k^2 - \tau^2}$, $\tau_1 = \frac{\omega}{C_1}$.

Используя понятие обратного оператора, находим $D = \frac{1}{\sqrt{\nabla_1} \sin \sqrt{\nabla_1}}$,

и тогда

$$\left[D^{-1} \right] * e^{i(\omega t - kx)} = -\lambda_1 sh(h\lambda_1) e^{i(\omega t - kx)}; \quad [D] * e^{i(\omega t - kx)} = -\frac{e^{i(\omega t - kx)}}{\lambda_1 sh(h\lambda_1)}.$$

Кроме того, $(\partial_1^2 + \nabla_2)^2 = (k^2 + \lambda_2^2)^2$, где $\lambda_2 = \sqrt{k^2 - \tau_2^2}$, $\tau_2 = \frac{\omega}{C_2}$.

Аналогичные соотношения имеют место и для тригонометрических функций, аргументом которых является оператор $\sqrt{\nabla_2}$. В результате условие $\sigma_{22} = 0$ при $y = \pm h$ принимает вид

$$\frac{th(h\beta)}{th(h\zeta)} = \frac{4k^2\zeta\beta}{(k^2 + \beta^2)^2}, \quad (9)$$

где $\beta = k\sqrt{1 - \frac{C^2}{C_2^2}}$; $\zeta = k\sqrt{1 - \frac{C^2}{C_1^2}}$, $C = \frac{\omega}{k}$ – фазовая скорость волны.

Для нулевых краевых условий при антисимметричной форме колебаний (задача В) получим

$$\frac{cth(h\beta)}{cth(h\zeta)} = \frac{4k^2\zeta\beta}{(k^2 + \beta^2)^2} \quad (10)$$

Исследуем более подробно формулу (9). Если длина волны велика по сравнению с h , то $h\beta$ и $h\zeta$ становятся малыми, так что гиперболические тангенсы можно заменить их аргументами и тогда $4k^2\zeta^2 = (k^2 + \beta^2)^2$. Подставляя сюда

значения β и ζ , после преобразования получим $C^2 = 4C_2^2 \frac{C_1^2 - C_2^2}{C_1^2}$. Но $C_1^2 = \frac{\gamma G}{\rho}$

и $C_2^2 = \frac{G}{\rho}$, следовательно $C = 2\sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}}C_2$ (11), что при $\gamma = \frac{\lambda+2\mu}{\mu}$ совпадает с результатом, полученным из элементарной теории [2].

Для очень коротких волн $h\beta$ и $h\zeta$ становятся очень большими и их гиперболические тангенсы стремятся к единице. При этом уравнение (9) упрощается:

$$(k^2 + \beta^2) = 4k^2\beta\zeta.$$

Возводя в квадрат обе части и подставляя значения β и ζ , получаем

$$\left(2 - \frac{C^2}{C_1^2}\right)^4 = 16\left(1 - \frac{C^2}{C_1^2}\right)\left(1 - \frac{C^2}{C_2^2}\right)$$

В этом уравнении мы узнаем [1, 2] характеристическое уравнение для поверхностных волн Релея.

Итак, плоские продольные волны в бесконечной пластинке могут распространяться со скоростью c , представленной формулой (11), когда длина волны очень велика по сравнению с толщиной пластинки h , и со скоростью поверхностных волн Релея, когда длина волны очень мала в сравнении с толщиной. Для длин волн, сравнимых с толщиной, имеет место дисперсия, а скорость зависит от отношения длины волны к толщине полосы.

1. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, – 1975. – 872 с. 2. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Изд-во «ИЛ» – 1955. – 192 с.

УДК 539.532.526

Г. Я. Беляев, А. Ф. Головаченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛА ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ ДВУХ ТЕЛ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Как известно, все металлы характеризуются кристаллическим строением. В узлах кристаллической решетки располагаются атомы элементов, из которых состоит данный сплав. Внутренние атомы кристаллической решетки окружены всегда определенным количеством соседних атомов и взаимодействуют с ними. Поверхностный слой атомов всегда находится в неустойчивом состоянии, отличающемся от энергетического состояния внутренних атомов. У поверхностных атомов со стороны окружающей среды отсутствуют связи с себе подобными элементами, а имеются только связи, с соседними атомами поверхностного слоя направленные вдоль поверхности, и с внутренними атомами кристаллической решетки металла. Идеальных кристаллических решеток у реальных металлов и их сплавов не существует, т.е. все металлы имеют дефекты кристаллического строения. Дефектом является любое отклонение от периодической структуры кристаллической. Различают точечные, линейные и плоские дефекты. Механические свойства металлов и их сплавов в значительной степени зависят от наличия дефектов кристаллического строения, т.к. энергия взаимодействия атомов в месте дефекта резко отличается от межатомного взаимодействия в бездефектной зоне. К дефектам относятся вакансии, дислокации, двойники, пластинчатые выделения, а также границы кристаллитов. Любой дефект кристаллической решетки будет снижать механические характеристики металлов и сплавов, например, такие как прочность, износостойкость, хрупкость, коррозионная стойкость и др. Это подтверждается исследованиями прочности нитевидных кристаллов и обычных массивных образцов при разрыве и сравнением их с идеальной прочностью этих материалов [1]. Можно сказать, что значительное влияние на свойства металлов и сплавов оказывают границы кристаллитов, т.к. именно здесь резко меняются свойства кристаллической решетки и здесь чаще всего начинаются различные процессы разрушения металлов, например процесс межкристаллитной коррозии.

Рассматривая реальную поверхность металлов, мы видим, что она далека от идеально гладкой поверхности, состоящей из одного ровного слоя атомов. На геометрию и энергетическое состояние поверхности металлов и их сплавов значительное влияние оказывают методы их получения и обработки поверхности.

Представим две металлические поверхности, соприкасающиеся друг с другом в момент времени t_0 при относительной скорости скольжения равной нулю, т.е. $V_1 = V_2 = 0$. В зоне их соприкосновения можно отметить несколько своеобразных зон касания, на рисунке 1 девять таких зон.

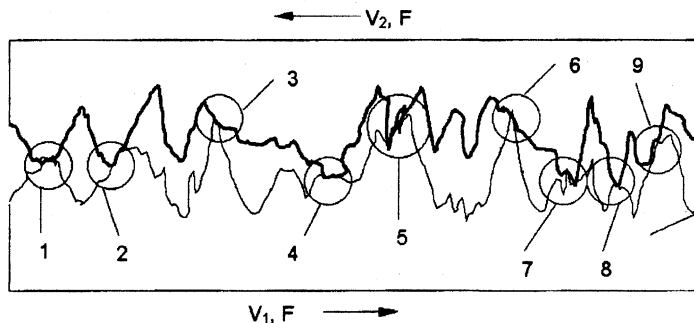


Рис. 1. Две соприкасающиеся поверхности в момент времени $t_0 = 0$.

В зонах 2, 5, 6 и 9 выступы двух поверхностей находятся как бы в зацеплении относительно направления векторов V_1 и V_2 , а в зонах 1, 3, 4, 7, 8 выступы опираются друг на друга. В момент времени $t_1 > 0$, когда скорости $V_1 = V_2 \neq 0$, зацепившиеся выступы будут действовать друг на друга так, что либо сдеформируют друг друга в упругой области с последующей релаксацией напряжений деформации и восстановлением геометрии выступа, либо в области пластической деформации произойдет их смятие, либо, когда напряжения в каком-то сечении выступа превысят предел прочности материала, произойдет частичное разрушение выступов и появление в пространстве между двумя поверхностями отдельных частиц соприкасающихся металлов. Выступы шероховатости, стоящие друг на друге в момент времени t_0 , в следующий момент t_1 при $V_1 = V_2 \neq 0$ будут взаимодействовать между собой в основном в области упругой деформации, но исключать взаимодействие в области пластического деформирования нельзя, т.к. это будет зависеть от сил, прижимающих два тела друг к другу. В момент времени t_2 , когда $V_1 = V_2 = \text{const}$, все три типа взаимодействия (упругое деформирование, пластическое течение и разрушение изломом или сдвигом) выступов шероховатостей двух поверхностей останутся и будут существовать до тех пор, пока на поверхностях не образуется геометрия, при которой разрушение изломом или сдвигом прекратится и останутся только два взаимодействия – в упругой области и области пластической деформации. Это подтверждает существование зоны I и зоны II на кривой зависимости износа от времени действия процесса трения [2].

В процессе трения двух тел кроме описанных выше взаимодействий существуют и протекают другие взаимодействия, которые присутствуют практически всегда и проявляют себя в повышении температуры в зоне трения, появлении электрического потенциала на поверхностях, возникновении фиксируемых приборами электромагнитных и акустических колебаний в различных диапазонах [3-5], и, вероятно, эти процессы сказываются на потерях упругой деформации в поверхностном слое. Все это в значительной степени зависит от природы трущихся тел и таких известных явлений, как адсорбция и смачиваемость поверхности.

Поскольку в момент времени $t_0=0$ основными факторами влияющими на взаимодействие двух твердых тел, являются шероховатость поверхности и сила нормального давления, сжимающая два тела, т.е. расстояние, на которое сближаются два тела своими структурными составляющими, то и рассмотрим с определенными приближениями эти факторы без учета остальных, считая силу нормального давления постоянной $N=\text{const}$, т.е. рассмотрим явление в момент времени $t_1 \neq 0$ при $V_1=V_2>0$ (V_1 и V_2 – скорость перемещения двух тел относительно друг друга), но имеющих значение, незначительно отличающееся от нуля.

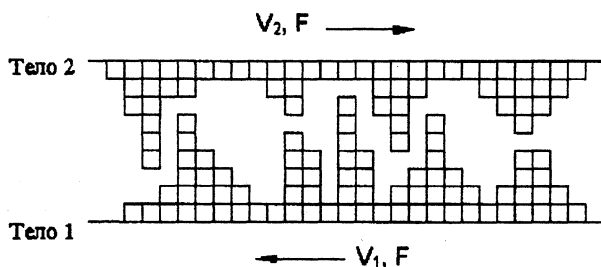


Рис. 2. Модель поверхностей двух соприкасающихся тел, $V_1=V_2=0$.

Полагаем, что поверхности трущихся тел построены так, как показано на рисунке 2. В начале движения выступы шероховатости, зацепившись друг за друга будут находиться некоторое время под действием внешней силы F , задающей относительное движение телам. Все выступы можно рассматривать как консольно закрепленные балки с нагрузкой, направленной противоположно векторам скорости V_1 и V_2 . Одни выступы, зацепившись друг за друга, будут взаимодействовать до тех пор, пока не произойдет их разрушение или пластическое деформирование, другие – в упругой области с полной релаксацией напряжений деформации или с остаточной пластической деформацией отдельных структурных составляющих. Можно заметить, что разрушение кристаллической решетки металлов будет происходить по наиболее слабым местам, т.е. по зонам слабых межатомных связей, в наиболее активных центрах на поверхности – в местах выхода дислокаций на поверхность и по границам зерен и блоков мозаики.

Рассмотрим взаимодействие выступов с момента времени $t=t_0=0$ и до времени $t=t_1>0$, момента разрушения одного из выступов (рис. 3).

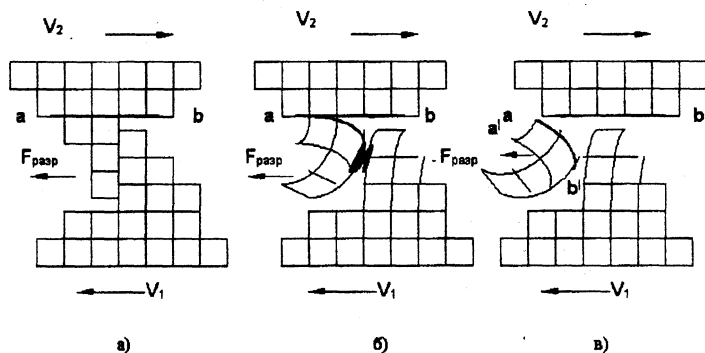


Рис. 3. Схема разрушения выступов шероховатости отрывом, $V_1 = V_2 > 0$.

Принимаем, что кристаллическая решетка бездефектна. Для разрушения выступа сила $F_{\text{разр}}$ должна быть такой, чтобы преодолеть силы межатомного взаимодействия и удалить атомы друг от друга на расстояние большее, чем дальное действие межатомных сил. Можно предположить, что это расстояние должно быть не менее Дебаевского радиуса, т.е. $a > r_D$, для металлов $r_D = (2...3)a_0$ (a_0 – постоянная кристаллической решетки) [3]. Воспользовавшись простым способом оценки прочности бездефектного кристалла при нормальном отрыве, предложенным Орованом [6] и вытекающим из достаточно простых предположений о периодическом характере сил межатомного взаимодействия, определим напряжения разрушения:

$$\sigma = (E / \pi)(a / a_0) \quad (1)$$

Подставим минимальное значение r_D для металлов, считая $a = r_D$, получим минимальное значение разрушающих напряжений:

$$\sigma_{\min} = 2E / \pi \quad (2)$$

Рассматривая схему разрушения выступов шероховатости разрывом связей по томным плоскостям (рис. 3), можно предположить, что процесс разрушения может происходить и по сдвиговому варианту в той же плоскости по линии $a-b$. Такой характер разрушения структуры кристаллической решетки материала не будет неожиданным, если проанализировать данные расчетов прочности на сдвиг и отрыв. Для расчетов, выполненных из одинаковых предпосылок, отношение $\sigma_{\text{теор}} / \tau_{\text{теор}}$ составляет: для ОЦК-металлов – 6,4, для ГЦК-металлов – 9,0 [7] в приближении синусоидального закона сил межатомного взаимодействия (по Оровану и Френкелю). Получается, что для всех низкоиндексных ориентаций осей

кристаллов и наиболее вероятных систем скольжения $\tau_{\text{теор}}$ будет достигаться раньше, чем нормальные напряжения достигнут значения $\sigma_{\text{теор}}$. Из этого следует, что разрушение сдвигом энергетически более выгодно по сравнению с разрушением отрывом, так как при его осуществлении речь идет не о мгновенном разрыве межатомных связей по всей поверхности разрушения, а о трансляционных переключениях связей с образованием элементарных ступенек скольжения при каждом акте сдвига.

На рисунке 4 представлена схема возможного разрушения выступа шероховатости по линии $a-b$ при сдвиговом характере процесса. В обоих вариантах разрушения образуется отдельная частичка материала, которая будет находиться между трущимися поверхностями и при ее достаточной прочности будет создавать естественные помехи процессу трения. Рассматривая процесс трения вначале движения двух тел, зададимся начальными условиями движения и определим величину силы разрушения некоторого количества выступов шероховатостей поверхности с некоторыми приближениями.

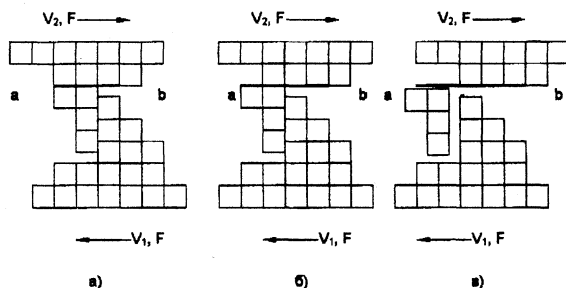


Рис. 4. Схема разрушения выступов шероховатости по сдвиговому характеру.

Принимаем, что площадь поверхности трения одного тела равна S , скорость перемещения двух тел в момент времени t_1 , равна $V_1 = V_2 = \text{const}$. Тогда сила, задающая движение двум телам, будет равна:

$$F = m_1 \cdot a + F_{\text{вз}} + F_{\text{разр}}, \quad (3)$$

где m_1 – масса первого тела;

a – ускорение движения от $V_1=0$ до V_1 за время t_1 ;

$F_{\text{вз}}$ – сила взаимодействия двух тел при V_1 и равная силе трения скольжения;

$F_{\text{разр}}$ – сила разрушения выступов шероховатости на площади S .

Из равенства (3) определим силу разрушения с учетом того, что $F_{\text{вз}} = F_{\text{тр.скольж.}}$

$$F_{\text{разр}} = F - (m_1 \cdot a + F_{\text{тр.скольж.}}) \quad (4)$$

Так как взаимодействие двух тел будет зависеть от силы нормального сжатия этих тел, т.е. от силы $N = \text{const}$, то с учетом этого уравнение (4) запишем в виде;

$$F_{\text{разр}} = F - (m_1 \cdot a + N \cdot k), \quad (5)$$

где k – коэффициент трения скольжения данных двух материалов.

Все это говорит о том, что для вновь собранного узла подшипника скольжения необходимо прикладывать большее усилие в начальный момент движения. Величина превышения начальной силы расходуется на разрушение поверхностей трения и образование отдельных частиц трущихся материалов, реально появляющихся в смазывающей жидкости. Для устранения этого явления необходимо снижать шероховатость поверхности детали с более высокой твердостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proceedings III International Conference on High Voltag Electron Microscopy, Oxford, 1973. L: Acad, press, 1974. – 532 p.
2. Губкин С.Н. Пластическая деформация металлов. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1961. – 422 с.
3. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
4. Бондаренко А.Н. Лазерные методы возбуждения и регистрации акустических сигналов. – М.: Наука, 1989. – 112 с.
5. Микельсон А.Э., Черный З.Д. Электродинамическое возбуждение и измерение колебаний в металлах. – Рига: Зинатие, 1979. – 67 с.
6. Келли А. Высокопрочные материалы. – М.: Мир, 1976. – 261 с.
7. Новиков И.И., Ермишкин В.А. Микромеханизмы разрушения металлов. – М.: Наука, 1991. – 368 с.

УДК 593.3

Ю. В. Василевич, А. В. Курбачев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩЕГО ЭКРАНА В СРЕДЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

При проектировании виброизолирующих конструкций в средах распространения упругих волн необходимо учитывать условия, при которых данные конструкции работают эффективно. Особый интерес представляет решение задачи по оценке оптимальных виброзащитных свойств тонкой бесконечной по протяженности плиты

толщины h , расположенной вертикально в упругом изотропном полупространстве. Рассмотрим случаи падения на плиту продольной и поперечной волн. Начало ортогональной системы координат OZY расположим на правой границе плиты. Ось Y направим вверх, а ось Z – вправо. Фронт волны проходит параллельно оси X .

Пусть из левого полупространства I ($z < -h$) падает под произвольным углом θ на плиту плоская гармоническая продольная волна или под углом γ – поперечная волна. В обоих случаях в полупространстве I образуются отраженные продольная и поперечная волны. В полупространстве II ($z > 0$) будут только уходящие от границы плиты продольная и поперечная волны. Потенциалы всех упомянутых волн, опускающая фактор $\exp j(\omega t - \xi y)$, представим в виде:

$$\begin{aligned} &\varphi, \exp[-ja(z+h)], \varphi', \exp[ja(z+h)], \varphi_2 \exp[-jaz], \\ &\psi_1 \exp[-jb(z+h)], \psi', \exp[jb(z+h)], \psi_2 \exp[-jbz], \end{aligned} \quad (1)$$

где $j = (-1)^{1/2}$;

ω – частота колебаний;

t – время;

$\xi = k_1 \sin \theta = k_2 \sin \gamma$, $k_1 = \omega/c_1$, c_1 – скорость распространения продольной волны в упругой среде, θ – угол, образованный нормалью к фронту продольной волны с осью z , $k_2 = \omega/c_2$, c_2 – скорость распространения поперечной волны в упругой среде, γ – угол, образованный нормалью к фронту поперечной волны с осью z ;

$\varphi_1, \varphi_1', \varphi_2$ – соответственно амплитуды падающей, отраженной и прошедшей продольных волн;

ψ_1, ψ_1', ψ_2 – соответственно амплитуды падающей, отраженной и прошедшей поперечных волн;

$\alpha = k_1 \cos \theta$, $\beta = k_2 \cos \gamma$.

Нагрузку, действующую на плиту, разобьем на симметричную σ_c, τ_c и асимметричную σ_a, τ_a части. Величины $\sigma_c, \tau_c, \sigma_a, \tau_a$ представим в виде полусуммы и полуразности соответствующих напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 0,5(\sigma_{z1} + \sigma_{z2}), \quad \sigma_a = 0,5(\sigma_{z2} - \sigma_{z1}), \\ \tau_c &= 0,5(\tau_{yz1} - \tau_{yz2}), \quad \tau_a = 0,5(\tau_{yz1} + \tau_{yz2}), \end{aligned} \quad (2)$$

где σ_{z1}, σ_{z2} – нормальные напряжения в левом и правом полупространствах на границах с плитой;

τ_{yz1}, τ_{yz2} – касательные напряжения (на тех же границах);

При этом компоненты напряжений σ_z и τ_{yz} определяются по формулам:

$$\sigma_z = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right), \quad (3)$$

где λ и μ – постоянные упругости Ляме;

$$W = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad V = \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad (4)$$

где – W и V – горизонтальная и вертикальная составляющие смещения точек полупространств;

φ и ψ – потенциалы продольной и поперечной волн.

Продольные перемещения V_0 срединной плоскости плиты, вызванные симметричной нагрузкой, описываются уравнением

$$\left[\frac{d^2}{dy^2} + \left(\frac{\omega}{c_n} \right)^2 \right] V_0 = \frac{2\tau_c}{m_n c_n^2}, \quad (5)$$

где c_n – скорость продольной волны в конструкции;

m_n – масса единицы площади плиты.

Частное решение уравнения (5) запишем в виде

$$V_0 = 2\tau_c \left[m_n \omega^2 (1-d) \right]^{-1}, \quad (6)$$

где $d = (\sin \theta c_n / c_1)^2$.

Под действием асимметричной нагрузки плита совершает изгибные колебания, которые опишем уравнением

$$\frac{D d^4 W_n}{dy^4} - m_n \omega^2 W_n = -2\sigma_a + \frac{h d \tau_a}{dy}, \quad (7)$$

где D – цилиндрическая жесткость плиты;

W_n – поперечные перемещения ее срединной плоскости.

Поскольку рассматриваются вынужденные гармонические колебания, то частное решение уравнения (7) представим в виде

$$W_n = (2\sigma_a - j\xi h \tau_a) \left[m_n \omega^2 (v-1) \right]^{-1}, \quad (8)$$

$$\text{где } v = \frac{D \xi^4}{m_n \omega^2} = \frac{C_u^4 \sin^4 \theta}{c_1^4},$$

c_n – фазовая скорость изгибной волны в плите.

В рамках принятых уравнений, описывающих колебания плиты, поперечными перемещениями, вызванными нагрузкой σ_c , пренебрегаем в силу их малости.

Полные продольные смещения поверхностей плиты V_{n1} и V_{n2} состоят из двух слагаемых, первое из которых – смещение точек срединной плоскости, а второе – смещение поверхности плиты с учетом ее деформации от изгиба, т.е.

$$V_{n1}=V_0+0,5h \frac{dW_n}{dy}, V_{n2}=V_0-0,5h \frac{dW_n}{dy}. \quad (9)$$

При жесткой связи частиц среды с плитой необходимо, чтобы кроме равенства одноименных компонент тензора напряжений на поверхностях плиты выполнялись соотношения:

$$W=W_n, V=V_{n1} \text{ при } z=-h, W=W_n, V=V_{n2} \text{ при } z=0. \quad (10)$$

Подстановкой в граничные условия (10) формул (6), (8), (9), с учетом (1), (2), (3), (4) получим следующие выражения искомых амплитуд для случая падения продольной волны:

$$\begin{aligned} \varphi'_1 &= [a_1 W_n - j\xi V_0 + j_1 (\xi^2 - \alpha\beta)] a_2^{-1}, \quad \psi'_1 = [a_3 \xi W_n + j\alpha V_0 - 2j_1 \alpha \xi] a_2^{-1}, \\ \varphi_2 &= (a_1 W_n + j\xi V_0) a_2^{-1}, \quad \psi_2 = (a_3 \xi W_n - j\alpha V_0) a_2^{-1}, \end{aligned} \quad (11)$$

а для случая падения поперечной волны

$$\begin{aligned} \varphi'_1 &= (-W_n a_1 + j\xi V_0 + 2\beta \xi \psi_1) a_2^{-1}, \quad \psi'_1 = [W_n \xi a_3 + j\alpha V_0 - \psi_1 (\xi^2 - \alpha\beta)] a_2^{-1}, \\ \varphi_2 &= (W_n a_1 + j\xi V_0) a_2^{-1}, \quad \psi_2 = (W_n \xi a_3 - j\alpha V_0) a_2^{-1}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $a_1 = -0,5h\xi^2 + j\beta$, $a_2 = \xi^2 + \alpha\beta$, $a_3 = 0,5h\alpha + j$.

Выражения для поперечных и продольных смещений плиты от воздействия продольной волны, исходя из (2), (6), (8), (11), запишем в виде

$$W_n = \frac{\varphi_1 \alpha (2t_0 + jt_1)}{l_1 + jl_2}, V_0 = -\frac{2\varphi_1 g_2 \cos\theta}{l_4 - jl_3}, \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} t_0 &= (1 - g_2^2 \sin^2 \theta)^{0.5}, \quad t_1 = g_1 g_2 \sin^2 \theta, \quad t_2 = t_0 \cos \theta + g_2 \sin^2 \theta, \\ t_3 &= g_1 t_2 \rho_n / \rho, \quad l_1 = t_3 (v - 1) - 2t_1 (1 - 2g_2 t_2), \\ l_2 &= 2t_0 + 0,5g_1 t_1 \cos \theta + t_3 v \eta, \quad l_3 = 2g_2 \cos \theta + t_3 d \eta, \\ l_4 &= t_3 (1 - d), \quad g_1 = h\omega / c_1; \quad g_2 = c_2 / c_1; \quad v = (g_1 c_n / c_1)^2 \sin^4 \theta / 12, \end{aligned}$$

ρ_n и ρ – плотности материала плиты и среды;

η – коэффициент потерь в материале плиты.

Аналогичные выражения для случая падения поперечной волны, исходя из (2), (6), (8), (12) представим в следующем виде:

$$W_n = \frac{\psi_1 \xi \cos \gamma (2 - j q_1 a_0)}{r_1 + j r_2}, \quad V_0 = \frac{2 \psi_1 \beta a_0}{r_3 - 2 j a_0}, \quad (14)$$

где $a_0 = \left(g_2^2 \sin^2 \gamma \right)^{0.5}$, $r_1 = \frac{\rho_n}{\rho} (v_1 - 1) q_1 r_0 + 2 q_1 \sin^2 \gamma (2 r_0 - 1)$,

$$r_0 = a_0 \cos \gamma + \sin^2 \gamma, \quad r_2 = 2 \left[\cos \gamma + a_0 \left(0.5 q_1 \sin \gamma \right)^2 \right],$$

$$r_3 = \frac{\rho_n}{\rho} q_1 (1 - d_1) r_0, \quad q_1 = h \omega / c_2,$$

$$d_1 = (c_n \sin \gamma / c_2)^2, \quad v_1 = (q_1 c_n / c_2)^2 \sin^4 \gamma / 12.$$

Амплитуды отраженных и прошедших волн получим на основании формул (11), (12), (13), (14).

Анализ формул для амплитуд смещений W_2 и V_2 в полупространстве за плитой показал, что при $g_1 \ll 1$ изгибными колебаниями можно пренебречь для всех углов падения продольной волны. С ростом g_1 роль изгибных колебаний возрастает.

Если

$$d > \frac{8 g_2 \left[2 t_0 (1_2 + \eta_1) - t_1 (1_1 - \eta_1) \right]}{g_2 t_1 (4 t_0^2 + t_1^2)} + 1,$$

то сопротивление плиты симметричным колебаниям становится значительно больше сопротивления асимметричным колебаниям, и продольными колебаниями по сравнению с изгибными можно пренебречь. При $g_1 = (\sqrt{12} c_1 / c_n)$

$\theta_1 = \arcsin (\sqrt{12} / \sqrt{g_1 c_n / c_1})$ и угле падения $\theta_2 = \arcsin (c_1 / c_n)$. возникает явление волнового совпадения для изгибных волн, при котором след падающей на плиту волны равен длине волны изгиба, что приводит к интенсивным изгибным колебаниями плиты. Аналогичное явление наблюдается и при $d \rightarrow 1$. Но d не зависит от g_1 , поэтому волновое совпадение для продольных волн возникает только при определенном угле падения $\theta_2 = \arcsin (c_1 / c_n)$. В этом случае ограждающая конструкция не снижает вертикальные перемещения среды. При $g_1 > 1$ наибольших значений амплитуда вертикальных перемещений достигает в окрестности угла θ_1 .

Исследование формул для амплитуд перемещений W_2 и V_2 при падении поперечной волны показало, что для $q_1 < 2$ амплитуда вертикальных смещений достигает

ет наибольших значений при критическом угле падения поперечной волны $\gamma = \gamma_0 = \arcsin \gamma_2$. Если $q_1 \leq 1$ и $\gamma = \gamma_0$, продольная волна вызывает такое же вертикальное перемещение как и поперечная.

При $q_1 > \sqrt{12} c_2 / c_n$ и угле падения $\gamma_1 = \arcsin (\sqrt[3]{12} / \sqrt{q_1 c_n / c_2})$ возникает явление волнового совпадения для изгибных волн, что приводит к резкому возрастанию как изгибных, так и продольных колебаний плиты. Волновое совпадение для продольных волн возникает всегда при угле падения $\gamma_2 = \arcsin (c_2 / c_n)$.

На рисунке 1 изображены увеличенные в h/φ_1 раз амплитуды горизонтальных I, II, вертикальных III, IV и изгибных V смещений при $g_1=2,0$, $g_2=0,5$, $\rho_n/\rho=1,25$, $c_n/c_1=10$ для случая падения продольной волны (а), и увеличенные в h/φ_1 раз амплитуды вертикальных I, II и горизонтальных III, IV смещений при $q_1=1,0$, $g_2=0,5$, $\rho_n/\rho=1,25$, $c_n/c_2=20$ для случая падения поперечной волны (б) во втором упругом полупространстве.

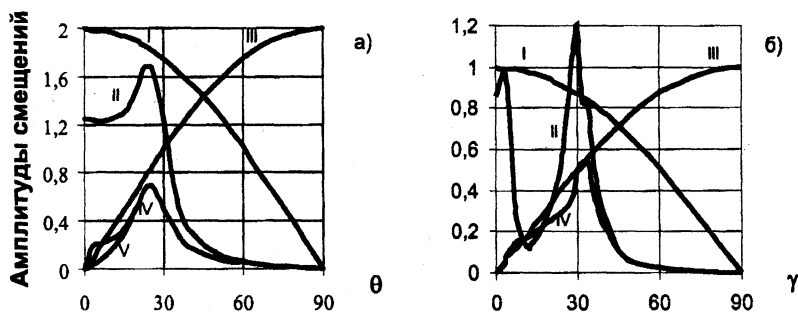


Рис. 1. Зависимость амплитуд смещений от угла падения волны: а) I, III – при отсутствии плиты, II, IV, V – после установки плиты; б) I, III – при отсутствии плиты, II, IV – после установки плиты.

Из рисунка (а) видно, что для угла падения $\theta = 15^\circ$ с учетом установки экрана амплитуды горизонтальных и вертикальных смещений снижаются в 1,5 раза, а для $\theta = 45^\circ$ – почти в 8 раз. При этом явление волнового совпадения для падающей волны наблюдается в окрестности угла $\theta_1 = 25^\circ$.

Рисунок (б) отражает снижение амплитуды вертикальных смещений для $\gamma = 11^\circ$ почти в 7 раз. Амплитуда горизонтальных смещений в этом случае изменяется незначительно. При $\gamma = 45^\circ$ снижение амплитуд вертикальных и горизонтальных смещений достигается почти в 5 раз. Явление волнового совпадения для падающей волны наступает в окрестности угла $\gamma_1 = 30^\circ$, а для прошедшей продольной волны – в окрестности $\gamma_2 = 3^\circ$.

Из анализа результатов полученных исследований следует, что при $g_1 > 1$, $\theta \geq 1,5\theta_1$ (падение продольной волны) и при $q_1 \geq 2$, $\gamma \geq 1,5\gamma_1$ (падение поперечной волны) плита является эффективной виброизолирующей конструкцией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 344 с.
2. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций – М.: Стройиздат, 1969. – 185с.

УДК 539.3

А. Е. Крушевский, Т. А. Лудеманн

УТОЧНЕННАЯ ТЕОРИЯ ДИНАМИКИ ТОНКИХ ПЛАСТИН

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Как известно, при выводе уравнений технической теории тонких пластин приняты априорные гипотезы Кирхгофа–Лява, а также допущены некоторые противоречия с законом Гука и с условиями выполнения краевых условий на торцах пластинки. Кроме того, пренебрегается инерцией поворота элементарного столбика, что не позволяет получить достоверные решения ряда динамических задач, таких как определение спектра частот собственных колебаний, определение вынужденных колебаний пластин и др. А это обстоятельство, в свою очередь, сказывается на применении модели упругой пластинки к изучению различных физических явлений, например, при моделировании голосообразования в случае представления голосовых связок в виде тонких упругих пластин, подверженных действию динамических нагрузок [5].

Указанные недостатки технической теории пластин заставили ученых построить различные уточненные теории [1, 2, 3]. По мнению авторов данной статьи, наиболее совершенную теорию пластин можно построить, если заранее выполнить все краевые условия на торцах:

$z = \pm \frac{h}{2}$, $\sigma_z = \pm \frac{q}{2}$, $\tau_{xz} = \pm \frac{x}{2} \frac{z}{2}$, $\tau_{yz} = \pm \frac{y}{2} \frac{z}{2}$. Это можно осу-

ществить на базе любых полных рядов с использованием вариационного уравнения равновесия элементарного столбика [4]. В частности, удобно применить ряды по полиномам Лежандра благодаря их ортогональности [2].

Ограничиваясь двумя полиномами, запишем ряды аппроксимирующих функций:

$$u = \frac{2z}{h} U_1 + \left(\frac{20z^3}{h^3} - \frac{3z}{h} \right) U_3$$

$$v = \frac{2z}{h} V_1 + \left(\frac{20z^3}{h^3} - \frac{3z}{h} \right) V_3$$

$$w = W_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{12z^2}{h^2} - 1 \right) W_2$$

В качестве возможных перемещений возьмем линейные функции, а именно $\delta u = z$, $\delta v = z$, $\delta w = 1$.

Выполняя краевые условия на торцах пластинки, получим следующие выражения для перемещений:

$$u = \frac{5z}{2h} \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) U_1 + \left(\frac{20z^3}{h^3} - \frac{3z}{h} \right) \left[\frac{x_z}{2G} - \frac{\partial}{\partial x} \left(1 + \frac{\gamma_2 h^2 \Delta_2}{12\gamma} \right) W_0 - \frac{(\gamma-1) h \partial q}{12\gamma G \partial x} \right] \frac{h}{12},$$

$$v = \frac{5z}{2h} \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) V_1 + \left(\frac{20z^3}{h^3} - \frac{3z}{h} \right) \left[\frac{y_z}{2G} - \frac{\partial}{\partial y} \left(1 + \frac{\gamma_2 h^2 \Delta_2}{12\gamma} \right) W_0 - \frac{(\gamma-1) h \partial q}{12\gamma G \partial y} \right] \frac{h}{12},$$

$$w = W_0 + \frac{\gamma_2 h}{24\gamma} \left(\frac{12z^2}{h^2} - 1 \right) \left(h \Delta_2 W_0 + \frac{\gamma-1}{\gamma_2} G q \right), \quad \Delta_2 = \Delta - \frac{\rho \partial^2 t}{G},$$

h – толщина пластинки, ρ – плотность, G – модуль сдвига, $\gamma = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}$, $\gamma_2 = \gamma - 2$,

ν – коэффициент Пуассона, $\Delta = \partial_x^2 + \partial_y^2$, Δ – оператор Лапласа.

Неизвестные функции U_1 , V_1 и W_0 находятся из уравнений равновесия элементарного столбика:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz - \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz} dz - \rho \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} z dz + X_z = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz - \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yz} dz - \rho \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} z dz + Y_z = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yz} dz - \rho \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} dz + q = 0.$$

В результате выполнения всех операций интегрирования и исключения обобщенных перемещений U_1 и V_1 получим разрешающее уравнение относительно W_0 :

$$\begin{aligned} & \frac{-\gamma_2 h^2 \Delta \Delta_1 \Delta_2 W_0}{720} + \frac{1}{6} \left[\frac{\gamma \Delta_1 (6\Delta_2 - \Delta)}{10} - \frac{\gamma_2^2 \Delta \Delta_2}{2\gamma} \right] W_0 + \frac{\rho \partial^2 W_0}{G h^2 \partial t^2} = \\ & = \frac{q}{G h^3} + \frac{(\gamma - 1) \Delta \Delta_1 q h}{720 G} - \gamma \left[\frac{\Delta_1}{10} - \frac{\gamma_2 (\gamma - 1) \Delta}{12 \gamma^2} \right] \frac{q}{G h} - \frac{\gamma}{6 G} \left(\frac{\Delta_1}{20} - \frac{3}{\gamma h^2} \right). \end{aligned} \quad (27)$$

$$(\partial_x x_z + \partial_y y_z), \text{ где } \Delta_1 = \Delta - \frac{\rho}{\gamma G} \partial_t^2.$$

Если пренебречь инерционными членами в операторах Δ_1 и Δ_2 , т.е. $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$, а также отбросить слагаемые с производными от нагрузки, слагаемое, содержащее оператор $\Delta \Delta_1 \Delta_2$, то получим известное уравнение Софи-Жермен технической теории пластин, а именно:

$$\Delta \Delta W_0 + \frac{\rho h \partial_t^2}{D} W_0 = \frac{3 \gamma q}{(\gamma - 1) G h^3} = \frac{q}{D}, \quad D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)}.$$

Таким образом, благодаря использованию в качестве возможных перемещений линейных функций на основе гипотез Кирхгофа-Лява, предлагаемая уточненная теория пластин обладает преимуществом по отношению к классической теории и в то же время свободна от противоречий.

В качестве примера определим собственные частоты изгибных колебаний прямоугольной шарнирно опертой пластинки. В этом случае на контуре пластинки должны быть равны нулю вертикальные перемещения и изгибающие моменты. Это означает, что решение можно построить с помощью рядов Фурье, выполняющих указанные условия, т.е.

$$W_0 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} \sin \frac{\pi m x}{a} \sin \frac{\pi n y}{b} \sin(\omega t + \alpha).$$

В результате получаем следующее частотное уравнение:

$$\begin{aligned} & \frac{\omega^4 \rho^2}{G^2} \left[\frac{3}{5} + \frac{\gamma_2 h^2 \pi^2}{120 \gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] - \\ & - \frac{\omega^2 \rho}{G} \left[\frac{\gamma_2 h^2 (\gamma + 1) \pi^4}{120 \gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 + \frac{(13\gamma - 10) \pi^2}{5 \gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) + \frac{6}{h^2} \right] + \\ & + \frac{\gamma_2 h^2 \pi^6}{120} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^3 + \frac{2(\gamma - 1) \pi^4}{\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 = 0. \end{aligned}$$

Подсчитаем некоторые собственные частоты изгибных колебаний квадратной пластинки ($a=b$) по технической и уточненной теории ($\gamma=3$, $\gamma_2=1$, $\frac{h}{a}=0,1$, $\nu=0,25$). Формула для частоты по технической теории [6]:

$$\omega_{mn}^T = \pi^2 h \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{G}{6(1-\nu)\rho}}.$$

Таблица значений собственных частот ($\sqrt{\frac{G}{\rho a^2}}$)

m	1	3	3	5
n	1	1	3	1
ω^T	0,9305	4,6525	8,374	12,097
ω^Y	0,903	4,0884	6,804	9,209
	32,586	36,0154	38,975	41,625

где ω^T – частота по технической, ω^Y – частота по уточненной теории.

Как и следовало ожидать, значения собственных частот уменьшились благодаря увеличению числа степеней свободы элементарного столбика. Кроме того, учет инерции поворота элементарного столбика показывает возникновение нового спектра частот изгибных колебаний высокого тона. Если различие между собственными низшими частотами по технической и уточненной теории незначительное, то для высших частот это различие существенное. Итак, даже для достаточно тонкой

пластинки ($\frac{h}{a} = 0,1$) при определении собственных частот изгибных колебаний по уточненной теории имеем существенно новые результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. М: Физматгиз, 1967. – 266 с.
2. Амбразевич В.Л., Крушевский А.Е. Построение уточненной теории трансверсально-изотропных пластин на основе методов аналитической механики // 25 я н/т конф. БПИ. – Мн., 1969. – С. 39–49.
3. Векуа И.Н. Об одном обобщении классической теории упругих оболочек. // Третий Всесоюзный съезд по теор. и прикл. механике. Аннотации докл. – М., 1968. – С. 65–66.
4. Крушевский А.Е. Вариационные методы расчета корпусных деталей машин. Мн.: Наука и техника, 1967. – 238 с.
5. Крушевская Т.А. Построение математической модели голосообразования. // Тезисы н/т конференции, посвященной 70-летию БГУ. Мн.: Вышэйшая школа. 1991. – с. 238–239.
6. Пономарев С.Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 3. Машгиз. – 1959. – 118 с.

УДК 621.97

С. Лабер

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СХВАТЫВАНИЮ СЕРОГО ЧУГУНА

*Политехника Зеленогурска
Зелена Гура, Польша*

Работа пары трения скольжения в условиях смешанного трения в случае разрыва смазочной пленки сопровождается катастрофическим изнашиванием поверхностей контакта, т.е. их разрушением. Это явление называется схватыванием. Сопротивление схватыванию – одна из эксплуатационных характеристик деталей машин, работающих в условиях трения скольжения. В процессе взаимодействия элементов трения оно проявляется в виде сцепления и появления мостиков схватывания, разрушение которых практически мгновенно возрастает, приводя к глубинным разрушениям поверхностного слоя деталей. Схема работы пары трения «металл – металл» приведена на рис. 1.

Процесс фрикционного контакта можно разделить на три этапа: возникновение стыка, молекулярное взаимодействие трущихся поверхностей и прерывание кон-

такта. На первом этапе работы кинематической пары, когда между контактирующими поверхностями, покрытыми оксидными пленками, находится смазочная среда, преобладающими среди контактных процессов являются пластические деформации микронеровностей и приповерхностных слоев. При ухудшении условий работы, например, возрастании нагрузок, изменении условий смазывания и т.д., пластические деформации в приповерхностных слоях возрастают, вызывая повреждение и частичное перемещение оксидных пленок, в результате чего возникает не посредственный контакт металлических поверхностей, возрастают силы адгезии начинается второй этап процесса фрикционного контакта – молекулярное взаимодействие трущихся поверхностей. В ходе этого взаимодействия возникают адгезионные связи в виде налипов. Третий этап – это уничтожение участков схватывания

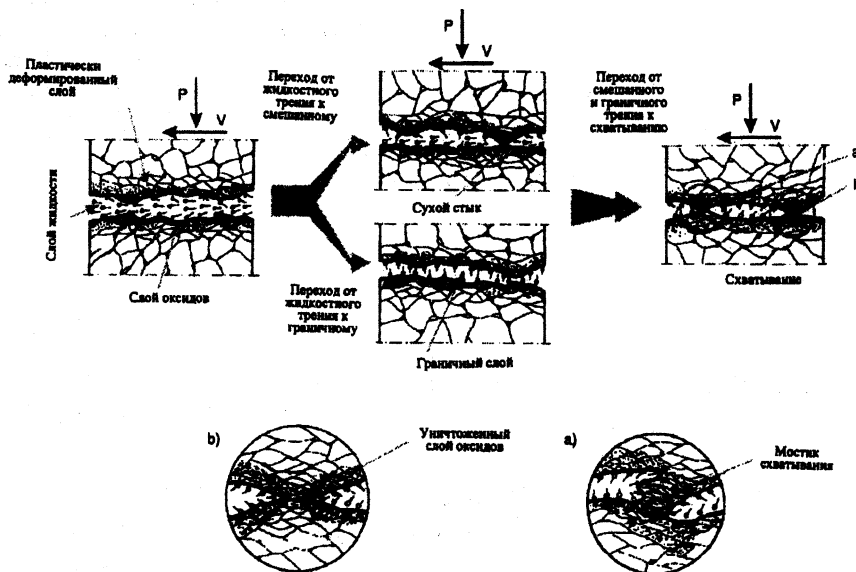


Рис. 1. Схема процесса схватывания пары трения «металл – металл».

Как показали исследования [1], на процесс затирания кинематической пары оказывают влияние следующие факторы:

геометрические (микро- и макрогеометрия поверхностей контакта, деформации микро- и макрообъемов зоны контакта);

физико-химические (состав материалов пары и их химическое сродство, кристаллическое строение, вид оксидов, способ смазывания);

кинематические (тип и характер движения, скорость, время контакта);

энергетические (температура и тепловой баланс в микро- и макрообъемах контакта).

Кроме указанных выше одним из показателей, оказывающих влияние на затирание трущихся поверхностей, является строение и состояние поверхностного слоя. Учитывая это обстоятельство, детали машин, работающие в условиях изнашивания и схватывания, подвергаются поверхностной термической, термохимической, лезвийной, пластической обработкам.

Одним из технологических способов целенаправленного формирования свойств поверхностного слоя является поверхностное пластическое деформирование (ППД). В результате возникновения локальных пластических деформаций происходит изменение физического состояния поверхностного слоя: снижение шероховатости поверхности, измельчение микроструктуры, повышение твердости и степени упрочнения, образование сжимающих внутренних напряжений [2].

Влияние способа обработки (шлифование, ППД) на трибологические свойства поверхностей рассмотрено в [3, 4] и др. Эти исследования показали, что в случае сухого трения лучшие свойства поверхностей можно получить путем ППД. В [5] установлено, что обработка ППД по сравнению со шлифованием положительно влияет на сопротивление схватыванию. Следует, однако, отметить, что указанные исследования проводились на углеродистых сталях, тогда как применительно к сопротивлению схватыванию чугуна такие сведения отсутствуют.

Целью данных исследований был анализ сопротивления схватыванию серого чугуна, обработанного ППД (накатка роликом), в условиях трения скольжения. Для сравнения рассматривалась традиционная обработка – шлифование. Как параметр, характеризующий схватывание, использовалось время работы узла трения от момента прекращения подачи масла в зону трения до момента достижения критической температуры в узле равной 145°C . Эта температура определена экспериментально и приводит к потере вязкости масла, химическому и физическому разложению присадок, содержащихся в масле, в результате чего происходит переход к сухому трению, вызывая быстрое возрастание крутящего момента и температуры в зоне трения и уничтожение трущихся поверхностей, т.е. схватывание.

Исследования выполнялись на сфероидальном ферритном чугуне (94% феррита и 6% перлита) с составом 3,15% С, 3,47% Si, 0,51% Mn, 0,10% P, 0,023% S. Механические характеристики: HB 205...215, $\sigma_b = 595$ МПа, $HV = 2040$ МПа. Накатывание роликом выполнялось на токарном станке с использованием специально разработанного приспособления; диаметр ролика 60 мм, радиус кривизны 20 мм; радиальная сила 1000, 3000, 4000 и 5000 Н; подача 0,23 мм/об; число проходов 2.

Обработка выполнялась при подаче в зону деформации смеси керосина и машинного масла М10 в отношении 1 : 1. Перед накаткой поверхности были проточены для обеспечения шероховатости поверхности $Ra = 1,5...2,7$ мкм. Для сравнения

использовались шлифованные образцы с шероховатостью $Ra=0,53$ мкм (близкой к сформированной после накатки). Микрофотографии обработанных поверхностей представлены на рис. 2, а их свойства – в табл. 1.

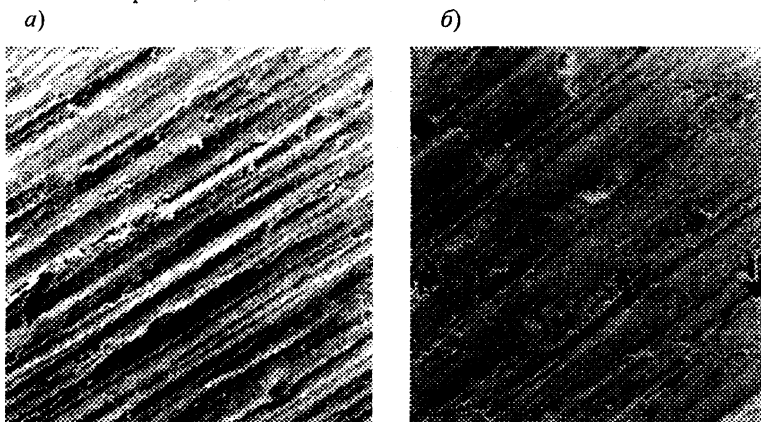


Рис. 2. Поверхности образцов из ферритного сфероидального чугуна: а – после шлифования (видны следы обработки и субмикронеровности поверхности); б – после накатывания роликом с радиальной силой 4000 Н (видны следы обработки и выделения графита); $\times 200$.

Таблица 1.

Свойства поверхностного слоя образцов
из сфероидального чугуна после шлифования и накатывания

Способ обработки	Свойства поверхностного слоя				
	Ra , МПа	t_{20} , %	t_{50} , %	ϵ , %	$\sigma_1 + \sigma_2$, МПа
ППД, $P=1000$ Н	0,51	14	43	5...21	–(289...667)
ППД, $P=3000$ Н	0,46	21	62	30...55	–(269...969)
ППД, $P=4000$ Н	0,36	38	80	33...66	–(316...968)
ППД, $P=5000$ Н	0,42	6	29	36...55	(342...1072)
Шлифование	0,53	9	27	5...26	(289...393)

Исследования сопротивления схватыванию проводились на специальном приспособлении [2]. При этом имелась возможность исследования одновременно двух пар трения с точной регистрацией момента и пути трения и температуры в зоне трения. Условия трения: скорость 2,3 м/с; давление 1,64 МПа; смазочный материал – масло SELEKTOL 20W/40; материал контртела – бронза ВК 331. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Образцы после накатки по сравнению со шлифованными характеризуются более высоким сопротивлением схватыванию. В диапазоне радиальных сил 1000...4000 Н сопротивление схватыванию растет пропорционально силе. При $P = 5000$ Н наблюдается снижение сопротивления схватыванию по сравнению с $P = 4000$ Н. В этом случае происходит разрушение поверхностных слоев вследствие превышения критических напряжений, растет шероховатость поверхности, снижается относительная опорная поверхность, возникают микротрещины и отслаивание металла. Таким образом, оптимальной с точки зрения сопротивления поверхностей схватыванию является уровень радиальных сил накатывания 4000 Н.

Таблица 2.

Влияние способа обработки и радиальной силы накатывания на время до схватывания трущихся поверхностей

Способ обработки	Время до схватывания, мин
ППД, $P=1000$ Н	24
ППД, $P=3000$ Н	28
ППД, $P=4000$ Н	38
ППД, $P=5000$ Н	34
Шлифование	15

Накатывание роликом обеспечивает большее сопротивление схватыванию по сравнению со шлифованием (соответственно 15 и 38 мин), что непосредственно связано с состоянием поверхностного слоя образцов. Как следует из табл. 1, образцы, подвергнутые накатыванию по сравнению со шлифованными характеризуются меньшей шероховатостью, большей относительной опорной поверхностью, большим упрочнением ϵ и более высоким уровнем сжимающих напряжений. После шлифования в поверхностном слое глубиной до 100 мкм наблюдаются и растягивающие и сжимающие напряжения, а при обкатывании – только сжимающие. Немаловажна также геометрическая структура поверхности. После шлифования (рис. 2, а) она характеризуется очень острыми неравномерными микронеровностями, на которых имеются субмикронеровности, действующие в процессе взаимодействия поверхностей как абразивные частицы. В то же время после накатывания поверхность характеризуется более однородной структурой (рис. 2, б), а ее контур имеет большие радиусы округления и больший угол наклона микронеровностей, что обуславливает меньшие величины удельных сил.

Следует особо подчеркнуть влияние сфероидального графита. Незначительно деформированный в процессе накатывания графит, расположенный непосредственно под поверхностью, может быть частично или полностью выкрошен, либо выступить над металлической поверхностью. В случае выкрашивания кратеры являются емкостями для смазочного вещества, а если графит выступает над поверхно-

стью – то сам является смазкой. Обкатанная поверхность по сравнению со шлифованной содержит значительно больше выделений графита. В связи с этим по-разному протекает процесс затирания на этих поверхностях.

На рис. 3 показан типичный вид следов схватывания накатанной поверхности. Значительные площади схватывания в виде частиц материала контртела (бронзы) размещены практически по всей поверхности трения, независимо от мест выделения графита. Заметны микротрещины как эффект превышения критических давлений в зонах фрикционных контактов. Вблизи выделений графита заметны поверхностные налипсы.

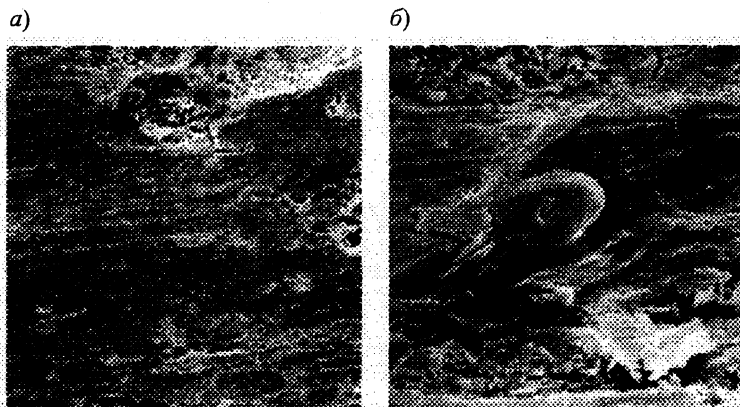


Рис. 3. Поверхности образцов из ферритного сфероидального чугуна, подвергнутых накатыванию роликом с радиальной силой 4000 Н после изнашивания (видны микротрещины вокруг выделений графита и следы адгезионного схватывания): а – $\times 500$; б – $\times 2000$.

Как показали исследования процесса схватывания, вследствие высоких давлений и температур и связанного с этим значительного сближения трущихся поверхностей в зонах контакта возникают адгезионные связи. Результатом такого взаимодействия поверхностей являются налипание одного металла на другой: материал меньшей твердости (бронза) налипает на металл большей твердости (чугун). Возникновение налипов свидетельствует, что прочность адгезионных связей выше прочности как минимум одного из трущихся металлов, а разрыв связей происходит в поверхностном слое металла меньшей прочности, а не вдоль поверхности контакта.

Разрушение мостиков схватывания – сложный процесс. Можно выделить несколько его этапов. Сначала при достижении достаточной толщины налипов (в результате многократных взаимных перемещений трущихся поверхностей) происходит многократное их пластическое деформирование (расплющивание и размазывание). Возникающие пластические деформации налипов

приводят к их упрочнению. Это продолжается до момента превышения критического уровня пластических деформаций. После этого уменьшаются силы сцепления, прочность адгезионных связей, что приводит к отделению части или всего налива от исходного материала. Отделенные частицы перемещаются в другое место, где происходит их повторное налипание на трущиеся поверхности. Интенсивность и вид вторичного налипания зависит от твердости пластически деформированных и упрочненных налипов. Это могут быть вдавливание в поверхность или царапание поверхности детали меньшей твердости. В результате постоянно происходящее образование и разрушение налипов приводит к повреждениям рабочих поверхностей узла трения, т.е. снижению времени и надежности работы машин.

Таким образом, сопротивление схватыванию зависит от технологии обработки поверхности, и особенно – от характеристик поверхностного слоя (шероховатости, упрочнения, внутренних напряжений). Обкатка поверхности по сравнению со шлифованием обеспечивает повышение сопротивления схватыванию на 150%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gierzynska M. Koństyтуowanie warstwy wierzchniej systemu tribologicznego/ Materiały VIII Symposium Tribologicznego. – Poznań: Politechnika, 1977. – 334 s.
2. Laber St. Analiza współzależności pomiędzy stanem warstwy wierzchniej a właściwościami użytkowymi żeliwnych elementów maszyn obrabianych nagniataniem. Zielona Góra: WSInż., 1985. – 163 s.
3. Школьник И.М., Шахов В.И. Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием. М.: Машиностроение, 1964. – 134 с.
4. Филяев А.Т. Исследование износостойкости сталей, упрочненных наклепом. – Мн.: Наука и техника, 1974. – 148 с.
5. Nakonieczny A., Sieckla T. Wpływ powierzchniowej obróbki plastycznej normalizowanej stali 45 na odporność przeciw zatarciu // Metaloznawstwo i Obróbka Ciepłna. – 1974. – № 7. – S. 25 – 31.

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НА ПК АНАЛИТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ В КУРСЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Бурное развитие вычислительной математики и ее программной реализации на персональных компьютерах (ПК) привели к созданию принципиально новых систем аналитических вычислений (САВ) и интегрированных пакетов программ, лучшими из которых стали REDUCE, DERIVE, MathCad, Maple, MatLab и Mathematica. Они снимают с инженера весьма трудоемкие задачи составления или поиска алгоритмов и программ расчетов, их отладку и тестирование.

Система REDUCE предоставляет удобные возможности для автоматического и контролируемого упрощения выражений, преобразования символьных матричных выражений, определения новых функций и расширения синтаксиса программ. Следует отметить ее удивительную простоту и фантастические возможности работы с матрицами, что удобно использовать как в кинематике, так и при решении систем линейных алгебраических уравнений задач статики, что будет рассмотрено ниже. Для перехода от обычного численного определения реакций связей к получению аналитических зависимостей влияния на них различных факторов (вариации нагрузки, геометрических параметров задачи и т.п.) нужно просто не задавать их значения, записав величины нагрузок и тригонометрические функции углов в символьном виде (силы P , F , $\cos\varphi$ и т.п.).

Эта особенность REDUCE позволяет проводить исследование, достойное курсовой работы, над любой задачей, причем его трудоемкость для студента при этом практически не возрастает. Легкость получения нужных функциональных зависимостей в аналитической форме просто поражает. Ведь для их определения ранее нужно было выполнить исследование с трудоемкой подготовкой варьируемых данных в численном виде для каждого рассматриваемого положения, а затем мучиться над обработкой большого массива численных результатов [1].

DERIVE также является универсальной математической системой, ориентированной на решение весьма широкого круга математических и научно-технических задач. В то же время она более интегрирована, обладает более дружелюбным интерфейсом и большими графическими возможностями.

Системы REDUCE и DERIVE отличаются тем, что удачно сочетают возможности проведения численных и символьных вычислений с простотой и не слиш-

ком высокими требованиями к используемой технике. Это делает их незаменимыми для использования в вузах, компьютерный парк которых в основном морально устарел.

В курсе теоретической механики используются практически все основные разделы вычислительной математики: решение систем линейных алгебраических уравнений при определении реакций, интегрирование при нахождении центра тяжести или замены распределенных сил в статике, численное дифференцирование в задачах кинематики, интегрирование дифференциальных уравнений в задачах динамики. Поэтому применение САВ позволяет значительно повысить эффективность учебного процесса.

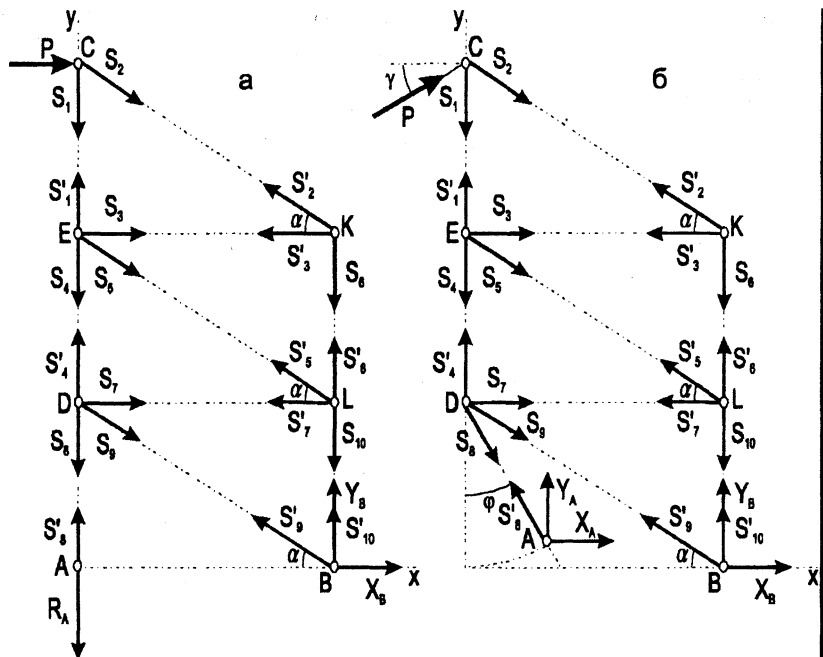


Рис. 1. Расчетная схема плоской фермы: а – исходное положение; б – вариации направления силы P и положения шарнирно-неподвижной опоры в точке A .

Покажем комплексное использование САВ на типовом примере задачи статики (С-1, [2, с. 5–12]). Исходная расчетная схема для определения усилий в стержнях плоской шарнирно-стержневой конструкции [2, с. 5–12] приведена на рис. 1, а. Для удобства исследования вариации силовых и геометрических факторов представим ее сразу в общей постановке (рис. 1, б), для чего:

• силу P покажем в произвольном положении, повернув от горизонтального положения на рис. 1а, которое будем считать начальным, против часовой стрелки на небольшой угол γ ;

• изменим положение ее левой шарнирно-неподвижной опоры в точке A , с которой связан промежуточный элемент в виде 8-го стержня, повернув его против часовой стрелки на небольшой угол φ , отсчитываемый от вертикальной оси (начального положения) против часовой стрелки (рис. 1б). Точка A при этом вместе с 8-м стержнем будет как бы совершать вращение вокруг точки D , а угол φ изменяться от 0 до 2π радиан.

Для произвольного положения плоской фермы (рис. 1б) составим по два уравнения равновесия для сил, сходящихся соответственно в узлах C, K, E, L, D, A и B , что в результате будет иметь следующий вид:

Узел С:	$\sum X_i = 0;$	1. $P \cdot \cos \gamma + S_2 \cdot \cos \alpha = 0;$	
	$\sum Y_i = 0;$	2. $P \cdot \sin \gamma - S_1 - S_2 \cdot \sin \alpha = 0;$	
Узел К:	$\sum X_i = 0;$	3. $-S_2' \cdot \cos \alpha - S_3' = 0;$	
	$\sum Y_i = 0;$	4. $S_2' \cdot \sin \alpha - S_6 = 0;$	
Узел Е:	$\sum X_i = 0;$	5. $S_3 + S_5 \cdot \cos \alpha = 0;$	
	$\sum Y_i = 0;$	6. $S_1' - S_4 - S_5 \cdot \sin \alpha = 0;$	(1)
Узел L:	$\sum X_i = 0;$	7. $-S_5' \cdot \cos \alpha - S_7' = 0;$	(1)
	$\sum Y_i = 0;$	8. $S_5' \cdot \sin \alpha + S_6' - S_{10} = 0;$	
Узел D:	$\sum X_i = 0;$	9. $S_7 + S_9 \cdot \cos \alpha + S_8 \cdot \sin \varphi = 0;$	
	$\sum Y_i = 0;$	10. $S_4' - S_8 \cdot \cos \varphi - S_9 \cdot \sin \alpha = 0;$	
Узел А:	$\sum X_i = 0;$	11. $X_a - S_8' \cdot \sin \varphi = 0;$	
	$\sum Y_i = 0;$	12. $Y_a + S_8' \cdot \cos \varphi = 0;$	
Узел В:	$\sum X_i = 0;$	13. $-S_9' \cdot \cos \alpha + X_b = 0;$	
	$\sum Y_i = 0;$	14. $S_9' \cdot \sin \alpha + S_{10}' + Y_b = 0.$	

На рис. 1 уже учтена разность направлений штрихованных и нештрихованных реакций связей для каждого стержня. Поэтому им можно присвоить один идентификатор: $S_i = S_i' = X_i$, вследствие чего соответствие идентификаторов для формализации системы уравнений (1) будет иметь вид:

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
$S_1 = S_1'$	$S_2 = S_2'$	$S_3 = S_3'$	$S_4 = S_4'$	$S_5 = S_5'$	$S_6 = S_6'$

(2)

X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
$S_7 = S_7'$	$S_8 = S_8'$	$S_9 = S_9'$	$S_{10} = S_{10}'$	X_a	X_b	Y_b	Y_a

Для удобства составления программ заменим также используемые греческие буквы для обозначения углов α, γ и φ их идентификаторами, записанными в латинской транскрипции: $\alpha = \text{ALFA}, \gamma = \text{GAMMA}, \varphi = \text{FI}$.

Перенесем свободные члены, не содержащие неизвестных, в правые части уравнений (1), которые с учетом соответствия идентификаторов (2) теперь примут следующий формализованный вид (3):

$$\begin{aligned}
1. & X_2 \cdot \cos(\text{ALFA}) = -P \cdot \cos(\text{GAMMA}) \\
2. & -X_1 - X_2 \cdot \sin(\text{ALFA}) = -P \cdot \sin(\text{GAMMA}) \\
3. & -X_2 \cdot \cos(\text{ALFA}) - X_3 = 0 \\
4. & X_2 \cdot \sin(\text{ALFA}) - X_6 = 0 \\
5. & X_3 + X_5 \cdot \cos(\text{ALFA}) = 0 \\
6. & X_1 - X_4 - X_5 \cdot \sin(\text{ALFA}) = 0 \\
7. & -X_5 \cdot \cos(\text{ALFA}) - X_7 = 0 \\
8. & X_5 \cdot \sin(\text{ALFA}) + X_6 - X_{10} = 0 \\
9. & X_7 + X_9 \cdot \cos \alpha + X_8 \cdot \sin \varphi = 0; \\
10. & X_4 - X_8 \cdot \cos \varphi - X_9 \cdot \sin \alpha = 0; \\
11. & X_{11} - X_8 \cdot \sin \varphi = 0; \\
12. & X_{14} + X_8 \cdot \cos \varphi = 0; \\
13. & -X_9 \cdot \cos(\text{ALFA}) + X_{12} = 0 \\
14. & X_9 \cdot \sin(\text{ALFA}) + X_{10} + X_{13} = 0
\end{aligned} \tag{3}$$

Для удобства пользования уравнения пронумерованы сверху вниз, начиная с 1, где номером без скобок обозначается порядковый номер строки. Теперь система уравнений (3) приобрела явный вид системы линейных алгебраических уравнений $A \cdot X = B$. В ней выписаны в символьной форме только отличные от нуля элементы, которые и вводятся в программе 1:

```

COMMENT Программа 1;
OUT "\C1\PR1.LIS";
ON NERO;
N:=13;
SA:=SIN(ALFA):=1/2;
CA:=COS(ALFA):=SQRT(3)/2;
SIN(GAMMA):=0; COS(GAMMA):=1;
SIN(FI):=0; COS(FI):=1;
P:=11;
MATRIX A(N,N), B(N,1), X(N,1);
A(1,2):=CA; A(2,1):=-1; A(2,2):=-SA; A(3,2):=-CA;
A(3,3):=-1; A(4,2):=SA; A(4,6):=-1; A(5,3):=1;
A(5,5):=CA; A(6,1):=1; A(6,4):=-1; A(6,5):=-SA;
A(7,5):=-CA; A(7,7):=-1; A(8,5):=SA; A(8,6):=1;
A(8,10):=-1; A(9,7):=1; A(9,9):=CA; A(10,4):=1;
A(10,8):=-COS(FI); A(10,9):=-SA; A(11,8):=-SIN(FI);
A(11,11):=1; A(13,9):=-CA; A(13,12):=1;
A(14,9):=SA; A(14,10):=1; A(14,13):=1;
A(9,8):=SIN(FI); A(12,8):=COS(FI); A(12,14):=1;
B(1,1):=-P*COS(GAMMA); B(2,1):=-P*SIN(GAMMA);
OFF NERO;
X:=A**(-1)*B;

```

SHUT "\Cl\PR1.LIS";

95

END;

99

Результаты работы программы 1 совпадают с приведенным в [2, с. 12] численным решением типового примера задания С-1 и для экономии места не приводятся. Студент должен сравнить результаты работы своей программы с измененными операторами 20–55 с обычным аналитическим решением своей задачи. Проверив таким образом правильность работы программы, легко перейдем к получению символьных решений.

Для исследования влияния вариации угла поворота силы на значения реакций опор и усилий нужно в программе 1 только изменить предложение 25, очистив имена со скобками SIN(GAMMA) и COS(GAMMA), идентифицирующие тригонометрические функции, командой CLEAR:

CLEAR SIN(GAMMA),COS(GAMMA);

25

Теперь они будут рассматриваться в качестве свободных переменных, в функциях от которых будет получено решение. В результате работы такой измененной программы 1 мы получим значения реакций опор и усилий в стержнях плоской конструкции в зависимости от вариации направления постоянной по модулю силы P , определяемого изменением угла γ (рис. 1, б):

$$X(1,1):= \frac{11 * (\cos(\gamma) + \sqrt{3} * \sin(\gamma))}{\sqrt{3}}$$

$$X(2,1):= - \frac{22 * \cos(\gamma)}{\sqrt{3}} \quad X(3,1):= 11 * \cos(\gamma)$$

$$X(4,1):= \frac{11 * (2 * \cos(\gamma) + \sqrt{3} * \sin(\gamma))}{\sqrt{3}}$$

$$X(5,1):= - \frac{22 * \cos(\gamma)}{\sqrt{3}} \quad X(6,1):= - \frac{11 * \cos(\gamma)}{\sqrt{3}}$$

$$X(7,1):= 11 * \cos(\gamma)$$

(4)

$$X(8,1):= \frac{11 * (3 * \cos(\gamma) + \sqrt{3} * \sin(\gamma))}{\sqrt{3}}$$

$$X(9,1):= \frac{22 * \cos(\gamma)}{\sqrt{3}} - X(10,1):= - \frac{22 * \cos(\gamma)}{\sqrt{3}}$$

$$X(11,1):= \frac{11 * (3 * \cos(\gamma) + \sqrt{3} * \sin(\gamma))}{\sqrt{3}}$$

$$X(12,1) := -11 * \cos(\text{gamma}) \quad X(13,1) := \frac{33 * \cos(\text{gamma})}{\text{sqrt}(3)}$$

Нижеследующие графики, полученные путем передачи результатов через буфер обмена в DERIVE, наглядно показывают эти зависимости. Как видно из их сравнения, значения реакций опор и усилий в стержнях плоской конструкции при вращении постоянной по модулю силы P в той же плоскости изменяются по синусоидальному закону:

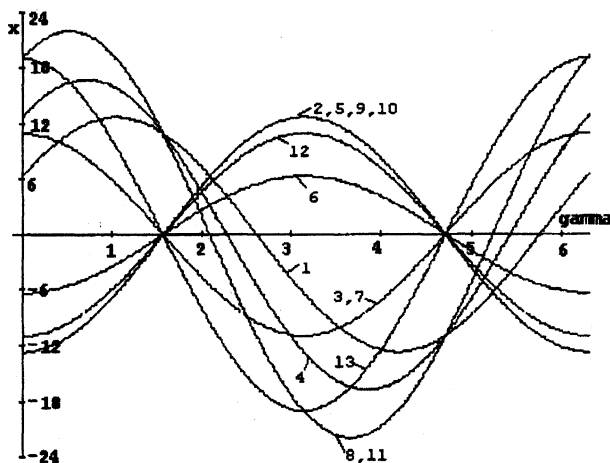


Рис. 2. Зависимости усилий в стержнях и реакций опор (X , кН) плоской конструкции (рис. 1, б) от изменения угла GAMMA (рад) при вращении силы P : 1 – $S1$, 2 – $S2$, 3 – $S3$, 4 – $S4$, 5 – $S5$, 6 – $S6$, 7 – $S7$, 8 – $S8$, 9 – $S9$, 10 – $S10$, 11 – Ra , 12 – Xb , 13 – Yb .

Изучим влияние вариации геометрических факторов рассматриваемой плоской фермы на примере изменения положения ее левой шарнирно-неподвижной опоры в точке А, определяемого углом φ (рис. 1б). Для этого в программе 1 нужно только изменить предложение 27, очистив имена со скобками $\text{SIN}(\text{FI})$ и $\text{COS}(\text{FI})$, идентифицирующие тригонометрические функции, командой **CLEAR**:

CLEAR SIN(FI), COS(FI);

27

В результате работы такой измененной программы 1 мы получим значения усилий в стержнях плоской конструкции в зависимости от вариации положения ее левой шарнирно-неподвижной опоры (рис. 1, б):

$$X(1,1) := \frac{11 * (\text{sqrt}(3) * \cos(\text{fi}) - \sin(\text{fi}))}{3 * \cos(\text{fi}) - \text{sqrt}(3) * \sin(\text{fi})} \quad X(2,1) := - \frac{22 * (\text{sqrt}(3) * \cos(\text{fi}) - \sin(\text{fi}))}{3 * \cos(\text{fi}) - \text{sqrt}(3) * \sin(\text{fi})}$$

$$\begin{aligned}
X(3,1) &:= 11 & X(4,1) &:= \frac{22*(\sqrt{3}*\cos(\varphi) - \sin(\varphi))}{3*\cos(\varphi) - \sqrt{3}*\sin(\varphi)} \\
X(5,1) &:= -\frac{22*(\sqrt{3}*\cos(\varphi) - \sin(\varphi))}{3*\cos(\varphi) - \sqrt{3}*\sin(\varphi)} & X(6,1) &:= -\frac{11*(\sqrt{3}*\cos(\varphi) - \sin(\varphi))}{3*\cos(\varphi) - \sqrt{3}*\sin(\varphi)} \\
X(7,1) &:= 11 & X(8,1) &:= \frac{33}{\sqrt{3}*\cos(\varphi) - \sin(\varphi)} \quad (5) \\
X(9,1) &:= -\frac{22*(\sqrt{3}*\cos(\varphi) + 2*\sin(\varphi))}{3*\cos(\varphi) - \sqrt{3}*\sin(\varphi)} & X(10,1) &:= -\frac{22*(\sqrt{3}*\cos(\varphi) - \sin(\varphi))}{3*\cos(\varphi) - \sqrt{3}*\sin(\varphi)} \\
X(11,1) &:= -\frac{33*\sin(\varphi)}{\sqrt{3}*\cos(\varphi) - \sin(\varphi)} & X(12,1) &:= -\frac{11*(\sqrt{3}*\cos(\varphi) + 2*\sin(\varphi))}{\sqrt{3}*\cos(\varphi) - \sin(\varphi)} \\
X(13,1) &:= \frac{33*\cos(\varphi)}{\sqrt{3}*\cos(\varphi) - \sin(\varphi)} & X(14,1) &:= -\frac{33*\cos(\varphi)}{\sqrt{3}*\cos(\varphi) - \sin(\varphi)}
\end{aligned}$$

Нижеследующие графики на рис. 3, построенные системой DERIVE после получения через буфер обмена результатов (5), наглядно показывают эти зависимости. Как видно из их сравнения, значения усилий в стержнях плоской конструкции при изменении положения опоры в той же плоскости изменяются немонотонным образом. При значениях $\varphi = \pi/3$ и $\varphi = 4\pi/3$ конструкция находится в неустойчивом положении. При этих значениях угла φ происходит потеря равновесия и устойчивости конструкции, что математически находит свое отражение в стремлении к бесконечности соответствующих реакций, в выражениях для которых при $\varphi = \pi/3$ или $\varphi = 4\pi/3$ происходит деление на 0. Это очень хорошо видно на графиках зависимости значений реакций стержней 1–10 и опор 11–14 от величины угла φ , построенных по соотношениям (5).

Смущающим здесь является то обстоятельство, что постоянных значений в ответах (5) только два ($S_3=S_7$), а прямых линий на рис. 3 – восемь (еще для S_1 , $S_2=S_5=S_{10}$, S_4 и S_6). REDUCE обладает широкими возможностями преобразования выражений, но использование самых разнообразных флагов и различное представление выражений не дает ответа на возникший вопрос.

Парадальное решение этой задачи в системе DERIVE, обладающей удивительной способностью максимального упрощения выражений, сразу дает для указанных значений реакций постоянные величины:

$$S_1 = \frac{11\sqrt{3}}{3}, S_2=S_5=S_{10} = -\frac{22\sqrt{3}}{3}, S_4 = \frac{22\sqrt{3}}{3}, S_6 = -\frac{11\sqrt{3}}{3} \quad (6)$$

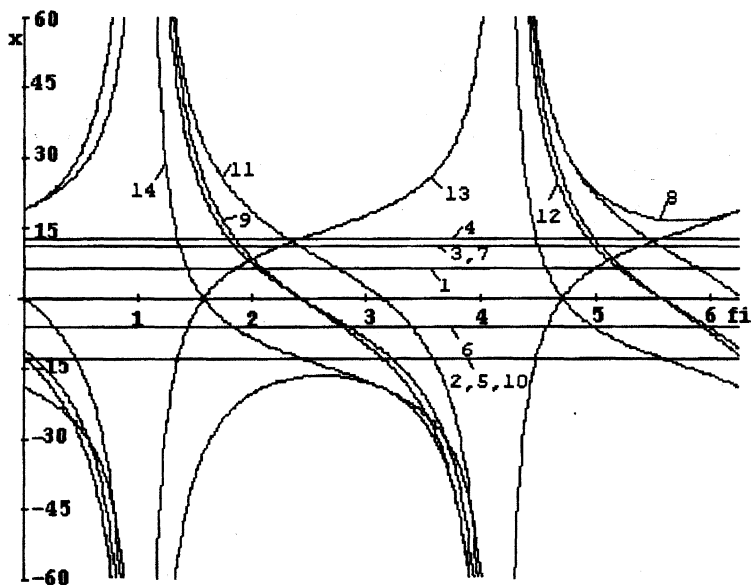


Рис. 3. Зависимости усилий в стержнях и реакций опор (X , кН) плоской конструкции (рис. 1, б) от вариации положения шарнирно-неподвижной опоры в точке А, определяемом углом FI (рад): 1 – S_1 , 2 – S_2 , 3 – S_3 , 4 – S_4 , 5 – S_5 , 6 – S_6 , 7 – S_7 , 8 – S_8 , 9 – S_9 , 10 – S_{10} , 11 – X_a , 12 – X_b , 13 – Y_b , 14 – Y_a .

Эти же постоянные значения получаются при упрощении соответствующих выражений для S_1 , $S_2=S_5=S_{10}$, S_4 и S_6 из (5), переданных в DERIVE через буфер обмена.

Так совместное использование систем REDUCE и DERIVE существенно повышает их достоинства. Дополнение их текстовым процессором типа Word организует рабочее место исследователя для студента и инженера, сравнимое с самыми сложными современными интегрированными пакетами, весьма дорогостоящими и требовательными к аппаратным возможностям ПК.

Отметим, что рассмотренные типовые примеры были использованы ранее в работе [3] при описании специализированных и универсальных программ, реализующих численные методы. Последнее обстоятельство организует комплексное обучение практическому применению численно-аналитических методов при изучении курса теоретической механики.

Разработанные современные САВ отражают достижения информационной революции, на несколько порядков увеличивая интеллектуальные возможности любого человека. При их освоении возникает ощущение, что ваши способности к точным

наукам многократно возрастают. Поэтому использование САВ способно совершить революцию в высшем образовании, для чего нужна соответствующая методическая проработка различных аспектов их использования в учебном процессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гецевич Э.Г., Ершов Г.Ф., Носов В.М., Тавгень И.А. Расчет элементов статически определимых конструкций с применением ЭВМ: Учебно-метод. пособие к курсовой работе по теоретической механике для студентов спец. Т.19.01 – "Промышленное и гражданское строительство" / Под ред. А.В.Чигарева. – Мн.: БГПА, 1996. – 175 с. 2. Сборник заданий для курсовых работ по теоретической механике: Учеб. пособие для техн. вузов / [Яблонский А.А., Норейко С.С., Вольфсон С.А. и др.; Под ред. А.А. Яблонского]. – 3-е изд. – М.: Высш. шк., 1978. 3. Носов В.М. Программирование на персональных ЭВМ задач теоретической механики. – Мн.: Технопринт, 1997. – 386 с.

УДК 621.762.4:539

В. А. Сидоров, А. А. Хмелев

ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УПЛОТНЕНИЯ АМОРФНЫХ И МЕЛКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Белорусская Государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В последние годы ведутся интенсивные исследования в области получения быстрозакаленных материалов из жидкого состояния, включая аморфные металлические материалы (АММ).

Особенностью получения аморфных и мелкокристаллических сплавов из жидкого состояния является высокая скорость охлаждения для фиксации метастабильных состояний, что требует малых геометрических размеров частиц хотя бы в одном направлении. Вследствие этого аморфные сплавы могут быть получены только в форме пленок, тонких фольг, лент и в виде порошка.

В связи с этим большое значение придается развитию методов получения аморфных и мелкокристаллических сплавов в виде массивных образцов. Для получения массивных аморфных образцов перспективными являются методы порошковой металлургии, такие как теплое изостатическое прессование [1], экструдирование [2], холодное и теплое прессование в прессформах [3] и ряд других.

Однако развитие методов наталкивается на серьезные трудности – температурный интервал реализации механизма гомогенного течения достаточно узок. Кроме того, в процессе компактирования аморфный сплав не должен кристаллизироваться.

Для успешного применения и развития методов изготовления объемных изделий из аморфных металлических порошков необходимо определить область параметров (время, температура, давление), при которых может быть достигнута требуемая плотность компакта из конкретного сплава при сохранении его аморфного состояния. Установить оптимальные режимы компактирования опытным путем чрезвычайно сложно. Поэтому важное значение может иметь теоретический анализ процессов прессования.

В данной работе предложена новая деформационная модель уплотнения аморфных и мелкокристаллических материалов.

Для выбора модели уплотнения, позволяющей оценить приращение плотности за счет пластического деформирования частиц (без учета межчастичного проскальзывания на стадии фиксации контактов) рассмотрим закономерности изменения их контактных площадок в процессе компактирования.

Из анализа напряженного состояния материала в зоне контакта частиц предположим, что материал в процессе течения испытывает интенсивный сдвиг и гидростатическое сжатие. Пластическое деформирование реализуется за счет сдвиговых деформаций ($I_2 D_G : I_2 D_E; T = \Lambda$).

При холодном деформировании наибольшее влияние на предельную пластичность оказывает схема напряженного состояния (схема деформации), которая оценивается показателем напряженного состояния (ПНС), равным обычно некоторой комбинации инвариантов тензора и девiatora напряжений.

Примем показатель напряженного состояния, предложенный в [4], который учитывает влияние гидростатического напряжения на пластичность.

$$K = \sigma^* = \frac{I_1(T_0)}{3\sqrt{I_2(I D_0)}} = \frac{\sigma_0}{T} \quad (1)$$

В качестве рабочей гипотезы примем, что относительное контактное сечение $\alpha = S_K / S_H$ (где S_K – контактное сечение в рассматриваемый момент уплотнения; S_H – номинальное сечение прессовки) принимает положительную скалярную величину, которая монотонно возрастает при увеличении деформации сдвига Λ . Причем при отсутствии пластической деформации ($\Lambda = 0$) $\alpha = 0$ и при относительной плотности прессовки $\vartheta = \vartheta_{\text{компактное}}$ ($\Lambda = 1$) $\alpha = 1$.

Представим эту функцию в виде:

$$\alpha = \alpha(\Lambda, \sigma^*, \theta^0, \Lambda \dots), \quad (2)$$

где: Λ – деформация сдвига;

σ^* – показатель напряженного состояния;

θ^0 – гомологическая температура;

$\dot{\Lambda}$ – скорость деформации сдвига.

Тогда для относительного контактного сечения получим дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{d\alpha}{d\Lambda} = \frac{\partial \alpha}{\partial \Lambda} + \frac{\partial \alpha}{\partial \sigma^*} \frac{d\sigma^*}{d\Lambda} + \frac{\partial \alpha}{\partial \theta^0} \frac{d\theta^0}{d\Lambda} + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{\Lambda}} \frac{d\dot{\Lambda}}{d\Lambda} \quad (3)$$

Ввиду отсутствия достаточно надежных данных о зависимости градиента ПНС от деформации положим $\partial \sigma^* / \partial \Lambda = 0$, третий член при рассмотрении процесса изотермическим можно положить равным нулю. При малых скоростях деформации, обычно для процессов обработки металлов давлением, четвертым членом можно пренебречь. Тогда на относительное контактное сечение основное влияние оказывает первый член уравнения (3). Основываясь на преобладающем влиянии на относительное контактное сечение α роста линейных размеров площадок контакта при пластическом деформировании, кинетическое уравнение зададим в виде дифференциального закона:

$$\frac{d\alpha}{d\Lambda} = n\Lambda^a, \quad (4)$$

где: Λ – степень деформации сдвига, накопленная в данном объеме частицы материала к текущему моменту деформирования;

$a = a(\sigma^*, \theta^0 \dots)$ – некоторая физическая константа материала, зависящая от термомеханических параметров нагружения;

n – нормирующий множитель, смысл которого состоит в нормировании значений функции $\alpha(\Lambda, a)$, так чтобы ее значение находилось в ранее принятом интервале $0 \leq \alpha \leq 1$.

Физический смысл гипотезы в том, что скорость приращения контактного сечения, полученного за некоторый промежуток, пропорциональна степени деформации сдвига, накопленной к рассматриваемому моменту деформирования.

Из кинетического уравнения (4) получим выражение для контактного сечения через накопленную деформации сдвига:

$$\alpha = \int_0^{\Lambda} n\Lambda^a d\Lambda \leq 1. \quad (5)$$

Считаем, что степенной показатель a не зависит от деформации, решение уравнения произведем при следующих граничных условиях:

а) при относительной плотности V равной плотности насыпки ϑ_0 (или предварительное уплотнение), т.е. $\vartheta = \vartheta_0 : \Lambda = 0 : \alpha = 0$;

б) при достижении предельной плотности V равной плотности компактного материала $\vartheta = \vartheta_k$ деформация достигает своего предельного значения – предельной пластичности: $\vartheta = \vartheta_k : \Lambda = \Lambda_{\text{пред}}$, а $\alpha_{\text{пред}} = 1$.

После интегрирования имеем:

$$\alpha = \frac{n}{1+a} \Lambda^{a+1} + c, \quad (6)$$

с учетом граничных условий из уравнения (6) определим нормирующий множитель

$$n = \frac{1+a}{\Lambda_{\text{пред}}^{a+1}}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6) получим уравнение определяющее зависимость контактного сечения от деформации сдвига:

$$\alpha = \left[\frac{\Lambda(\sigma^*)}{\Lambda_{\text{пред}}(\sigma^*)} \right]^{1+a(\sigma^*)}, \quad (8)$$

где $\Lambda_{\text{пред}}(\sigma^*) = \Lambda_{\text{пред}}(\sigma/T)$ – предельная степень деформации материала частиц, накопленная к моменту разрушения их при заданном показателе напряженного состояния и определяемая, например, по методике изложенной в работе [4]. Так, в диапазоне изменения $-1,0 \leq \sigma/T \leq 1,5$, $\Lambda_{\text{пред}}$ можно аппроксимировать гиперболической кривой вида:

$$\Lambda_{\text{пред}} = \frac{\Lambda_{\text{кр}}}{1 + \sqrt{3} \frac{\Lambda_{\text{кр}} - \Lambda_p}{\Lambda_p} \frac{\sigma}{T}}, \quad (9)$$

где: $\Lambda_{\text{кр}}$ – предельная пластичность материала частиц при кручении, когда $\sigma/T=0$;
 Λ_p – предельная пластичность материала частиц при равномерном растяжении, когда $\sigma/T=1/\sqrt{3}$.

Уравнение (8) справедливо для монотонного деформирования, когда условия деформации остаются постоянными. При переходе от одного вида нагружения к другому, с другими условиями деформирования, возникает вопрос: «Как суммировать приращение контактного сечения?»

Накопление приращения α на заданном этапе нагружения производится от уже достигнутого уровня контактного сечения, полученного на предшествующем этапе нагружения с отличными от первого этапа термомеханическими параметрами, а суммирование контактных сечений различных этапов нагружения производится на основе принципа суперпозиции. Следовательно, на каждом этапе нагружения или

деформирования, накопление относительного контактного сечения имеет нелинейный характер, но суммирование α различных этапов производится линейно.

$$\alpha = \sum_{i=1}^m \alpha_i = \sum_{i=1}^m \int_0^{\Lambda} n_i \Lambda^{\alpha_i} d\Lambda = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\Lambda_i(\sigma_i^*)}{\Lambda_{пред.i}(\sigma^*)} \right]^{1+\alpha_i(\sigma_i^*)} \leq 1, \quad (10)$$

где m – число этапов деформирования с разными термомеханическими параметрами.

Рост контактного сечения по уравнению (8) при монотонном деформировании представляет собой параболу степени $(1+\alpha)$ от деформации, которая приведена на рис. 1. Кривые 1, 2, 3 соответствуют процессу накопления контактного сечения при различных схемах напряженного состояния. Они пересекают предельную прямую $\alpha_{пред.}=1$ в точках А, В, С, абсциссы которых равны предельной пластичности $\Lambda_{пред.1}$, $\Lambda_{пред.2}$ и $\Lambda_{пред.3}$.

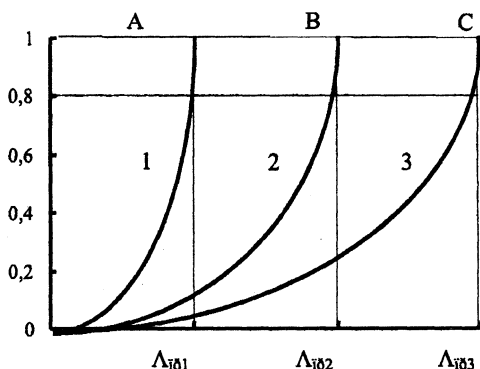


Рис. 1. Рост функции приращения контактного сечения при монотонном деформировании (по оси абсцисс – Λ , по оси ординат – α).

Влияние схемы напряженного состояния (схемы деформирования) на рост контактного сечения в рамках предложенной модели проявляется через две величины: $\Lambda_{пред.}(\sigma^*)$ и коэффициента $\alpha(\sigma^*, \theta^* \dots)$, который тоже зависит от термомеханических условий нагружения.

Коэффициент $\alpha(\sigma^*, \theta^* \dots)$ характеризует скорость возрастания функции контактного сечения при увеличении пути деформирования и ее нелинейности. Назовем его коэффициентом нелинейности приращения контактного сечения.

Если на схеме рис. 1 проведем горизонтальную прямую $\alpha_{к_i}=0,8$, соответствующую относительному контактному сечению ($0 < \alpha_{к_i} \leq 1$), то абсциссы точек пересечения этой прямой с кривыми 1, 2, 3 зададут те степени деформации, на которые мы

должны продеформировать материал при различных схемах напряженного состояния, чтобы получить одинаковое контактное сечение (одинаковую плотность).

Следовательно, переход от одного вида нагружения (деформирования) при одном показателе напряженного состояния к другому меняет скорость роста контактного сечения, а следовательно и плотность брикета.

Таким образом, плотность брикета зависит не только от усилия прессования, но и от условий деформируемости (схемы деформации). С переходом на более жесткие схемы деформирования, т.е. с увеличением сдвиговых деформаций интенсивность уплотнения значительно повышается.

Если рассматривать $\Lambda_{\text{пред}}$ как значение начальных пределов текучести при осевом сжатии, то наибольшее напряжение, необходимое для начала пластического течения (при одинаковой стартовой плотности и свойств), имеет место при сжатии в пресс-форме. При более жестких схемах стартовые напряжения текучести уменьшаются.

Таким образом, в общем случае объемного формоизменения поверхность пластичности будет зависеть от истории деформирования, определяемой изменением показателей напряженного состояния с возрастанием накопленной интенсивности деформаций. Поверхность пластичности в этом случае не является фиксированной.

Проведенный теоретический анализ предложенной деформационной модели уплотнения аморфных и мелкокристаллических металлических сплавов позволяет предположить ряд новых высокоэффективных схем и устройств для компактирования вышеуказанных материалов, а на их базе разработать новые способы и технологии компактирования АММ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малиночка Е.Я., Дураченко А.М., Борисов В.Т. Изучение процесса компактирования металлических сплавов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1983. – № 1-С. 142–144.
2. Kawamura Y., Takagi M., Akai M. e.a. A newly developed warm extrusion technique for compacting amorphous alloy powders // Mater. Sci. Eng. – 1988–98-Р. 449–452.
3. Omuro K., Miura H., Isa S. e.a. Warm consolidation of spray-guenced amorphous Ni-Fe-based alloy powder // Mater. Sci. Eng. – 1988–98. – Р. 399–402.
4. Колмогоров В.Л. Напряжение. Деформации. Разрушение. – М., Металлургия, 1970–230 с.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Известно реологическое уравнение модели, описывающей поведение металлов при ползучести, представленное в дифференциальной форме [1].

Запишем это уравнение для произвольного слоя биметаллической полосы, параллельного поверхности соединения, для каждого металла в отдельности:

$$\left. \begin{aligned} A_1 \frac{\partial^2 \sigma_1(t, y)}{\partial t^2} + B_1 \frac{\partial \sigma_1(t, y)}{\partial t} + C_1 \sigma_1(t, y) &= D_1 \frac{\partial^2 \varepsilon_1(t, y)}{\partial t^2} + G_1 \frac{\partial \varepsilon_1(t, y)}{\partial t}, \\ A_2 \frac{\partial^2 \sigma_2(t, y)}{\partial t^2} + B_2 \frac{\partial \sigma_2(t, y)}{\partial t} + C_2 \sigma_2(t, y) &= D_2 \frac{\partial^2 \varepsilon_2(t, y)}{\partial t^2} + G_2 \frac{\partial \varepsilon_2(t, y)}{\partial t}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\sigma(t, y)$, $\varepsilon(t, y)$ – нормальное напряжение в поперечном сечении полосы и деформация, а A, B, C, D, G – коэффициенты, зависящие от реологических характеристик металлов.

Представим условие совместности деформаций на поверхности соединения металлов в виде:

$$\varepsilon_2(t, 0) = \varepsilon_1(t, 0) + (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T. \quad (2)$$

Приняв допущение о линейности распределения продольных деформаций биметаллической полосы в поперечном сечении, получим закон изменения этих деформаций в виде:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1(t, y) &= \varepsilon_1(t, 0) + k(t)y, \\ \varepsilon_2(t, y) &= \varepsilon_1(t, 0) + (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T + k(t)y, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $k(t)$ – временной коэффициент пропорциональности.

Уравнения равновесия внутренних сил, действующих в поперечном сечении полосы, представим следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{h_1} \sigma_1(t, y) dy + \int_{-h_2}^0 \sigma_2(t, y) dy &= \frac{P}{b}, \\ \int_0^{h_1} \sigma_1(t, y) y dy + \int_{-h_2}^0 \sigma_2(t, y) y dy &= \frac{M_0(\bar{P})}{b}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где P – растягивающая сила, b – ширина полосы.

Для того чтобы перейти от системы дифференциальных уравнений в частных производных (1) к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, поступим в соответствии с изложенным в [2] способом. Дважды проинтегрируем систему (1) по dy и ydy в пределах $[-h_2, h_1]$, где h_1 и h_2 – толщины слоев полосы.

Обозначим:

$$\begin{aligned} x_1 &= \int_0^{h_1} \sigma_1(t, y) dy, \quad x_2 = \int_0^{h_1} \sigma_1(t, y) y dy, \\ x_3 &= \epsilon_1(t, 0) = \epsilon_1(t), \quad x_4 = k(t). \end{aligned}$$

Далее, аналитически решив линейную систему алгебраических уравнений относительно вторых производных, получим:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 &= f_1(x_1, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, A, B, C, D, G), \\ \ddot{x}_2 &= f_2(x_2, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, A, B, C, D, G), \\ \ddot{x}_3 &= f_3(x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, A, B, C, D, G), \\ \ddot{x}_4 &= f_4(x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, A, B, C, D, G) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Дальнейшее решение задачи деформирования биметаллической полосы требует применения численных методов. Интегрирование системы дифференциальных уравнений (5) методом Эйлера позволяет определить при заданных начальных условиях скорость и величину полной деформации биметаллической полосы.

С помощью предложенного метода был выполнен численный расчет ползучести биметаллических медь-алюминиевых полос. Точность способа интегрирования системы дифференциальных уравнений (5) методом Эйлера проверялась проведением проверочного расчета по методу Рунге – Кутты. Анализ полученных результатов показал, что оба метода дают сопоставимые решения. Различие в полученных числовых значениях деформации ползучести отличаются не более чем на 3%. Однако метод Эйлера более приемлем с точки зрения меньшей трудоемкости вычислительных процедур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульман З.П., Ковалев Я.Н., Зальцгендлер Э.А. Реофизика конгломератных материалов. – Минск: Наука и техника, 1978. – 238 с. 2. Бахвалов Н.С., Панасенко. Г.П. Осреднение процессов в периодических сферах: Мат. задачи механики композиционных материалов. – М.: Наука, 1984. – 352 с.

УДК 539.3

Г. С. Соколовский

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЗУЧЕСТИ В РЕОЛОГИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЯХ СОСТОЯНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Пусть уравнение состояния имеет вид:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) + \varepsilon_3(t),$$

$$\text{где } \varepsilon_1(t) = \frac{\sigma}{\eta_2} t, \quad \varepsilon_2(t) = \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right), \quad \varepsilon_3(t) = \frac{\sigma}{E_2}. \quad (1)$$

Рассмотрим методику определения входящих в это уравнение характеристик материала: E_1, E_2, η_1, η_2 . Для этого необходимо обладать экспериментальной кривой ползучести, полученной для конкретного материала при постоянном напряжении σ (рис. 1).

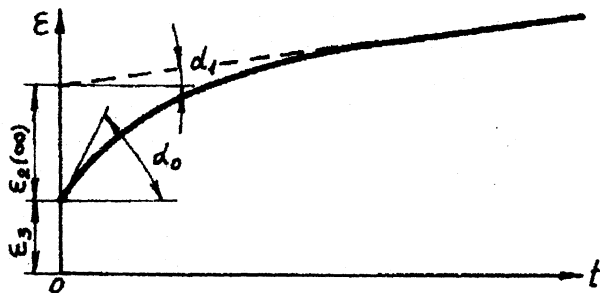


Рис. 1. Методика определения постоянных в уравнении состояния по кривой ползучести.

Упругая характеристика E_2 может быть найдена по мгновенной упругой деформации тела. Действительно, т.к.

$$\varepsilon(0) = \frac{\sigma}{E_2} = \varepsilon_3 \Rightarrow E_2 = \frac{\sigma}{\varepsilon_3},$$

где ε_3 – мгновенная упругая деформация.

Следовательно, E_2 – это модуль упругости, нахождение которого не составляет труда.

Как следует из [1], $\dot{\varepsilon}_2(t) = \frac{\sigma}{\eta_1} - \frac{\varepsilon_2(t)E_1}{\eta_1}$.

Т.к. $\varepsilon_2(0) = 0$, то $\dot{\varepsilon}_2(0) = \frac{\sigma}{\eta_1} > 0$.

Отсюда следует, что функция $\varepsilon_2(t)$ монотонно возрастает, а функция $\dot{\varepsilon}_2(t)$ монотонно убывает, причем:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\varepsilon}_2(t) = 0.$$

Следовательно, $0 = \sigma - \varepsilon_2(\infty)E_1$, или $E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_2(\infty)}$.

Максимальную величину вязко-упругой деформации $\varepsilon_2(\infty)$ можно получить, если провести касательную к участку установившейся ползучести до пересечения ее с осью ординат.

Определим вязкие характеристики материала. Из уравнения состояния следует, что:

$$\dot{\varepsilon}(\infty) = \dot{\varepsilon}_1 = \frac{\sigma}{\eta_2}.$$

А на рис.1 видно, что $\dot{\varepsilon}(\infty) = \operatorname{tg} \alpha_1$.

Следовательно, $\eta_2 = \frac{\sigma}{\operatorname{tg} \alpha_1}$.

Далее из того же исходного уравнения видно, что:

$$\dot{\varepsilon}(0) = \dot{\varepsilon}_1(0) + \dot{\varepsilon}_2(0) = \frac{\sigma}{\eta_2} + \frac{\sigma}{\eta_1}.$$

Как видно из рис. 1,

$$\dot{\varepsilon}(0) = \operatorname{tg} \alpha_0, \quad \frac{\sigma}{\eta_2} = \operatorname{tg} \alpha_1,$$

где α_1 и α_0 – углы наклона касательной к горизонтальной прямой в начале и конце стадии неустановившейся ползучести.

Тогда:

$$\eta_{II} = \frac{\sigma}{\operatorname{tg} \alpha_0 - \operatorname{tg} \alpha_1}.$$

На рис.2 сплошными линиями показаны расчетные кривые, построенные с использованием вышеприведенной методики, а штриховыми линиями – экспериментально полученные кривые.

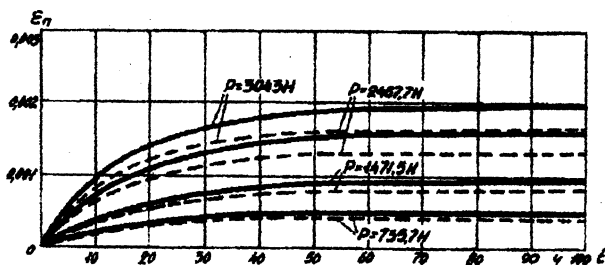


Рис. 2. Кривые ползучести биметалла МЗ-АД1 при $T=300^{\circ}\text{C}$.

Сравнительный анализ полученных результатов одноосных испытаний на ползучесть позволяет говорить о правильности выбора определяющего уравнения состояния при ползучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин О.В., Самарин Ю.Г. Ползучесть деталей машин и сооружений. – Куйбышев: Куйбышевское издательство, 1988. – 143 с.

ВЛИЯНИЕ ОТВЕРСТИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗКИ И СОБСТВЕННОГО ВЕСА

Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь

Как известно, стержни имеют очень широкое применение в виде различного рода деталей разнообразных механизмов и машин, а также в строительных конструкциях. Исследование стержней на устойчивость всегда было важной задачей. Наибольший интерес вызывает случай, когда на устойчивость стержней влияет не только нагрузка, но и собственный вес стержня, которым нельзя пренебрегать. В технике такими конструкциями могут быть разного рода печи, футерованные огнеупорными материалами.

В качестве примера решим задачу об устойчивости стержня (верхний конец свободен, нижний – зашцеилен) при одновременном действии на него сосредоточенной силы F и собственного веса (рис. 1, а).

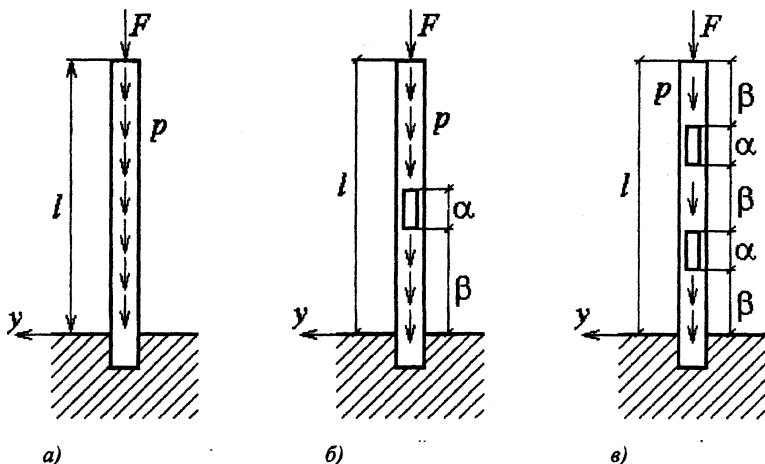


рис. 1. Одновременное действие нагрузки и собственного веса на стержень.

Обозначим силу веса, приходящуюся на единицу длины, через p . Величина p – переменная, $p=p(x)$.

Рассмотрим основное уравнение метода Бубнова – Галеркина [1]:

$$\int_0^l \left[\frac{d}{dx} \left(EI \frac{d^2 v}{dx^2} \right) + (F + R_{l-x}) \frac{dv}{dx} \right] \frac{d\eta_i}{dx} dx = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

или

$$\int_0^l \left[\frac{d}{dx} \left(EI \frac{d^2 v}{dx^2} \right) + (F + p(l-x)) \frac{dv}{dx} \right] \frac{d\eta_i}{dx} dx = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где E – модуль упругости, I – минимальный момент инерции сечения, v – изогнутая линия при потере устойчивости ($v = f_1 \eta_1 + f_2 \eta_2 + f_3 \eta_3 + \dots + f_n \eta_n$), l – длина стержня, η_i – функция от x , удовлетворяющая геометрическим граничным условиям задачи.

Уравнение упругой линии примем в виде:

$$v = f \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2l} \right). \quad (3)$$

Тогда

$$\eta = 1 - \cos \frac{\pi x}{2l}. \quad (4)$$

Подставим (3), (4) в (2), считая жесткость постоянной, проинтегрировав полученное выражение, получим:

$$\int_0^l \left[-EI \frac{\pi}{4l^2} \sin^2 \frac{\pi x}{2l} + (F + p(l-x)) \sin^2 \frac{\pi x}{2l} \right] dx = 0 \quad (5)$$

$$EI \frac{\pi^2}{4l^2} = F + \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2} \right) pl, \quad (6)$$

или

$$4 \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2} \right) pl^3 + 4Fl^2 = EI\pi^2. \quad (7)$$

Для нахождения критической длины мы должны решить уравнение (7).

Рассмотрим случай, когда стержень ослаблен одним отверстием (рис. 1,б).

Тогда, подставляя (3), (4) в (2) и учитывая, что жесткость стержня переменная, получим:

$$\int_0^{\beta} \left[-EI_1 \frac{\pi}{4l^2} \sin^2 \frac{\pi x}{2l} + (F + p_1(l-x)) \sin^2 \frac{\pi x}{2l} \right] dx +$$

$$\int_{\beta}^{\beta+\alpha} \left[-EI_2 \frac{\pi}{4l^2} \sin^2 \frac{\pi x}{2l} + (F + p_2(l-x)) \sin^2 \frac{\pi x}{2l} \right] dx +$$

$$\int_{\beta+\alpha}^l \left[-EI_1 \frac{\pi}{4l^2} \sin^2 \frac{\pi x}{2l} + (F + p_1(l-x)) \sin^2 \frac{\pi x}{2l} \right] dx = 0 \quad (8)$$

где I_1 – момент инерции сечения сплошного стержня, I_2 – момент инерции сечения стержня с отверстием, p_1 – сила веса сплошного стержня, p_2 – сила веса стержня с отверстием.

Уравнения (7) и (8) были решены с помощью ПЭВМ. Рассмотрим некоторые из полученных результатов.

Исследуем устойчивость стержня прямоугольного сечения ($a \times b$). Минимальный момент инерции сечения: $I_{\min} = \frac{a \cdot b^3}{12}$. В качестве материалов использовали:

алюминий, медь, иридий, сталь, свинец, кирпич, железо, бетон, железобетон. Сечение стержня – 2×1 (см).

Зависимость критической длины стержней, для различных материалов, от нагрузки представлена в табл. 1.

Таблица 1.

Зависимость критической длины стержня от нагрузки.

МАТЕРИАЛ	НАГРУЗКА					
	F=100 Н	F=200 Н	F=300 Н	F=400 Н	F=500 Н	F=600 Н
Иридий	380,66	301,09	255,13	224,79	203,00	186,41
Сталь	274,39	201,22	165,94	144,33	129,39	118,28
Железо	268,12	196,48	161,99	140,88	126,29	115,44
Медь	213,05	155,65	128,21	111,46	99,89	91,30
Кирпич	105,68	74,99	61,29	53,09	47,50	43,37
Алюминий	167,02	119,09	97,45	84,47	75,58	69,02
Железобетон	110,10	78,22	63,94	55,40	49,57	45,25
Свинец	78,32	56,28	46,14	40,03	35,84	32,73
Бетон	87,05	61,77	50,48	43,74	39,13	35,72

Найдем критическую длину того же стержня, но ослабленного одним отверстием (см. рис. 1, б). Отверстие выберем посередине стержня ($\beta = (l-\alpha)/2$). Длина отверстия α , сечение отверстия – 1×1 (см).

Значения критической длины стержня (в см), ослабленного одним отверстием длиной $\alpha = l/10$, приведены в табл. 2, а отверстием длины $\alpha = l/9$ – в табл. 3. При этом сосредоточенная сила изменялась от 100 Н до 600 Н.

Таблица 2.

Зависимость критической длины стержня ослабленного одним отверстием ($\alpha = l/10$), от нагрузки.

МАТЕРИАЛ	НАГРУЗКА					
	$F=100$ Н	$F=200$ Н	$F=300$ Н	$F=400$ Н	$F=500$ Н	$F=600$ Н
Иридий	376,88	295,89	249,95	219,88	198,38	182,07
Сталь	268,97	196,58	161,95	140,79	126,19	115,34
Железо	262,79	191,93	158,09	137,42	123,16	112,57
Медь	208,72	152,02	125,11	108,72	97,42	89,03
Алюминий	163,02	116,13	95,00	82,34	73,68	67,28
Железобетон	107,39	76,26	62,33	54,00	48,31	44,11
Кирпич	103,06	73,11	59,74	51,75	46,30	42,27
Бетон	84,90	60,22	49,21	42,63	38,14	34,82
Свинец	76,54	54,91	45,00	39,03	34,94	31,91

Таблица 3.

Зависимость критической длины стержня ослабленного одним отверстием ($\alpha = l/9$), от нагрузки.

МАТЕРИАЛ	НАГРУЗКА					
	$F=100$ Н	$F=200$ Н	$F=300$ Н	$F=400$ Н	$F=500$ Н	$F=600$ Н
Иридий	376,43	295,29	249,36	219,32	197,85	181,58
Сталь	268,35	196,05	161,50	140,39	125,83	115,00
Железо	262,18	191,42	157,65	137,03	122,81	112,24
Медь	208,23	151,61	124,76	108,41	97,14	88,77
Алюминий	162,56	115,80	94,73	82,10	73,46	67,08
Железобетон	107,09	76,04	62,15	53,85	48,17	43,98
Кирпич	102,77	72,90	59,57	51,60	46,16	42,15
Бетон	84,65	60,05	49,07	42,51	38,03	34,72
Свинец	76,34	54,75	44,87	38,92	34,84	31,82

Значения критической длины стержня (в см), ослабленного двумя отверстиями (рис. 1, в) длиной $\alpha = l/10$, приведены в табл. 4, а отверстиями длиной $\alpha = l/9$ – в табл. 5. При этом сосредоточенная сила изменялась от 100 Н до 600 Н. Отверстия расположены от основания стержня на расстоянии $\beta = (l-2\alpha)/3$ и на таком же расстоянии друг от друга. Геометрические параметры стержня те же, что и для одного отверстия.

Таблица 4.

Зависимость критической длины стержня ослабленного
двумя отверстиями ($\alpha = 1/10$), от нагрузки.

МАТЕРИАЛ	НАГРУЗКА					
	$F=100 \text{ Н}$	$F=200 \text{ Н}$	$F=300 \text{ Н}$	$F=400 \text{ Н}$	$F=500 \text{ Н}$	$F=600 \text{ Н}$
Иридий	370,88	289,64	244,14	214,53	193,43	177,46
Сталь	262,81	191,63	157,77	137,12	122,87	112,30
Железо	256,75	187,10	154,00	133,83	119,93	109,60
Медь	203,86	148,17	121,87	105,87	94,85	86,68
Алюминий	158,81	113,07	92,49	80,15	71,72	65,49
Кирпич	100,35	71,17	58,15	50,38	45,07	41,14
Железобетон	104,58	74,24	60,67	52,57	47,03	42,94
Бетон	82,66	58,62	47,90	41,50	37,12	33,89
Свинец	74,63	53,48	43,81	38,00	34,01	31,06

Таблица 5.

Зависимость критической длины стержня ослабленного
двумя отверстиями ($\alpha = 1/9$), от нагрузки.

МАТЕРИАЛ	НАГРУЗКА					
	$F=100 \text{ Н}$	$F=200 \text{ Н}$	$F=300 \text{ Н}$	$F=400 \text{ Н}$	$F=500 \text{ Н}$	$F=600 \text{ Н}$
Иридий	369,65	288,27	242,84	213,34	192,32	176,42
Сталь	261,44	190,52	156,83	136,29	122,13	111,61
Железо	255,41	186,01	153,08	133,02	119,20	108,93
Медь	202,78	147,30	121,14	105,23	94,27	86,15
Алюминий	157,87	112,38	91,92	79,66	71,28	65,08
Железобетон	103,95	73,78	60,30	52,24	46,74	42,67
Кирпич	99,74	70,73	57,79	50,07	44,79	40,89
Бетон	82,16	58,26	47,61	41,24	36,89	33,68
Свинец	74,20	53,16	43,55	37,77	33,80	30,87

Результаты, полученные в данной работе, позволяют прогнозировать устойчивость разнообразных стержневых конструкций, ослабленных отверстиями и находящихся под действием нагрузки и собственного веса. Полученный расчет может быть также применен для определения высоты колонн, шахтных печей и других аналогичных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука. 1967. – 984 с.
2. Кухлинг Х. – Справочник по физике. – М.: Мир, 1985. – 519 с.

ОБ УДЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ, КАК КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЕЕ КАЧЕСТВА

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Стандартные испытания на ударный изгиб до сих пор являются основным и наиболее распространенным способом оценки склонности стали к хрупкому разрушению. Этот способ позволяет получить сравнительные количественные данные о вязкости стали и определить критическую температуру хрупкости. Надежность работы материала при этом определяется по назначенной минимальной величине ударной вязкости или по значению критической температуры.

Зависимость значения ударной вязкости от температуры испытания, остроты надреза и размеров образца в сочетании с высокой скоростью деформирования при разрушении настолько усложняет напряженное и деформированное состояние, что теоретический анализ ударной вязкости до сих пор не осуществлен. Кроме того, само значение ударной вязкости представляет собой лишь значение работы разрушения образца, уменьшенное в масштабе на величину площади его сечения в надрезе.

Для определения ударной вязкости ГОСТ 9454-78 предусматривает 20 типов образцов. При этом для каждого типа образца нормативными документами при диагностировании материалов и элементов конструкций устанавливаются свои минимально допустимые ее значения.

Это позволяет сделать вывод о том, что значение ударной вязкости как браковочного критерия материалов крайне неудобно в практическом применении и требует замены или усовершенствования.

В связи с изложенным предлагается другой критерий, лишенный указанных недостатков, но сохраняющий и усиливающий назначение его как браковочного критерия. Таким критерием является величина удельной работы пластического деформирования при ударном изгибе стандартного образца a_v . Известно [1], что эта величина является константой для каждой конкретной плавки и не зависит ни от формы надреза и размеров образца, ни от температуры испытания.

Известно также [2], что между значением работы разрушения ударного образца и величиной его пластически деформированного объема существует линейная зависимость (рис. 1), если величину пластически деформированного объема опреде-

лять как функцию угла его пластического изгиба α после разрушения (рис. 2). Эта зависимость является единой для всех типов образцов данной плавки стали и не зависит от температуры испытания.

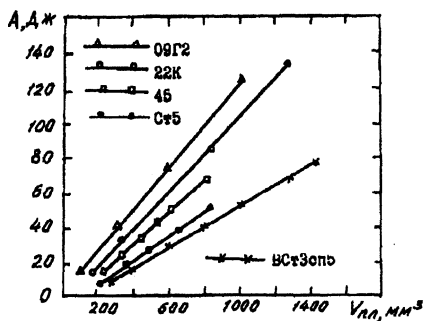


Рис. 1. Зависимость работы разрушения ударного образца от величины его пластически деформированного объема.

Если сложить половинки разрушенного после испытания образца, как показано на рис. 2, б, то значение $V_{пл}$ можно определить как «потерянный» в результате пластической деформации объем в виде клина в центральной части образца по формуле:

$$V_{пл} = bh_1^2 \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

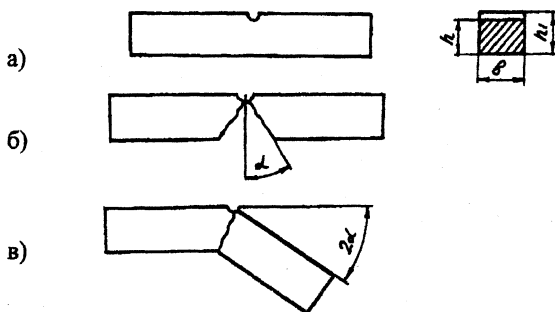


Рис. 2. Ударный образец до испытания (а), после испытания (б), в положении для определения угла изгиба α (в).

Значение угла α удобно определять графически. Для этого обе половинки разрушенного образца укладывают на миллиметровую бумагу и совмещают, как по-

казано на рис. 2, в. Очертив по периметру совмещенные половинки образца, получаем удвоенное значение искомой величины.

При вязких разрушениях образцов в зоне надреза имеет место деформация растяжения по всей высоте сечения на длине l_p . Объем такой зоны равен:

$$V_{\text{м}} = l_p b h, \quad (2)$$

где l_p — длина пластически растянутой зоны;

b, h — ширина и высота образца в сечении по надрезу (рис. 2, а).

Для наиболее распространенных образцов ширина надреза равна 2 мм (ГОСТ 9454-78, тип 1). Тогда значение $V_{\text{пл}}$ с учетом (2) получит вид:

$$V_{\text{м}} = b h l_1^2 \operatorname{tg} \alpha + l_p b h. \quad (3)$$

Тогда значение удельной работы пластического деформирования образца при ударном изгибе будет равно:

$$a_v = \frac{A}{b h \left(\frac{h_1^2}{h} \operatorname{tg} \alpha + l_p \right)} = \frac{a_v}{\frac{h_1^2}{h} \operatorname{tg} \alpha + l_p} = \text{const}, \quad (4)$$

где $a_v = \frac{A}{b h}$ — ударная вязкость.

Для случаев хрупких разрушений, когда значение ударной вязкости не превышает 0,2 МДж/м², значением l_p в формулах (3), (4) можно пренебречь.

Поскольку a_v является константой для каждой конкретной плавки стали и не зависит от формы надреза и размеров образца, то следует нормировать этот показатель, а не ударную вязкость, как браковочный критерий качества стали. Это позволит расчетным путем оценивать переход стали в хрупкое состояние. Отпадает необходимость экспериментального определения ударной вязкости после деформационного старения, применяемого для большого объема конструкций. Отпадает необходимость применения двадцати типов образцов, так как значение a_v можно определять на самом простом из них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданович Г.М., Хмелев А.А. О диаграмме хрупковязкого состояния малоуглеродистых сталей при ударном изгибе // Проблемы прочности. — 1981. — №1. — С. 85–89.
2. Жданович Г.М., Хмелев А.А. О взаимосвязи пластичности и ударной вязкости малоуглеродистых и низколегированных сталей. Металлургия. №22. Мн.: Вышэйшая школа, 1988. — С. 22–24.

ВЛИЯНИЕ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРАЩЕНИЯ НЕПРОВОДЯЩИХ ТЕЛ В ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИХ СУСПЕНЗИЯХ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

При изучении ротационных эффектов непроводящих осесимметричных тел в электрических полях подавляющее большинство работ, обзор которых приведен в [1], посвящено исследованию их скоростных характеристик. Это объясняется экспериментальными трудностями, связанными с отсутствием вращающего момента у неподвижного ротора в симметричном поле, а также вызванными малой величиной крутящего момента. Немногочисленные исследования, выполненные соответственно в работах [2] и [3], посвящены косвенной оценке вращающего момента:

- по силе, требующейся для останова ротора, на который насаживался чувствительный элемент в виде тонкой металлической пластинки с тензодатчиками, вращение которой ограничивалось регулируемым стопорами, а сигнал с тензоэлементов, соответствующий моменту полного торможения ротора, записывался на осциллограф;

- по величине добавочного тока проводимости, возникающего от вращения ротора.

Однако подобные методы позволяют лишь косвенно оценить крутящий момент, но совсем не дают возможности исследовать влияние момента сопротивления на скоростные характеристики вращения.

Для достижения этой цели был разработан прямой метод измерения прикладываемого момента сопротивления, вызванного регулируемой силой трения.

На верхнюю часть диэлектрического ротора плотно насаживался тормозной диск, на который передавался регулируемый момент сопротивления через тормозную колодку, закрепленную на конце измерительного воспринимающего элемента в виде грамометра часового типа. Радиусы обоих дисков выбирались из условия, чтобы показания измерительного элемента были выражены сразу в единицах вращающего момента, который оценивался по приложенному максимальному моменту сопротивления. Его значения увеличивались постепенно от нуля ступенями по $2,5 \cdot 10^{-4}$ Н·м, причем для каждого значения момента сопротивления измерялись скорость установившегося вращения ротора и ток проводимости.

Методика проведения опытов позволяла оценивать как сам вращающий момент ротора реоэлектрического двигателя, так и влияние дополнительно прикладываемого момента сопротивления на скорость его вращения.

Проведенные исследования показали, что зависимость $M(E)$ для разных электрофизических свойств среды и конструктивных параметров цилиндрических непроводящих тел близка к линейной для всех варьируемых параметров (рис. 1).

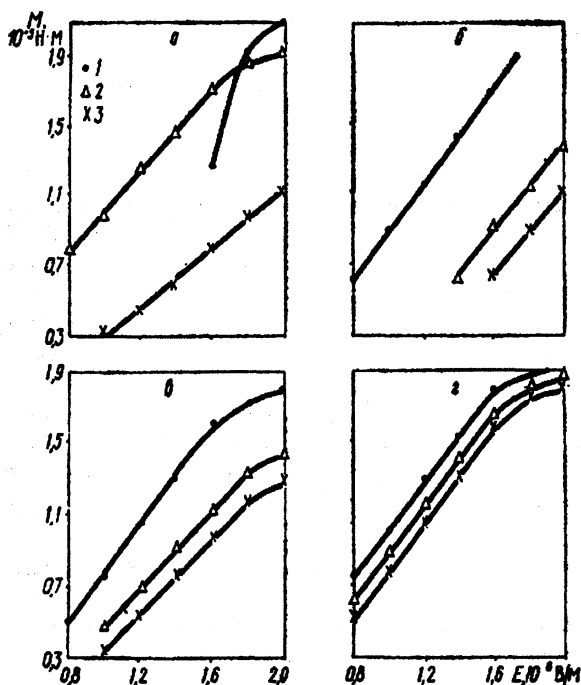


Рис. 1. Зависимость крутящего момента диэлектрического ротора от напряженности E в суспензиях диатомита в трансформаторном масле: а – для ротора из эбонита при влажности диатомита $\phi=6,5\%$ (1 – $C=5\%$; 2 – $2,5\%$; 3 – $C=1\%$); б – при $C=5\%$ и разном содержании диатомита (1 – $\phi=8,7\%$; 2 – $3,4\%$; 3 – $\phi=2,8\%$); в – при $C=2,5\%$ и $\phi=6,5\%$ для: 1 – ротора $\varnothing 4$ мм из оргстекла на металлическом основании; 2 и 3 – сплошных роторов из оргстекла $\varnothing 4$ и 3 мм соответственно; г – при $C=2,5\%$ и $\phi=6,5\%$ для материалов: 1 – эбонит; 2 – винипласт; 3 – оргстекло.

Повышение содержания дисперсной фазы до $C=2,5\%$ сначала снижает критическую напряженность $E_{кр}$, соответствующую возникновению крутящего момента устойчивого стационарного вращения. С дальнейшим ростом твердой фазы $E_{кр}$ увеличивается. Отметим не только качественное, но и количественное совпадение

этого результата с данными работы [3]: минимальная пороговая напряженность, соответствующая началу вращения ротора, для суспензии диатомита наступает при концентрации 2,5% и составляет $E_{кр} = 0,8 \cdot 10^6$ В/м для различных материалов тела вращения. Этот экспериментальный факт позволяет утверждать, что на величину электрического числа Гартмана (критерий неустойчивости)

$$H_E = \frac{(1 + R)}{\sqrt{1 - R \cdot S}}, \quad (1)$$

соответствующую возникновению устойчивого стационарного вращения (в которой $R = \sigma^b / \sigma^a$ определяет отношение проводимостей ротора b и дисперсионной среды a , $S = \epsilon^a / \epsilon^b$ – отношение диэлектрических проницаемостей дисперсионной среды a и ротора b), определяющим образом влияют электрофизические свойства среды: удельная объемная проводимость σ^a и диэлектрическая проницаемость ϵ^a .

Крутящий момент с ростом концентрации увеличивается до определенного значения (рис. 1, а). Далее темп возрастания M понижается, и кривая сдвигается в область более высоких напряженностей. Начиная с некоторой концентрации, существует такая напряженность поля, выше которой проявляется тенденция к насыщению зависимости $M(E)$. Это хорошо согласуется с данными исследования влияния концентрации твердой фазы на скорость вращения ротора, приведенными в работе [2].

Содержание активатора, не изменяя линейного характера зависимостей $M(E)$, сдвигает их в область меньших напряженностей. Соответствующая началу стационарного вращения критическая величина E снижается (рис. 1, б). Увеличение концентрации активатора диэтиламина в довольно широких пределах почти не сказывается на крутизне рассматриваемых зависимостей. Однако в отличие от активатора воды (рис. 1, а, в, г) на них не обнаруживается тенденции к насыщению при соответствующих концентрациях твердой фазы и напряженностях электрического поля (рис. 1, б). Вероятно, сказывается влияние менее сильного повышения эффективной вязкости для системы с активатором диэтиламином в электрическом поле [1].

Были проведены опыты со сплошными роторами из оргстекла и полыми с металлическим стержнем внутри (эквипотенциальная поверхность). В последнем случае наблюдаются увеличение вращающего момента, крутизны его зависимости от напряженности поля и снижение пороговой величины $E_{кр}$. Это естественно, поскольку эквипотенциальная поверхность увеличивает напряженность электрического поля в суспензии при том же самом напряжении на электродах. Вращающий момент возрастает также с увеличением диаметра ротора (рис. 1, в).

Изменение материала тела вращения не изменяет вида зависимости $M(E)$. Величина вращающего момента при всех прочих равных условиях максимальна для винипласта и эбонита, для остальных материалов она ниже (рис. 1, г). Приведенная в работе [4] таблица электрофизических характеристик использованных в наших опытах материалов свидетельствует о существенном их влиянии на вращаю-

щий момент. С ростом удельного сопротивления и уменьшением диэлектрической проницаемости вращающий момент увеличивается.

Влияние же момента сопротивления на скорость вращения ротора представляет собой падающие кривые с двумя нелинейными участками (начальным и конечным), на которых влияние сопротивления на скорость вращения велико и незначительное увеличение $M_{\text{сопр}}$ существенно изменяет скорость вращения. За исключением этих двух относительно небольших нелинейных участков скорость вращения в основном уменьшается пропорционально приложенному моменту сопротивления при различных подаваемых электрических напряжениях. Коэффициент пропорциональности уменьшается в области средних подаваемых напряжений.

Результаты исследования могут быть использованы при создании реоэлектрических микродвигателей, а также для разработки надежных и простых генераторов механических незатухающих колебаний для приборостроения и измерительной техники. Их достоинством является с раздельное и независимое регулирование амплитуды и частоты колебаний, что обычно труднодостижимо.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульман З.П., Носов В.М. Вращение непроводящих тел в электрореологических суспензиях.—Мн.: Наука и техника, 1985.—112 с. 2. Z.P.Shulman and V.M. Nosov. Rotation of the Axisymmetric Bodies in Electrorheological Suspensions, in Proceedings of the 5TH International Conference Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology (Sheffield, 1995), pp. 72–84. 3. Z.P.Shulman and V.M.Nosov. Rotation of the Axisymmetric Bodies in Electrorheological Suspensions (ERS), in International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, Nos. 23 & 24 (1996) 2903–2915. 4. Электротехнический справочник.Т.1.-М.:Энергия, 1980.—519 с.

УДК 681.3 (082):539.1

О. В. Громыко

КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ТО НКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Первым и наиболее сложным шагом в численном решении уравнений теории оболочек методом конечных разностей при исследовании напряженно-деформированного состояния тонкостенных элементов конструкций [1–3] является процесс дискретизации.

1. Автоматическая генерация конечно-разностных формул

Известно, что стандартная конечно-разностная аппроксимация, например, дифференциального выражения dy/dx имеет вид:

$$\frac{dy}{dx} \approx \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (1)$$

где x_1 и x_2 являются конечными точками интервала l длиной h (рис.1), а y_1 и y_2 являются соответствующими значениями функции y .

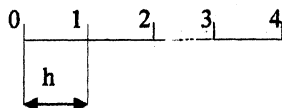


Рис. 1.

Уравнение (1) является эквивалентом аппроксимации функции y линейным полиномом в интервале l ; оно приближается к точному значению производной при стремлении длины интервала к нулю. В численном анализе, однако, h всегда является конечной величиной и использование соотношения (1) всегда приводит к ошибке. Таким образом, большое практическое значение имеет более точная аппроксимация производной dy/dx и производных более высокого порядка (см., например, п. 2).

В методе конечных элементов использование полиномов высокого порядка приводит к уточнению решений дифференциальных уравнений при заданном (фиксированном) числе узлов сетки. Подобные результаты справедливы и для формул интегрирования.

Рассмотрим аппроксимацию функции y с помощью интерполяционных полиномов Лагранжа n -го порядка:

$$y = \sum_{j=1}^{n+1} y_j l_j^{(n)}(x), \quad (2)$$

$$\text{где } l_j^{(n)}(x) = \frac{\gamma_j^{(n)}(x)}{\gamma_j^{(n)}(x_j^{(n)})}, \text{ а } \gamma_j^{(n)}(x) = \prod_{m=1, m \neq j}^{n+1} (x - x_m^{(n)}). \quad (3)$$

С использованием этой аппроксимации получим:

$$\frac{dy}{dx} = \sum_{j=1}^{n+1} y_j \frac{dl_j^{(n)}(x)}{dx}. \quad (4)$$

Поскольку производная от полинома n -го порядка имеет порядок $(n-1)$, уравнение (4) может быть записано в форме

$$\frac{dy}{dx} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{n+1} D_{ij}^{(n)} y_j \right) l_i^{(n-1)}(x), \text{ где } D_{ij}^{(n)} = \frac{dl_i^{(n)}(x_i^{(n-1)})}{dx}. \quad (5)$$

Подставляя (3) в (5), получим:

$$D_{ij}^{(n)} = \begin{cases} \frac{\sum_{k=1, k \neq j}^{n+1} \gamma_k^{(n)}(x_i^{(n-1)})}{(x_i^{(n-1)} - x_j^{(n)}) \gamma_j^{(n)}(x_j^{(n)})}, & \text{если } x_i^{(n-1)} \neq x_j^{(n)}, j = 1, \dots, n+1 \\ \frac{1}{x_k^{(n)} - x_j^{(n)}} \frac{\gamma_k^{(n)}(x_k^{(n)})}{\gamma_j^{(n)}(x_j^{(n)})}, & \text{если } x_i^{(n-1)} = x_k^{(n)} \neq x_j^{(n)}, \\ \sum_{k=1, k \neq j}^{n+1} \frac{1}{x_j^{(n)} - x_k^{(n)}}, & \text{если } x_i^{(n-1)} = x_j^{(n)}. \end{cases} \quad (6)$$

Если узлы интерполяции $\{x^{(n)}_i\}$ и $\{x^{(n-1)}_i\}$ взяты пространственно совпадающими, тогда при $n \geq 2$ уравнение (6) преобразуется к виду:

$$D_{ij}^{(n)} = \begin{cases} \frac{n(n-1)}{L[ni - (n-1)j + 1]} \sum_{k=1, k \neq j}^{n+1} \frac{(-1)^{j-k} (n-k-1)!(k-1)!}{(n-j-1)!(j-1)!}, & \text{если } x_i^{(n-1)} \neq x_j^{(n)} \\ \frac{n(n-1)^{j-k} (n-k-1)!(k-1)!}{L(k-j)(n-j-1)!(j-1)!}, & \text{если } x_i^{(n-1)} = x_k^{(n)} \neq x_j^{(n)} \\ \frac{n}{L} \sum_{k=1, k \neq j}^{n+1} \frac{1}{j-k}, & \text{если } x_i^{(n-1)} = x_j^{(n)} \end{cases} \quad (7)$$

Величины $D_{ij}^{(n)}$ в соотношениях (7) формируют множество матриц n на $(n+1)$, которые в дальнейшем будем называть матрицами дифференцирования. Числовые значения матриц дифференцирования были точно вычислены для полиномов порядка от первого до девятого, а в табл. 1 приведены для пяти.

Таблица 1

$n=1$	-1	1			
$n=2$	-3	4	-1		
$n=3$	-5,5	9	-4,5	1	
	0,125	-3,375	3,375	-0,125	

n=4	-8,33333333	16	-12	5,33333333	-1
	-0,08641975	-4,5432099	5,48148148	-0,987654321	0,13580247
n=5	-11,41666666	25	-25	16,66666666	-6,25
	-0,20654297	-6,1157227	8,45540364	-2,856445312	0,84228516
	-0,02343750	0,32552083	-5,8593750	5,8593750000	-0,32552083

В ней представлены только элементы верхней треугольной части матрицы (плюс центральная колонка); другая половина матрицы получается с использованием свойства антисимметричности:

$$D_{ij}^{(n)} = -D_{n-i+1, n-j+2}^{(n)} \quad (8)$$

Отметим, что для случая низшего порядка, при $n=1$, уравнение (5) принимает вид:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Это то же уравнение (1), но представленное в матричной форме.

2. Конечно-разностные соотношения для производных высоких порядков.

Опуская промежуточные выводы, приведем окончательные соотношения для пятиточечных схем аппроксимации конечными разностями производных различного порядка (см. рис.1).

$$y_0' = \frac{1}{12h} (-25y_0 + 48y_1 - 36y_2 + 16y_3 - 3y_4)$$

$$y_0'' = \frac{1}{12h^2} (35y_0 - 104y_1 + 114y_2 - 56y_3 + 11y_4)$$

$$y_0''' = \frac{1}{2h^3} (-5y_0 + 18y_1 - 24y_2 + 14y_3 - 3y_4)$$

$$(y_0'')' = \frac{1}{h^4} (y_0 - 4y_1 + 6y_2 - 4y_3 + y_4)$$

$$y_1' = \frac{1}{12h} (-3y_0 - 10y_1 + 18y_2 - 6y_3 + y_4)$$

$$y_1'' = \frac{1}{12h^2} (11y_0 - 20y_1 + 6y_2 + 4y_3 - y_4)$$

$$y_1''' = \frac{1}{2h^3}(-3y_0 + 10y_1 - 12y_2 + 6y_3 - y_4)$$

$$(y_1'')'' = \frac{1}{h^4}(y_0 - 4y_1 + 6y_2 - 4y_3 + y_4)$$

$$y_3' = \frac{1}{12h}(-y_0 + 6y_1 - 18y_2 + 10y_3 + 3y_4)$$

$$y_3 = \frac{1}{12h^2}(-y_0 + 4y_1 + 6y_2 - 20y_3 + 11y_4)$$

$$y_3''' = \frac{1}{2h^3}(y_0 - 6y_1 + 12y_2 - 10y_3 + 3y_4)$$

$$(y_3'')'' = \frac{1}{h^4}(y_0 - 4y_1 + 6y_2 - 4y_3 + y_4)$$

$$y_4' = \frac{1}{12h}(3y_0 - 16y_1 + 36y_2 - 48y_3 + 25y_4)$$

$$y_4'' = \frac{1}{12h^2}(11y_0 - 56y_1 + 114y_2 - 104y_3 + 35y_4)$$

$$y_4''' = \frac{1}{2h^3}(3y_0 - 14y_1 + 24y_2 - 18y_3 + 5y_4)$$

$$(y_4'')'' = \frac{1}{h^4}(y_0 - 4y_1 + 6y_2 - 4y_3 + y_4)$$

$$y_i' = \frac{1}{12h}(-y_{i+2} + 8y_{i+1} - 8y_{i-1} + y_{i-2}) + 0(h^4)$$

$$y_i'' = \frac{1}{12h^2}(-y_{i+2} + 16y_{i+1} - 30y_i + 16y_{i-1} - y_{i-2}) + 0(h^4)$$

$$y_i''' = \frac{1}{2h^3}(y_{i+2} - 2y_{i+1} + 2y_{i-1} - y_{i-2}) + 0(h^2)$$

$$(y_i'')'' = \frac{1}{h^4}(y_{i+2} - 4y_{i+1} + 6y_i - 4y_{i-1} + y_{i-2}) + 0(h^2)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Громыко О.В. Напряженно-деформированное состояние тонкостенных оболочек вращения. – Материалы межд. НТК «Наука и технологии на рубеже XXI века». – Минск: БГПА, 2000. 2. Скойбеда А.Т., Громыко О.В. Матричная форма

уравнений для расчета оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. I. Исходные соотношения. – Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. №2, 1999, с. 98–102.
3. Скойбеда А.Т., Громыко О.В. Матричная форма уравнений для расчета оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. II. Система уравнений равновесия в перемещениях и их решение. – Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. №2, 1999, с. 103–108.

УДК 539.22.002.3

О. В. Громыко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ НЕСУЩЕЙ ФЕРМЫ РАДИОТЕЛЕСКОПА

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Определение динамических характеристик машиностроительных конструкций с использованием методов вынужденных гармонических колебаний и свободных колебаний широко распространено в практике лабораторных испытаний. Это обусловлено ясными теоретическими основами методов, позволяющих определять достоверные значения искомых величин. Метод свободных колебаний предусматривает анализ колебаний системы, вызванных начальным возмущением определенного типа: в виде импульса, начального прогиба или возбуждения в резонансе с его последующим снятием. Для систем с незначительной жесткостью, к числу которых относятся ферменные конструкции [1, 2] радиотелескопов (РТ), наиболее предпочтительным является второй способ. Для реализации третьего способа требуется сложная виброаппаратура и частотные анализаторы переходных процессов. В резонансном методе конструкция возбуждается гармонической силой. Измеряются амплитуды колебаний различных точек конструкции в зависимости от частоты. Искомые динамические характеристики получаются путем анализа резонансных пиков амплитудно-частотных характеристик. Резонансный режим колебаний достигается плавным изменением частоты возбуждающего усилия. Формы колебаний на основании измерения амплитуд в различных точках конструкции при резонансной частоте.

Основная трудность при определении собственных частот реальных конструкций резонансным методом состоит в том, что резонансные пики не совпадают точно с собственными частотами, а несколько смещены. Этот эффект объясняется влиянием диссипативных сил и нерезонансных тонов колебаний, близостью собственных частот конструкции, нелинейностью её поведения при больших усилиях воз-

буждения. Оценить смещение пиков амплитудно-частотных характеристик при испытаниях РТ-5 [3] оказалось невозможным вследствие сложной взаимосвязи параметров. Существенным недостатком этого метода является также возможность пропуска одного из тонов колебаний конструкции в случае расположения вибратора или виброизмерителя вблизи узла колебаний, особенно при близких собственных частотах. Предварительные динамические испытания АБ РТ-5 выявили сильную зависимость амплитудно-частотных характеристик от величины возбуждающего усилия и области его приложения в симметричных узлах конструкции. Кроме того, низшие частоты собственных колебаний антенны оказались близкими к нижнему пределу рабочего диапазона вибратора.

В процессе предварительных испытаний при исследовании динамических характеристик АБ РТ-5 оказался эффективным метод свободных колебаний. Схема установки для определения динамических характеристик АБ РТ этим методом приведена на рис. 1.

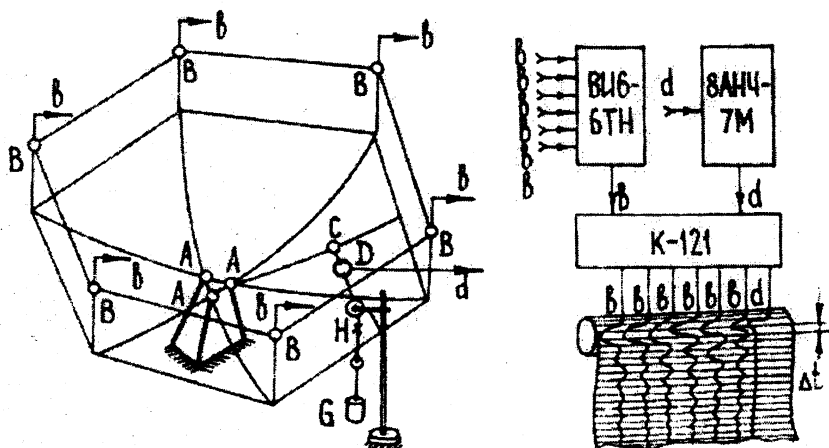


Рис. 1.

Колебания конструкции возбуждались заданием начального прогиба в точке С и мгновенным устранением его. Прогиб задавался при помощи грузов G , соединенных с точкой конструкции С гибкой тягой через систему блоков. Величина начального прогиба изменялась в зависимости от суммарного веса грузов. В результате быстрого снятия нагрузки (перерезывалась нагружающая тяга Н) в конструкции РТ-5 возбуждались свободные колебания. Время снятия связи измерялось при

помощи тензокольца D, встроенного в тягу. Преобразование процесса колебаний в электрические сигналы осуществлялось акселерометрами (В) ДУ-5, работающими в комплекте с виброизмерительной аппаратурой ВИБ-6ТН. Регистрация сигналов осуществлялась светолучевым осциллографом К-121. На фотоленте вместе с осциллограммами, соответствующими исследуемому процессу, одновременно фиксировался процесс освобождения наложенной связи, регистрируемый тензоизмерителем D. Усилителем-преобразователем для сигнала с тензокольца являлся тензоусилитель 8АНЧ-7М. Для выделения исследуемых тонов из суммарного сигнала полоса пропускания аппаратуры ВИБ-6ТН была ограничена диапазоном 0-30 Гц при помощи сменных фильтров, входящих в комплект аппаратуры.

При испытаниях АБ РТ-5 использован метод многоточечного возбуждения свободных колебаний конструкций. Задача состояла в подборе такого силового воздействия, при котором практически возбуждался единственный тон колебаний. Здесь начальный прогиб задавался одновременным приложением сосредоточенных сил в различных узлах конструкции таким образом, чтобы начальная изогнутая форма соответствовала форме исследуемых собственных колебаний.

При исследовании осесимметричных колебаний нагрузка прикладывалась в трех симметрично расположенных точках V (V' - второй вариант опирания) отражающей поверхности РТ-5, рис.2.

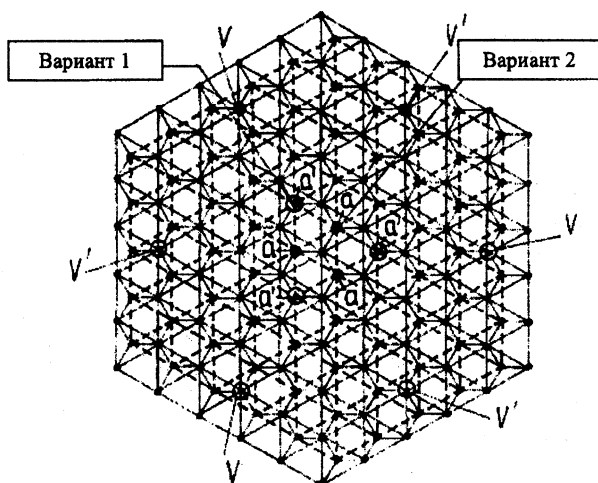


Рис. 2.

Нагрузка от подвешенного на фокальной оси груза при помощи гибких упругих нитей через опорную пирамиду и систему блоков передавалась в точки возбужде-

ния $V(V')$. Прикладываемые в узлах силы определялись массой грузов, изменявшейся от 5 до 11 кг. В результате предварительных испытаний установлено, что время снятия нагрузки значительно меньше периода собственных колебаний конструкции и практически не влияет на результаты экспериментов. Для исключения погрешностей, вносимых ударной нагрузкой от снимаемых связей, обработка осциллограмм начиналась со второй четверти периода колебаний. В дальнейших экспериментах тензокольцо D было снято. Колебания фиксировались шестью датчиками ускорений ДУ-5. Для построения формы собственных колебаний, соответствующей исследуемому тону, эксперимент повторялся многократно. При этом условия возбуждения конструкции сохранялись, а изменялись лишь узлы крепления акселерометров. Форма колебаний определялась величинами амплитуд в различных точках конструкции для одного момента времени. При исследовании изгибных колебаний АБ РТ-5 усилие возбуждения и оси максимальной чувствительности датчиков ускорений устанавливались по нормали к отражающей поверхности. Изменение массы грузов от 5 до 11 кг не отразилось на величинах определяемых частот и характере форм собственных колебаний.

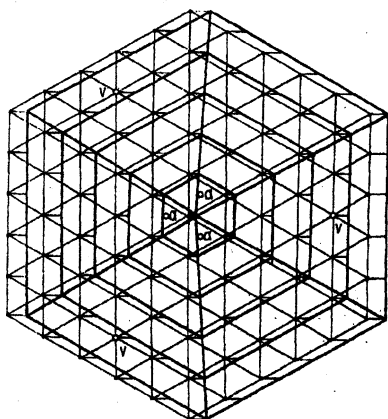
При динамических испытаниях РТ-5 исследовались собственные частоты, формы и коэффициенты демпфирования осесимметричных изгибных колебаний АБ без облучателя при двух вариантах крепления антенны и двух вариантах ориентации конструкции в поле сил тяготения: отражающей поверхностью вверх и вниз (фокальная ось вертикальна). В первом варианте каркас антенны закреплялся за три ближайших к фокальной оси точки установочной поверхности α , во втором – за три узла α' следующего пояса, рис.2.

Формы осесимметричных колебаний, соответствующие частоты f и логарифмические декременты затухания колебаний δ АБ РТ-5 в исследуемых случаях приведены на рис. 3, 4. Здесь на развертке отражающей поверхности в каждом шарнирном узле вправо отложены положительные, влево – отрицательные отклонения в момент времени, когда контрольный датчик в одной из угловых точек давал максимальные значения.

На рис.3 представлена форма осесимметричных колебаний конструкции, отражающая поверхность которой обращена вверх, при первом варианте закрепления за три ближайших к фокальной оси узла установочной поверхности антенны. Последние отмечены кружками. При аналогичном закреплении РТ-5, когда отражающая поверхность обращена вниз, получена форма колебаний, совпадающая с приведенной на рис. 3. При различной ориентации конструкции в поле сил тяготения совпали также частоты и логарифмические декременты собственных колебаний антенны. Результаты второго эксперимента на отдельном рисунке не показаны.

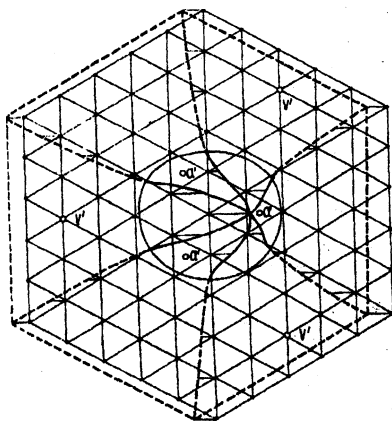
Поскольку изменение положения АБ в гравитационном поле не повлияло на динамические характеристики стержневой системы рефлектора, испытания конструкции РТ-5 при втором варианте закрепления проведены лишь для случая, когда

отражающая поверхность обращена вниз. Частота, форма и логарифмический декремент затухания собственных колебаний антенны, полученные в этом эксперименте, приведены на рис. 4. Пунктирными линиями отмечены отклонения отражающей поверхности за плоскость, сплошными – из плоскости чертежа. Сплошная замкнутая линия соответствует узловой линии формы колебаний. Отметим, что проведение испытаний конструкции РТ-5 модифицированным методом свободных колебаний стало возможным благодаря уменьшению демпфирования в узлах за счет применения накладок.



$f=18,3 \text{ Гц}$ $\delta=0,3$

Рис.3



$f=17,3 \text{ Гц}$ $\delta=0,3$

Рис.4

Полученные экспериментальным путем результаты позволили доказать применимость континуальной модели при расчетах регулярных стержневых машиностроительных конструкций. Для сопоставления результатов исследования собственных колебаний АБ РТ-5, полученных в эксперименте и путем численного расчета, построена континуальная расчетная схема, аналогичная принятой в [1, 2]. В качестве жесткостных характеристик поясных и диагональных стержней использованы результаты статических испытаний (табл.1): $(EF)_{\text{пояс}}=35,4 \cdot 10^4 \text{ Н}$, $(EF)_d=26 \cdot 10^4 \text{ Н}$. Радиус средней поверхности трехслойной сферической оболочки, моделирующей АБ РТ-5, принят равным $R=4,621 \text{ м}$, толщина пакета – $h=0,562 \text{ м}$. Вблизи полюса, при $\alpha_0=0,01^\circ$, накладывались условия замыкания (симметрии), а на краю, при $\alpha_k=25,3^\circ$, – условия, соответствующие свободному краю. Полученное отношение мембранной жесткости континуальной модели B_{11} к массе единицы поверхности i_1

характеризуется параметром $\sqrt{B_{11}/i_1} = 780,89 \text{ м/с}$, а относительная инерция вращения поперечных сечений – $i_2/i_1 h^2 = 1,32$.

Таблица 1.

Этап нагрузки	Состояние шарнира поясного стержня Накладки: а) ослаблены; б) подтянуты; в) отсутствуют						Типичный диагональ- ный стержень
	Типичный поясной стержень			Область шарнира поясного стержня			
	а	б	в	а	б	в	
1	28,8	71,3	16,8	15,1	29,2	9,5	26
2	37,4	62,1	34,2	15,7	25,6	10,4	26
3	40,5	68,2	29,4	16,6	27,4	10,1	26
Состояние шарнира	Статистические оценки жесткости поясных стержней						
	а		б		в		
Оценка							
$\overline{M}(EF)_{\text{экс}}, H$	35,4·10 ⁴		69,2·10 ⁴		30,5·10 ⁴		
$\overline{D}(EF)_{\text{экс}}, H^2$	11,9·10 ⁹		37,6·10 ⁹		14,9·10 ⁹		
$\overline{\sigma}(EF)_{\text{экс}}, H$	10,6·10 ⁴		19,4·10 ⁴		12,2·10 ⁴		

При исследовании собственных колебаний модели, соответствующей первому варианту закрепления, условия, запрещающие нормальные w и тангенциальные u перемещения внешней поверхности ($z=h/2$) оболочки, накладывались для промежуточной опоры $\alpha_{оп} = 2,21^\circ$. Для второго варианта закрепления условия промежуточной опоры накладывались при $\alpha_{оп} = 6,32^\circ$. Результаты численного расчета частот и форм собственных колебаний приведены на рис.5 соответственно для первого (а) и второго (б) условий закрепления. Формы колебаний построены для средней поверхности континуальной модели, поэтому узлы прогибов и меридиональных перемещений не совпадают.

Из сопоставления форм колебаний, полученных экспериментальным путем и численным методом по континуальной схеме, следует их качественное совпадение. Частоты колебаний при этом отличаются в сторону завышения в первом случае на 8,5%, во втором – на 4,9%, что вполне согласуется с принципом Рэлея. Отметим, что математическое ожидание жесткости поясных стержней вычислено по результатам испытаний лишь 10 стержневых элементов, т.е. 2,3% от общего количества поясных стержней АБ РТ-5. Среднеквадратическое отклонение жесткости даже по данным проведенного эксперимента составило значительную величину (до 40%). В связи с этим возможно отличие собственной частоты, полученной расчетным путем, ввиду большого разброса жесткостей стержней и отличия использованной в расчетах жесткости $EF = 35,4 \cdot 10^4 \text{ Н}$ от средней жесткости типичного стержня конструкции.

Кроме описанных результатов испытаний и соответствующих расчетов конструкции при осесимметричных колебаниях, проведены исследования других тонов

изгибных колебаний с одной и двумя волнами в окружном направлении. Отмечено значительное отличие экспериментальных и расчетных данных, объясняемое быстрой изменяемостью НДС АБ РТ-5 в пределах «редкой» фермы, имеющей лишь пять стержневых пролетов от центра ее к краю. Последнее обстоятельство существенно ограничивает применимость предложенной континуальной модели к расчету более высоких тонов собственных колебаний данной конструкции.

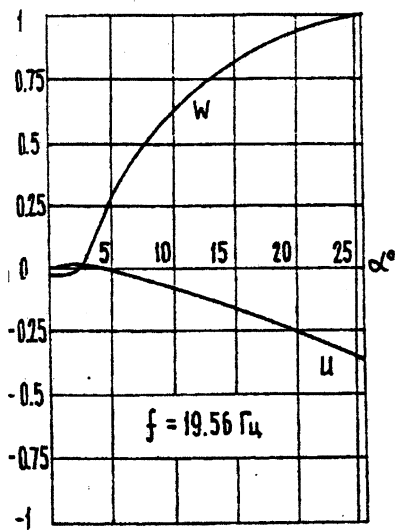


Рис. 5 а.

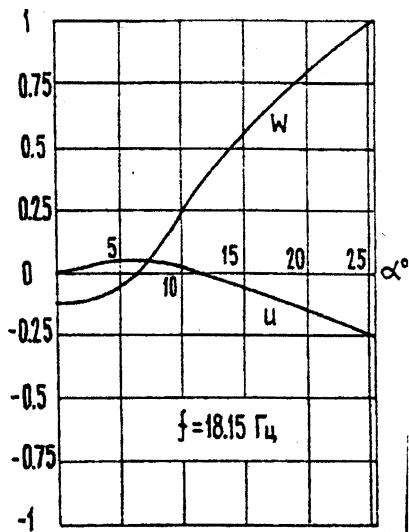


Рис. 5 б.

На основании проведенного сопоставления можно сделать следующий вывод. При медленно изменяющемся НДС вдоль элементарных ячеек регулярной фермы расчет ее по континуальной схеме является обоснованным. Удовлетворительное совпадение экспериментальных данных и результатов расчета конструкции по схеме континуума подтверждает возможность применения континуальных моделей при исследовании многопролетных регулярных ферменных конструкций, нагрузка на которые по их площади изменяется плавно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громыко О.В. Анализ точности расчета регулярных ферм типа тонкостенных конструкций по континуальной схеме. – В кн.: Материалы II Белорусского конгресса

са по теоретической и прикладной механике. Минск, 1999, с.66–67. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. 2. Громыко О.В. Аналитические оценки частот собственных колебаний регулярных ферм типа пластин. – В кн.: Современные проблемы машиноведения. Материалы международной научно-технической конференции (научные чтения, посвященные П.О.Сухоми), с. 38–39. – Гомель: ГПИ, 1996. 3. Громыко О.В. Экспериментальное исследование жесткостных характеристик стержневых элементов радиоастрономической антенны РТ-5. – Материалы между. НТК «Наука и технологии на рубеже XXI века». – Минск: БГПА, 2000.

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

УДК 339.137.2:631.37.002

Д. И. Лузан, А. И. Тарасевич

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В условиях формирования рыночных отношений особую актуальность приобретают проблемы обеспечения конкурентоспособности промышленной продукции, доля которой в экономике РБ имеет значительный удельный вес. Выпускаемая тракторная техника, ориентированная на средний класс тракторов, не позволяет Минскому тракторному заводу работать на полную мощность в связи с резким сокращением сбыта продукции. Перед специалистами завода стоит сложная задача изготовления новых конструкций тракторов, являющихся конкурентоспособными на рынках ближнего и дальнего зарубежья.

Среди различных разработок необходимо, прежде всего, выбрать ту модель, которая даст наибольший эффект для производителя, потребителя и государства в целом. С этой целью необходимо обосновать показатели и критерии оценки эффективности тракторной техники на стадии ее проектирования, что позволит сэкономить значительную долю средств и предотвратить возможные просчеты на этапе производства новых машин.

Для ориентации ПО «МТЗ» на выпуск конкурентоспособных тракторов необходимо, в первую очередь, определить само понятие конкурентоспособности тракторной техники и выявить показатели, от которых она зависит. Несмотря на повышенное внимание к проблеме конкурентоспособности со стороны зарубежных и отечественных экономистов, в настоящее время отсутствует общепринятое понятие конкурентоспособности промышленной продукции. Наиболее авторитетным можно считать определение, данное в «Методике оценки уровня конкурентоспособности промышленной продукции», выпущенной издательством стандартов в 1984 г. В ней указывается, что конкурентоспособность промышленной продукции определяется совокупностью свойств этой продукции, входящих в состав ее качества, других ее свойств, определяющих затраты потребителя и обеспечивающих возможность реализации продукции на конкретном рынке в рассматриваемый период. Исходя из данного определения можно, сделать вывод, что конкурентоспособность тракторной техники необходимо рассмат-

ривать лишь в пределах конкретного рынка и в конкретный период времени. Фактор времени оказывает существенное влияние на уровень конкурентоспособности продукции, так как под влиянием НТП данный показатель постоянно снижается.

Согласно данному определению, можно выделить три группы показателей, определяющих конкурентоспособность тракторной техники на конкретном рынке:

- качественные показатели;
- экономические показатели;
- организационно-коммерческие показатели.

Состав каждой из приведенных групп показателей представлен в табл. 1.

Качественные показатели характеризуют достигнутый технический уровень тракторов, а также качество изготовления и условия эксплуатации в соответствии с требованиями действующих на данном рынке стандартов (фирменных, республиканских, международных), регламентов законодательных органов, специфических запросов потребителей.

Экономические показатели представляют собой затраты потребителя на приобретение и эксплуатацию тракторной техники. Расходы потребителя, связанные с приобретением тракторов, являются единовременными затратами (цена, таможенные сборы, налоги и т. п.), а расходы, возникающие вследствие эксплуатации техники, являются текущими затратами потребителя (расходы на ремонт, запчасти, ГСМ).

Таблица 1

Показатели, определяющие конкурентоспособность тракторной техники

Качественные показатели	Экономические показатели	Организационно-коммерческие показатели
Эксплуатационные	Цена	Маркетинговые исследования рынков сбыта
Конструктивные	Таможенные сборы, налоги	Гарантии продавца
Функциональные	Расходы на транспортировку	Условия оплаты
Показатели надежности	Расходы на предпродажное обслуживание	Условия поставки
Эргономические	Эксплуатационные расходы (ремонт, запчасти, ГСМ, амортизация)	Сервисное обслуживание
Показатели безопасности	-	Сертификация
Эстетические	-	Реклама, стимулирование сбыта
Технологичности	-	Торговая марка
Показатели стандартизации и унификации	-	-
Патентно-правовые	-	-

Организационно-коммерческими являются показатели деятельности ПО «МТЗ», связанные с маркетинговыми исследованиями рынков сбыта, эффективным продвижением тракторной техники, и другие, относящиеся к деятельности предприятия в сфере обращения (сервисное обслуживание, гарантии, условия оплаты и поставки, реклама).

Каждый из представленных в табл. 1 показателей в разной степени влияет на конкурентоспособность тракторной техники и требует неодинаковых текущих и капитальных затрат для их улучшения.

Для обоснования удельного веса влияния этих показателей на конкурентоспособность тракторов на практике чаще всего используется экспертная оценка. Нами предлагается применить метод ранговой корреляции, который заключается в следующем.

Каждый эксперт получает анкету с n факторами. Форма анкеты представляет собой таблицу, которая состоит из трех столбцов: номер фактора, факторы и ранги. В первом столбце указывается количество факторов от 1 до n . Во втором перечисляются факторы и в третьем – соответствующие им ранги.

Задача экспертов состоит в присвоении этим факторам соответствующих рангов. Фактору, оказывающему наибольшее влияние на рассматриваемую проблему, присваивается самый высокий ранг – 1. Другим факторам соответственно степени их влияния назначаются ранги 2, 3 и т. д.

Оценки, полученные в результате опроса экспертов, число которых равно m , сводятся в матрицу рангов. Матрица рангов – таблица, состоящая из трех столбцов: количество экспертов (от 1 до m), факторы (этот столбец состоит из n подстолбцов – по количеству имеющихся факторов) и количество повторяющихся рангов.

При наличии в оценках эксперта совпавших рангов его оценки преобразуются так, чтобы сумма рангов была равна $n(n+1)/2$, где n – число факторов. Полученные данные записываются в виде преобразованной матрицы рангов, где в последнем столбце указано число повторений рангов. Затем для каждого из факторов подсчитывают сумму рангов. Наиболее влиятельным будет фактор с наименьшей суммой рангов.

После этого определяется влияние факторов на выбранные направления, проводится расчет коэффициента конкордации и его значимости.

Коэффициент конкордации W может изменяться от 0 до 1. При $W=0$ согласованность между экспертами отсутствует; при $W=1$ существует полная согласованность экспертов в оценке факторов.

Для оценки конкурентоспособности тракторной техники в качестве экспертов были привлечены специалисты Института экономики и информатики АПК, Белорусской государственной политехнической академии, Минского тракторного завода и Минского завода колесных тягачей. В результате обработки первичной информации по вышеприведенной методике установлены резервы конкурентоспособности, затраты средств на их реализацию, а также коэффициент эффективности обеспечения конкурентоспособности, указывающий на приоритетность повышения последней за счет того или иного показателя (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты оценки влияния групп показателей
на конкурентоспособность тракторной техники**

Группа показателей	Резервы повышения конкурентоспособности	Затраты средств на реализацию резервов	Коэффициент эффективности обеспечения конкурентоспособности
Качественные показатели	41,176	39,216	1,050
Экономические показатели	32,353	26,471	1,222
Организационно-коммерческие показатели	26,471	34,314	0,771

Анализ полученных результатов показывает, что выявлены большие потенциальные резервы повышения конкурентоспособности тракторной техники как по качественным, так и по экономическим и организационно-коммерческим показателям. Непосредственное же повышение уровня конкурентоспособности будет в первую очередь зависеть от наличия и эффективного использования средств, направляемых на реализацию резервов.

Таким образом, в результате проведенных исследований на базе анализа возможных показателей оценки качества промышленной продукции методами экспертной оценки предприятия попытка систематизировать и обосновать наиболее значимые показатели, их резервы, а также текущие и единовременные затраты на их реализацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ тенденций развития мирового тракторостроения. Ч. 1,2. – Мн., 1996. – 376 с.
2. Архипов В. И. и др. Основные направления работ по повышению эксплуатационной надежности сельскохозяйственных тракторов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1993. №12. – С.10–12.
3. Барташев Л.В. Техничко – экономические расчеты при проектировании и производстве машин. – М.: Машиностроение, 1990.
4. Грузинов В.П., Грибов В.Д. Экономика предприятия: Учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 208 с.
5. Методика расчета экономической эффективности новой техники в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1991.
6. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1990.
7. Экономика предприятия / Под ред. проф. О.И. Волкова. – М.: ИНФАРМ, 1997. – 416 с.
8. Экономика автомобильной промышленности и тракторостроения: Учебник / Власов Б.В., Невелев А.А., Кац Г.Б. и др. / Под ред. Б.В. Власова, Г.Б. Каца – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1978. – 328 с.

ОБОСНОВАНИЕ ЛИМИТНЫХ ЦЕН НА ПРОДУКЦИЮ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Одной из важных проблем, стоящих перед промышленными предприятиями Республики Беларусь и отрасли в целом является оценка эффективности производства новых образцов продукции на стадии их проектирования. Это прежде всего относится к отрасли машиностроения, и в частности, ПО "Минский тракторный завод". В настоящее время наблюдается кризисная ситуация в инвестиционной сфере нашей республики, и необходима максимальная отдача от реализуемых проектов. Оценка эффективности производства продукции машиностроения тесно сопряжена с экономической эффективностью инвестиций, необходимых для реализации такого рода проектов, и обоснованием лимитных цен на новую продукцию. В рамках данного направления проведен тщательный анализ существующих методик оценки эффективности производства промышленной продукции. Он показал, что в настоящее время отсутствует единая отраслевая методика оценки эффективности производства новых видов изделий. Имеющиеся же разрозненные методики не отвечают современным требованиям.

Поэтому при расчете эффективности производства тракторной техники одной из важнейших задач, требующих своего разрешения уже на стадии проектирования новых образцов тракторной техники, является задача ценообразования. Определение цены на создаваемую продукцию на столь раннем этапе позволяет в дальнейшем вести успешную конкурентную борьбу на рынке, проводить более продуманную маркетинговую политику, способствует, при адекватности стоимостных и функциональных показателей росту престижа торговой марки отечественного производителя, каковым является Минский тракторный завод.

Однако ценообразование, одновременно являясь неотъемлемой составляющей проектирования новой тракторной техники, представляет собой один из наиболее трудоемких и ответственных этапов. Существует ряд подходов к этой проблеме, основанных на сопоставлении проектируемых образцов с существующими аналогами либо на оценке соответствия проектируемого решения его предназначению и основным функциональным характеристикам, предъявляемым к тракторной технике. Другая группа методов основана на

анализе себестоимости проектируемых моделей тракторов с последующим расчетом предполагаемой цены.

На наш взгляд, наряду с несомненными достоинствами вышеперечисленные подходы обладают и рядом существенных недостатков. В первую очередь, необходимо отметить следующее. Данные подходы в своем подавляющем большинстве сопряжены с обработкой и систематизацией информации, полученной в результате эксплуатации образцов создаваемой тракторной техники, а иногда даже после постановки модели на конвейер и некоторого периода ее массового производства. Поэтому на ранних стадиях разработки новых машин их применение ограничено или просто невозможно. Кроме того, ценообразование представляет собой сложный, многофакторный процесс. На установление цены на предлагаемую продукцию влияет множество взаимосвязанных факторов, важнейшими из которых являются требования учета места и времени, определяющие конъюктуру конкретного рынка. Одной из основных задач при определении (прогнозировании) цены на проектируемую продукцию является выявление важнейших ценообразующих факторов, их взаимосвязи как между собой, так и с будущей ценой, ими определяемой. При этом важна количественная оценка как предполагаемой стоимости, так и анализируемых факторов, что подразумевает установление функциональной взаимосвязи между факторными (ценообразующими) и результативным (ценой) признаками. Требование наличия данных об эксплуатации, необходимость учета многообразия определяющих стоимость аспектов, выявление и анализ их взаимосвязи является слабым звеном вышеупомянутых методик. Нами предлагается подход, основанный на методах статистического корреляционно-регрессионного анализа, позволяющий учесть объективную потребность в комплексном, многофакторном определении цены на проектируемую тракторную технику. Кроме того, данный подход включает методы оценки тесноты связи установленной функциональной зависимости, определения подсистемы информативных признаков. С помощью статистических экономико-математических моделей становится возможным осуществить краткосрочный прогноз стоимости тракторной техники еще на стадии проектирования, основываясь на имеющейся информации о представленных на рынке моделях, предлагаемых как Минским тракторным заводом, так и его основными конкурентами. Условие "краткосрочности" прогноза не является, как это может показаться на первый взгляд, ограничением на практическое использование предлагаемого решения. Однако в непрерывно меняющейся рыночной ситуации другой подход просто невозможен, т.к. долгосрочное прогнозирование при острой конкуренции и непрерывной интенсификации коммерческих усилий производителей обречено на потерю достоверности и адекватности реальности. Вместе с тем статистическая экономико-математическая модель является открытой. Условие открытости позволяет беспрепятственно вводить в нее новые поступившие данные и модифицировать функциональную связь «факторные

признаки—результативный признак» таким образом, чтобы она учитывала все возможные аспекты, оказывающие влияние на установление той или иной величины стоимости на проектируемую тракторную технику, состав и значимость которых постоянно меняется. Кроме того, корреляционно-регрессионный анализ позволяет оценить совместное влияние на стоимость предлагаемого решения разнотипных факторов, таких как технико-эксплуатационные, экологические, коммерческие и прочие характеристики проектируемой продукции. Обширная математическая база, положенная в основу разработки подобного рода моделей, позволяет говорить о таком подходе как о достаточно мощном и универсальном инструментарии, позволяющем эффективно обрабатывать имеющиеся данные, доступные на этапе проектирования новых моделей тракторов, и в дальнейшем осуществлять последующий предварительный прогноз цены разрабатываемой тракторной техники с достаточной степенью надежности.

Группой специалистов БГПА произведен расчет прогнозной цены проектируемой модели трактора МТЗ-2522 по предлагаемой методике. Результаты были получены на основе разработанной статистической экономико-математической модели, описывающей зависимость цены тракторов, выпускаемых Минским тракторным заводом, от их основных технико-эксплуатационных характеристик. Исходная статистическая информация была предоставлена специалистами МТЗ.

Таблица исходных данных представляет собой значения основных технико-эксплуатационных характеристик и цен на модельный ряд продукции, выпускаемой Минским тракторным заводом. С целью определения вида существующей связи между ценами на выпускаемую тракторную технику и ее технико-эксплуатационными свойствами был проведен графический анализ парного совместного распределения факторных и результативного признаков. На основании результатов графического анализа, а также положения линейных трендов (линий тенденции) можно говорить о существовании линейной зависимости между ценой тракторов анализируемого модельного ряда и их технико-эксплуатационными характеристиками. Так, на рис. 1–2 таковая связь прослеживается весьма явно, что подтверждается и величинами соответствующих коэффициентов множественной детерминации R^2 , равными соответственно 0,88, 0,89. Подобные значения R^2 указывают на тесную связь между номинальной мощностью двигателя, эксплуатационной массой и ценой на тракторную технику. Ситуация, отображенная на рис. 3, свидетельствует об очень слабом влиянии удельного расхода топлива трактора на его стоимость. Кроме того, наблюдается большой разброс точек-значений на корреляционной плоскости по вертикали, т.е. существует широкий диапазон цен на тракторы с одинаковым расходом топлива. Данный факт однозначно свидетельствует о том, что цены на модели, вошедшие в анализируемую совокупность, определяются преимущественно иными факторами.

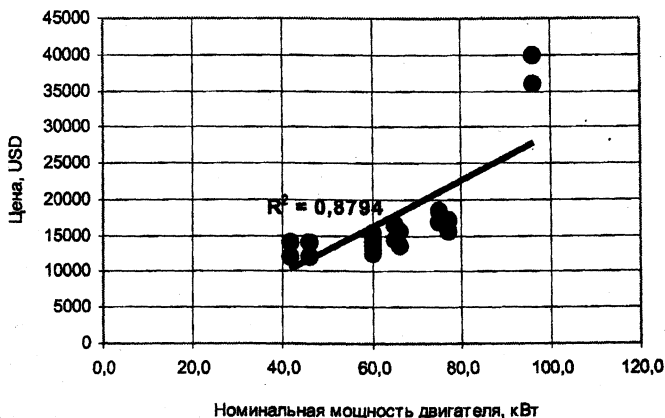


Рис. 1. Зависимость цены тракторов производства МТЗ от номинальной мощности двигателя.

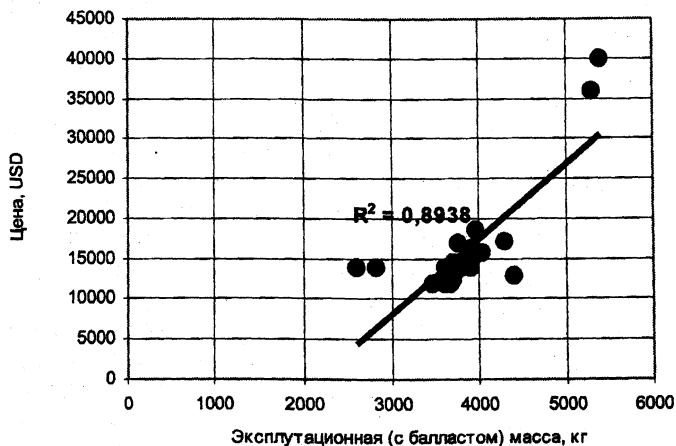


Рис. 2. Зависимость цены тракторов производства МТЗ от эксплуатационной (с балластом) массы.

Определение подсистемы информативных признаков-параметров тракторной техники выполнялось на основе матрицы парных коэффициентов корреляции. Выбор того или иного признака основывался на общих правилах предварительного отбора признаков, приведенных ранее при изложении методики прогноза лимитных цен. Кроме того, при формировании подсистемы параметров принимались во внимание рекомендации и пожелания экспертов в области

тракторостроения и специалистов МТЗ, позволившие учесть как особенности взаимосвязи отдельных технико-эксплуатационных характеристик между собой, так и их влияние на стоимость тракторной техники.

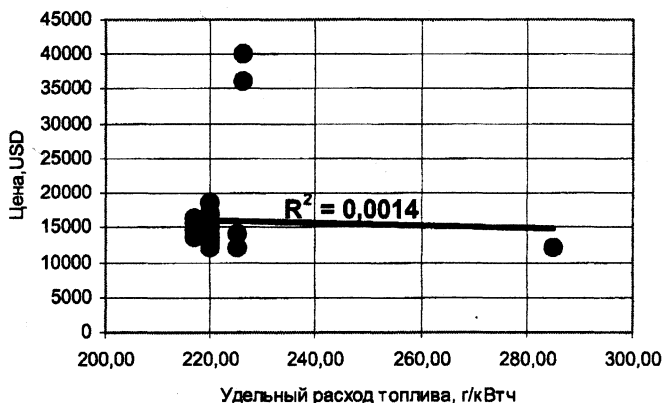


Рис. 3. Зависимость цены тракторов производства МТЗ от удельного расхода топлива.

На основании сформированной системы значимых технико-эксплуатационных характеристик анализируемого модельного ряда на ЭВМ был произведен расчет параметров уравнения регрессии и оценки тесноты связи отобранных значимых параметров тракторной техники и ее стоимости. После корректировки уравнение выглядит следующим образом:

$$Y = 326,36 * x_1 + 6,53 * x_2 + 826,33 * x_6 - 8,16 * x_8 - 476,65 * x_9 - 170709, \quad (1)$$

или

$$P = 326,36 * Ne + 6,53 * m_3 + 826,33 * R - 8,16 * Qr - 476,65 * H - 170709, \quad (2)$$

где Ne – номинальная мощность двигателя трактора;

m_3 – эксплуатационная (с балластом) масса трактора;

R – наименьший радиус поворота трактора;

Qr – производительность гидронасоса ЗНС;

H – габаритная высота трактора.

На основании уравнения (2) был осуществлен прогноз лимитной цены для модели трактора МТЗ-2522, находящегося на стадии проектирования. Так, стоимость трактора МТЗ-2522, определенная на основе исходных статистических данных по построенной функциональной зависимости (2), должна составлять примерно 88400 долларов США.

Анализ полученных результатов по прогнозу стоимости моделей МТЗ показывает, что цена тракторной техники в нынешних экономических условиях определяется в основном ее технико-эксплуатационными характеристиками.

Предлагаемая регрессионная экономико-математическая модель прогнозного определения цены является открытой, что позволяет беспрепятственно расширять и модифицировать исходные статистические данные с целью учета всех аспектов, влияющих на стоимость тракторной техники. Открытость предлагаемой модели-гарантия ее гибкости и настраиваемости, а также актуальности получаемых с ее помощью результатов, отражающих важнейшие стороны специфики формирования цен на тракторную технику в рыночных условиях.

Предлагаемый подход к определению цены на тракторную технику учитывает требование комплексности, многофакторности процесса ценообразования. Данное обстоятельство обеспечивает надежный и достоверный прогноз, а также высокую адекватность статистической модели имеющимся связям между потребительскими качествами трактора и его стоимостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко В.В. Ценовая политика фирмы.—М.: Финстатинформ, 1995. — 187 с.
2. Гусаков Б.И. Экономическая эффективность инвестиций собственника.—Мн.: Финансы, учет, аудит, 1998.—216 с.
3. Давыдов А.Ю. США в мировых ценообразовательных процессах.— М.: Наука, 1990.—122 с.
4. Анализ тенденций развития мирового тракторостроения. Ч. 1, 2.— Мн., 1996.— 376 с.
5. Барташев Л.В. Техно-экономические расчеты при проектировании и производстве машин.—М.: Машиностроение, 1990.
6. Методика расчета экономической эффективности новой техники в машиностроении.—М.: Машиностроение, 1991.
7. Полещук И.И. Ценообразование и маркетинг. Мн.: ООО "Мисанта", 1997.—132 с.

УДК 658.14

В. И. Похабов, Р. О. Ридлевич

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОЦЕНКИ ФИНАНСОВОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Устойчивое положение предприятия характеризуется обеспеченностью финансовыми ресурсами, необходимыми для нормальной производственной, коммерческой и других видов деятельности, целесообразностью и эффективностью их размещения и использования, экономическими взаимоотношениями с другими субъек-

тами хозяйствования. Анализ финансового положения предприятия представляет собой процесс исследования основных результатов его деятельности с целью выявления резервов повышения рыночной стоимости и обеспечения эффективного развития. Одним из направлений проведения анализа может стать использование системы показателей денежного потока, к которому все чаще прибегают финансовые менеджеры. Основное преимущество данной системы финансового анализа заключается в возможности выявления сбалансированности притока и оттока денежных средств по объему и во времени.

На сегодняшний день при проведении оценки финансового состояния внешним субъектам анализа приходится пользоваться опубликованной информацией. Поэтому широкое распространение получила концепция, основанная на анализе структуры баланса предприятия. При этом для определения финансового состояния рассчитываются три показателя: показатель финансовой устойчивости, ликвидности и показатель обеспеченности оборотными средствами. Однако данный способ финансового анализа не лишен ряда недостатков, таких как:

- отсутствие дифференциации в значениях показателей по отраслям, регионам, сферам деятельности и размерам предприятий;

- при расчете показателей не учитываются такие важные факторы, как объем реализации, затраты, прибыль, изменения в условиях хозяйствования;

- наличие тесной взаимосвязи между показателями, когда в условиях полного отсутствия у большинства предприятий долгосрочного долга текущая ликвидность и обеспеченность собственными средствами связаны между собой;

- статичный характер рассчитываемых показателей, которые внутри отчетного периода могут существенно отличаться от полученных по данным баланса на определенную дату;

- усилия администрации предприятия прежде всего направлены на оптимизацию производственных запасов, затрат, дебиторской задолженности, эффективное использование активов и только затем – на обеспечение ликвидности.

Рассмотренные показатели целесообразно дополнить оценкой денежного потока, который определяется на основе прогноза и отчета о движении денежных средств. Их наличие тесно связано с прибылью и движением оборотного капитала. Если субъект хозяйствования производит и реализует рентабельную продукцию, то это является важнейшей предпосылкой хорошего состояния потока денежных средств. Однако предприятие может быть прибыльным, по данным бухгалтерского учета и отчетности, и в то же время испытывать определенные трудности в оплате срочных обязательств. Одной из причин такого положения является специфика отражения информации в отчетности о финансовых результатах. Сущность этой специфики состоит в использовании метода начислений. Информация же о потоке денежных средств формируется по кассовому методу, то есть по факту их движения на счетах в банке. Следствием использования разных методов формирования информации является несоответствие реального потока денежных средств сумме при-

были, отражённой в отчетности. Формирование денежного потока предприятия показано на рис. 1.



Рис. 1. Укрупненная схема денежных потоков за период.

Существует два наиболее распространенных метода составления отчета о движении денежных средств: прямой и косвенный. Метод прямого счета используется при внутреннем анализе. Сущность его состоит в прямом сопоставлении притока денежных средств и платежей. В качестве источников информации используются данные текущего бухгалтерского учета и баланс.

Косвенный метод используется в основном при внешнем анализе. Сущность метода заключается в использовании показателя чистой прибыли, который соответствующим образом корректируется.

В практике финансового менеджмента используются оба метода, но в целях определения финансовой устойчивости, как своего предприятия, так и, особенно предприятия-партнера приоритет следует отдавать косвенному методу. К достоинствам этого метода при оценке финансовой устойчивости можно отнести возможность проследить, за счет чего на предприятии складывается несоответствие между показателями прибыли (финансового результата) и денежных средств. Особенно это важно, когда рентабельно работающее предприятие не имеет положительных денежных потоков и испытывает трудности с платежеспособностью.

В свою очередь, анализ денежных потоков проводится по двум направлениям. Первое направление оценки финансовой устойчивости заключается в анализе абсолютных значений денежных потоков на предприятии. При этом значение денежных потоков или движение денежных средств оценивается следующими показателями: поступления (приток), расходы или платежи (отток), чистый денежный поток (разница между притоком и оттоком денежных средств), структура денежного потока по трем основным сферам (основной, инвестиционной и финансовой), наличие денежных средств на счете предприятия.

К достоинствам метода анализа денежных потоков можно отнести простоту расчетов, наглядность получаемых результатов и их достаточную информативность для принятия управленческих решений. Однако данный подход имеет недостатки. Основными из них являются трудность планирования объемов поступлений денежных средств и предстоящих выплат на длительную перспективу с достаточной степенью точности.

Второе направление характеризуется анализом относительных оценок денежного потока на предприятии. При определении финансовой устойчивости целесообразно использовать такие показатели, как рентабельность денежного потока, а также показатели самофинансирования (денежной отдачи инвестиций), обслуживания долга, ликвидности денежного потока, покрытия начисляемых процентов.

Рентабельность денежного потока ($R_{дп}$) определяется по формуле:

$$R_{дп} = ДП/ВР * 100\%, \quad (1)$$

где ДП – денежный поток за анализируемый период;

ВР – выручка от реализации за тот же период.

Если показатель рентабельности потока снижается на фоне стабильной или возрастающей общепринятой рентабельности, рассчитанной на основе прибыли, предприятие может попасть в ситуацию «ножниц» между ростом величины прибыли (а, следовательно, и налоговых обязательств) и наличием денежных средств. От величины этой разницы зависит период скатывания предприятия к банкротству.

Показатель самофинансирования (денежной отдачи инвестиций) ($K_{сф}$) определяется по следующему выражению:

$$K_{сф} = ДП/ИНВ * 100\%, \quad (2)$$

где ИНВ – сумма инвестиций.

$K_{сф}$ показывает, какую часть инвестиций можно компенсировать за счет денежного потока. Чем больше его значение, тем выше уровень самофинансирования предприятия, а следовательно, стабильнее финансовая устойчивость. Дополнительную информацию может дать его сравнение с показателем стоимости инвестиций как источника капитала (отношение финансовых издержек по обслуживанию инвестированного капитала к его сумме). Если показатель стоимости инвестированного капитала превышает $K_{сф}$, то платежеспособность предприятия ухудшается.

Показатель обслуживания долга ($K_{од}$) находится по формуле:

$$K_{\text{од}} = \text{ЗК} / \text{ОДП} * 100\%, \quad (3)$$

где ЗК – заемный капитал;

ОДП – операционный денежный поток от основной деятельности.

Показатель обслуживания долга характеризует способность предприятия погашать свои обязательства за счет денежных средств от основной деятельности. Операционные денежные потоки показывают на рассматриваемый момент времени величину дохода, из которого может быть уплачен долг. $K_{\text{од}}$ определяет количество периодов, необходимых для выплаты задолженности.

Показатель ликвидности денежного потока ($K_{\text{Лдп}}$) рассчитывается следующим образом:

$$K_{\text{Лдп}} = \text{ПДП} / \text{ОДП}, \quad (4)$$

где ПДП и ОДП – соответственно положительный и отрицательный денежные потоки.

Данный показатель, в разрезе отдельных интервалов анализируемого периода, отражает синхронность формирования положительного и отрицательного денежных потоков. Для обеспечения необходимой ликвидности данный показатель должен иметь значение не ниже единицы. Превышение единицы будет генерировать рост остатка денежных активов на конец рассматриваемого периода, то есть способствовать повышению платежеспособности предприятия.

Показатель покрытия начисляемых процентов ($K_{\text{мп}}$) рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{мп}} = \text{ДП} / \text{НП}, \quad (5)$$

где НП – начисленные проценты за кредит.

Данный показатель характеризует способность оплаты начисляемых процентов по кредитам за счёт текущей прибыли. При этом доходы должны значительно превышать начисляемые банковские проценты.

Финансовые показатели в «потоковой» интерпретации, в отличие от тех, которые исчисляются на определенную дату, позволяют строить временные ряды основных оценок и выявить основные тенденции их изменения в зависимости от воздействия внешних и внутренних факторов.

Все вышесказанное свидетельствует о несовершенстве принятой системы анализа, основанной на расчете показателей ликвидности, обеспеченности собственными оборотными средствами и восстановления (утраты) платежеспособности. Указанный метод имеет ограниченное применение, поскольку финансовые показатели предприятий зависят от сферы деятельности, отраслевой принадлежности, внешних факторов, обусловленных государственным регулированием. Применяемые финансовые и налоговые схемы искажают реальную картину состояния предприятия. Поэтому сопоставление показателей не всегда применимо в полном объеме. В частности, среднеотраслевые коэффициенты в отечественной практике отсутствуют.

Таким образом, очевидна настоятельная необходимость дополнять традиционные методы оценки финансовой устойчивости расчетом и анализом показателей на основе денежного потока, разработать новые методы сбора и обработки информации, а также внедрить на предприятиях новые формы отчетности о движении денежных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ хозяйственной деятельности в промышленности / Н.А. Русак. В.И. Стражев, О.Ф. Мигун и др.; Под общ. ред. В.И. Стражева. – 4-е изд., испр. и доп. – Мн.: Вышэйшая школа, 1999. – 398 с. 2. Бланк И.А. Финансовый менеджмент. – К.: Ника-центр, 1999 – 528 с. 3. Быкова Е.В. Показатели денежного потока в оценке финансовой устойчивости предприятия // Финансы. – 2000. – №2. С.56–59 4. Горбунов А.Р. Управление финансовыми потоками и организация финансовых служб предприятий, региональных администраций и банков. – Изд. 2, доп. и переизданное. – М.: Анкил, 2000. – 224 с. 5. Герцог И. Программа выпуска, оборотный капитал и цена компании. // Проблемы теории и практики управления. – 1999. – №3. С. 36–38

УДК 339.187.62

А. И. Старинович

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛИЗИНГА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РБ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Спрос и конкурентоспособность отечественной продукции напрямую зависят от технического уровня производства, от его оснащенности современным оборудованием и технологиями. В условиях сложившегося экономического кризиса промышленность Республики Беларусь столкнулась с проблемой резкого ухудшения состояния основных производственных фондов (ОПФ). Так, по официальным данным Министерства статистики и анализа Республики Беларусь, степень износа ОПФ в промышленности возросла с 46% в 1990 г. до 64% в 1998 г. [1]. Такая ведущая отрасль промышленности, как машиностроение и металлообработка имеет износ активной части ОПФ 75% (рис.1). По неофициальным данным экспертов Всемирного банка, этот показатель по промышленности достигает 80–85% [2].

Средний возраст оборудования в белорусской промышленности приближается к 25 годам, а в США данный показатель составляет 5–7 лет. Доля технологического оборудования, соответствующего мировым стандартам, составляет 18%, а в технологических процессах на уровне мировых стандартов задействовано лишь 4% этого оборудования [3].

Такое положение связано в первую очередь с сокращением объемов финансирования этой отрасли. Так, объем инвестиций в промышленность составил в 1999 г. лишь 55% по сравнению с 1990 г.

Потребности предприятий не могут быть удовлетворены за счет собственных средств. Около 30% производственных предприятий являются убыточными. Кредиторская задолженность превышает дебиторскую почти на 60%. Государственные субсидии, бывшие ранее основным источником инвестирования, также значительно уменьшились. Так, доля республиканского бюджета в общем объеме инвестирования в основной капитал с 1993 г. по 1999 г. сократилась с 22,4% до 11,9%, то есть государство фактически самоустранилось от инвестиционной поддержки промышленных предприятий [4].

Анализ сфер приложения банковского капитала в форме традиционного кредита делает очевидной крайне низкую инвестиционную активность отечественных банков.

Амортизация как основной инструмент для обновления ОПФ, в условиях существующего уровня инфляции перестает выполнять свои функции.



Рис. 1. Динамика изменения величины износа ОПФ.

В результате складывается ситуация, напоминающая замкнутый круг: с одной стороны, предприятия испытывают потребность в реконструкции и техническом перевооружении своего производства, а с другой – традиционные источники капи-

тальных вложений данные потребности удовлетворить не в состоянии, что в конечном итоге ведет к снижению спроса на фондообразующую продукцию и к падению объемов сбыта в отраслях, производящих средства производства. Поэтому сейчас необходимы поиск и применение новых путей инвестирования мероприятий по техническому перевооружению производства и повышению на этой основе их эффективности. Одним из таких источников является лизинг, который все еще не находит должного применения на практике.

Лизинг позволяет предприятию получить оборудование в пользование, не осуществляя при этом на начальной стадии существенных финансовых затрат. При этом для промышленного комплекса будут играть роль две основные функции лизинга:

- производственная – предприятие получает доступ к необходимому ему оборудованию;
- сбытовая – производитель данного оборудования находит дополнительный канал сбыта в форме лизингодателя.

Однако, как показывает анализ, промышленный лизинг в Беларуси абсолютно не развит. Доля лизинговых операций в общем объеме инвестирования в промышленность составляет около 2%. При этом в большинстве западных стран данный показатель достигает 30%.

Основная причина нераспространенности лизинга в промышленности – нежелание лизинговых компаний, которые в большинстве своем являются частными, финансировать долгосрочные проекты промышленных предприятий. Предлагаемые ими процентные ставки довольно высоки и неприемлемы для низкорентабельных предприятий.

Предлагаемый механизм становления и развития лизинга на промышленных предприятиях базируется на создании отдельной структурной единицы – промышленного лизингового фонда (ПЛФ). Основная задача фонда будет заключаться в финансировании проектов промышленных предприятий, которые согласуются с государственными приоритетами развития промышленного комплекса. В настоящее время согласно Программе развития промышленного комплекса Республики Беларусь на 1998–2015 гг. такими приоритетами определены экспортоориентирование, импортозамещение и наращивание инновационного потенциала [5].

ПЛФ будет являться государственной структурой, а источниками формирования фонда будут ассигнования из государственного бюджета, добровольные отчисления заинтересованных министерств, иных республиканских органов государственного управления, предприятий и организаций, граждан, зарубежных фирм и организаций, а также доходы от собственной деятельности фонда (рис. 2).

Оказание лизинговых услуг планируется осуществлять на условиях возвратности и платности. Окончательное решение о целесообразности финансирования будет приниматься в зависимости от объемов инвестирования коллегией или

Правлением фонда с участием Министерства промышленности и Государственного комитета по науке и технологиям.

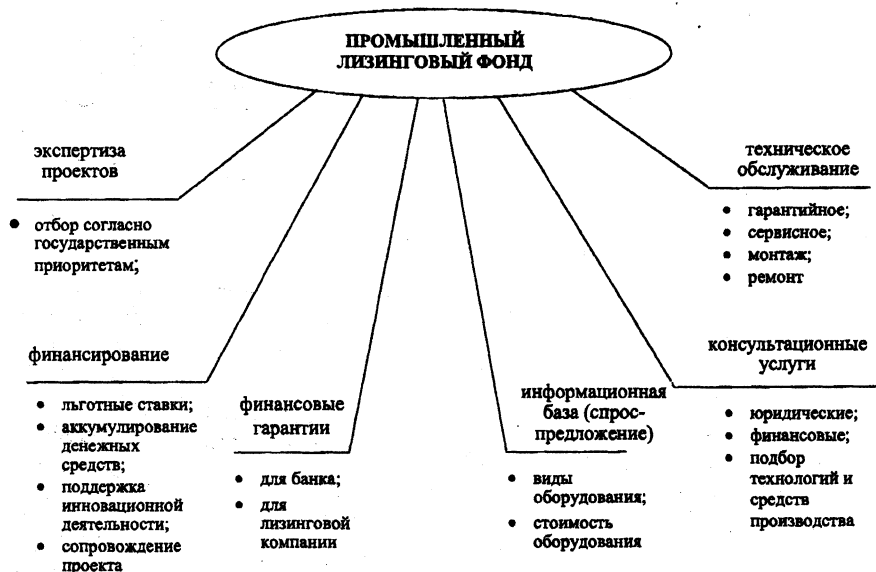


Рис. 2. Задачи промышленного лизингового фонда.

В рамках промышленного лизингового фонда планируется создание координационно-аналитического отдела, который примет на себя функции анализа промышленного комплекса и сформирует информационную базу, содержащую информацию типа «спрос-предложение» по технологическому оборудованию, как новому, так и бывшему в эксплуатации.

Ключевым и основополагающим моментом в успешном осуществлении деятельности системы является отбор проектов. Очень важно, чтобы финансовую поддержку получили именно те предприятия, от которых в первую очередь зависит эффективность национальной экономики. С этой целью предложена матричная схема для отбора проектов, учитывающая государственные приоритеты развития промышленности и позволяющая отобрать к финансированию именно те проекты, актуальность которых для белорусской промышленности является наибольшей.

Отбор необходимо проводить с двух позиций: государственного приоритета и коммерческой выгоды. Поэтому на основании таких показателей, как чистый дисконтированный доход NPV, внутренняя норма рентабельности IRR и период окупаемости инвестиций, на основании коэффициентов взвешивания и оценок каж-

дого параметра определяется интегрированный цифровой показатель коммерческой выгоды, который откладывается на одной из осей матрицы.

Критериями для оценки государственного приоритета являются импортозамещение, экспортоориентация, повышение технического уровня производства и социальная направленность. Оценка данных критериев производится по аналогичной схеме, и ее показатель откладывается на второй оси матрицы.

Матрица поделена на области с различной степенью коммерческой выгоды и государственного приоритета. Полученные по проектам показатели попадают в определенную область, которая указывает на целесообразность финансирования проекта через ПЛФ или через рядовую лизинговую компанию. Использование данной методики отбора позволит также установить контроль за использованием денежных средств.

Предоставление лизинговых услуг должно осуществляться по льготным ставкам. Ставка по лизингу не должна превышать ставку рефинансирования НБ РБ. Устанавливая ее на определенном уровне, ПЛФ сможет регулировать объем лизинговых платежей, а также объем отчислений предприятия в бюджет.

Применение данного организационно-экономического механизма позволит, в первую очередь, открыть доступ промышленным предприятиям к необходимому им фондообразующему оборудованию. Применение лизинговой формы инвестирования позволит тем самым наладить воспроизводство основных фондов, модернизировать производственные мощности и способствовать сбыту производимой продукции в одной из ведущих отраслей экономики РБ – промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленность Республики Беларусь. Статистический сборник / Министерство анализа и статистики РБ. 1999. – С. 52. 2. Мазконтрактлизинг – год на рынке лизинговых услуг // Управление капиталом. – 1998 г. – №7. – С. 31. 3. Петриченко Е.В. Совместные предприятия и экономический рост // Белорусский экономический журнал. – 1998. – №3. – С. 78–85. 4. Статистический ежегодник Республики Беларусь – Мн.: Министерство анализа и статистики РБ, 1999. – С. 391. 5. Концепция и программа развития промышленного комплекса РБ на 1998–2015 гг. (Краткое изложение) // Белорусский экономический журнал. – 1998. – №2. – С. 4–25.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.792

Ракомсин А.П., Сидоренко М.И., Филонов И.П., Исаевич Л.А., Король В.А., Кожуро Л.М. Создание новых наукоемких технологий, оборудования и внедрение их в производство конкурентоспособных автомобилей семейства МАЗ // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16. – С.

Настоящая работа посвящена повышению конкурентной способности автомобилей семейства МАЗ технологическими методами. Предлагаемые новые наукоемкие технологии позволяют повысить долговечность деталей и узлов, улучшить комфортабельность автомобилей, снизить себестоимость их изготовления и привести их в соответствие с требованиями международных стандартов. – Ил. 5.

УДК 621.831

Домбэк З.А., Кане М.М. Управление эмпирическими распределениями размеров деталей при их обработке // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16. – С.

Рассмотрен метод регулирования размеров деталей при их обработке с помощью премиальных коэффициентов, учитывающих требуемый характер распределения. – Ил. 7. Библиогр. 3.

УДК 621.941.01 – 529

Каптальян И.А. Точность размеров и формы деталей, обработанных на токарных ГПМ при кинематической нестабильности режимов резания // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16. – С.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния нестабильности режимов резания, создаваемой преднамеренно с целью повышения виброустойчивости нежестких деталей или кинематического дробления стружки, на точность обработки на токарных ГПМ. – Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 5.

УДК 621.91.002

Маруга С. В., Козерук А. С., Филонов И. П., Климович Ф. Ф. Технология финишной обработки цилиндрических поверхностей деталей // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены особенности притирки цилиндрических поверхностей деталей. Приведена схема устройства для осуществления операции доводки. Разработана математическая модель процесса. – Ил. 1. Библиогр. 4.

УДК 621.91.01:658.562.6

Попок Н.Н., Новоселов Ю.А. Показатель сущностной сложности изделий как критерий выбора машиностроительных изделий для освоения их производства // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16. – С.

Приведено обоснование сложности изделий и определение показателя сложности при выборе изделий станкостроения для освоения их производства. – Ил. 2. Табл. 1. Библиогр. 3.

Серебряков В.И. Анализ процесса и расчет погрешности базирования заготовок при механической обработке // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Приведен анализ процесса установки заготовки на двух его этапах: базирования и закрепления в зависимости от выбранных технологических баз, их качественной и количественной оценки, а также их возможности в управлении погрешностью базирования. – Ил 2. Библиогр. 3.

Скойбеда А.Т., Баханович А.Г., Баханович И.Г. Технологические методы повышения несущей способности и долговечности приводных зубчатых ремней с износостойким покрытием зубьев // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16. – С.

Рассмотрены существующие технологии производства приводных зубчатых ремней и их недостатки. Разработана собственная технология производства ремней методом прессования жесткими элементами (ПЖЭ), позволяющая обеспечить более высокие показатели механических свойств ремней. – Библиогр. 6.

Филонов И.П., Куря Л.В., Вериго Е.Б., Политов И.А. Повышение эффективности применения Интернет-технологий в сферах образования и производства // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены перспективы применения современных средств программного обеспечения в области Интернет-технологий для информационного обеспечения технологической подготовки производства на промышленных предприятиях, а также в образовательном процессе в высших и средних специальных учебных заведениях Республики Беларусь. – Библиогр. 3.

Филонов И.П., Куря Л.В., Кучеров А.В. Перспективы использования современного программного обеспечения CAD-CAM-CAE для решения инженерных и технологических задач на промышленных предприятиях Республики Беларусь // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены перспективы использования современного программного обеспечения CAD-CAM-CAE для решения инженерных и технологических задач на промышленных предприятиях Республики Беларусь. – Ил. 3. Библиогр. 1.

Филонов И.П., Куря Л.В., Ревяко В.С., Шавель А.В. Использование интегрированных программных пакетов при проектировании и анализе технологических процессов // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16. – С.

Рассмотрены особенности использования интегрированных программных пакетов для проектирования и расчета технико-экономических параметров технологических процессов. Проанализированы возможности совместного использования разработанных программ экономического расчета совместно с современным CAD-CAM-обеспечением. – Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 681.3:621.382:519.68

Колешко В.М. Разработка интеллектуальных машин, технологий и систем // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16. – С.

Рассмотрены вопросы инженерии знаний при обучении студентов, аспирантов и докторантов по направлению интеллектуальных приборов, машин, технологий и производств. – Ил. 4, Библиогр. 2.

УДК 621.37.39:534

Колешко В.М., Баркалин В.В., Полюнкова Е.В. Управление акустическим полем в микроэлектромеханических сенсорных системах // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16. – С.

Рассмотрены основные факторы контроля и управления акустическим полем в микроэлектромеханических акустоэлектронных системах с точки зрения интеллектуализации последних. Ил.1. Табл. 3. Библиогр. 7.

УДК 621.37.39:534

Колешко В.М., Баркалин В.В., Полюнкова Е.В. Элементная база микро-электромеханических сенсорных систем на поверхностных акустических волнах // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены проблемы создания акустоэлектронных интегральных сенсорных микросхем и их использование в качестве элементной базы микроэлектромеханических сенсорных систем. Ил. 2. Табл. 2. Библиогр. 14.

УДК 621.75.002:51

Кусков Д.В. Основы теории принципа работы шагового двигателя. Область применения // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены основы теории принципа работы шагового двигателя, область его применения. – Ил. 2. Библиогр. 4.

УДК 621.9.06-229.001.63(075.8)

Пашкевич М.Ф., Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Пашкевич В.М. Поводковое измерительное устройство для систем адаптивного управления технологическими процессами // Машиностроение. – Мн., 2000.- Вып. 16. – с.

Описана конструкция поводкового измерительного центра, служащего для передачи вращения от шпинделя станка к детали и одновременного измерения момента, скорости вращения и мощности резания. – Ил. 3. Библиогр. 3

УДК 658.652:681.178

Пашкевич В.М., Пашкевич М.Ф. Информационная система для исследований кинематической погрешности передач в сборе // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрена автоматизированная система для исследований кинематической погрешности и определения состояния передач. Система может быть использована для адаптивного управления параметрами технологического процесса изготовления передач. – Ил.1. Библиогр. 3.

УДК 621.9

Фельдштейн Е.Э. Современные тенденции в контроле состояния режущих инструментов на автоматизированном оборудовании // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены способы контроля состояния режущих инструментов на автоматизированном оборудовании и перспективы их использования. – Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 3

УДК 621.83.065

Филонов И.П., Вериго Е.Б. Исследование точности позиционирования и позиционной повторяемости сборочного центра с шаговым электроприводом // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Проведены экспериментальные исследования точности позиционирования и позиционной повторяемости сборочного центра с линейным шаговым электроприводом в соответствии со стандартом ISO/DIS 9283. По результатам экспериментальных исследований приведены зависимости точности позиционирования и позиционной повторяемости от внешней нагрузки вдоль заданной координаты и полигон позиционирования по координате Y линейного шагового электропривода сборочного центра. Рассмотрены пути повышения точностных характеристик позиционирования сборочного центра на базе линейного шагового электропривода. – Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.924.8+621.787.4

Баршай И. Л. Влияние иглофрезерование на физико-механические свойства поверхностного слоя материала деталей машин // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены особенности формирования физико-механических свойств поверхностного слоя материала деталей машин при иглофрезеровании. Приводятся опытно-статистические модели влияния параметров режима иглофрезерования на изменение физико-механических свойств поверхностного слоя. – Ил. 2.

УДК 621.91.04

Данилов В.А., Данилова Л.А., Киселев Р.А. Анализ схем обработки поверхностей с периодически повторяющимся зубчатым профилем при непрерывном процессе деления // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрена кинематика формообразования прерывистых поверхностей в виде равномерно расположенных пазов на торцах деталей. Даны рекомендации по заданию параметров схем обработки. – Ил.3. Библиогр. 2.

УДК 621.91.04

Данилов В.А., Терентьев В.А. Системная модель способа зубообработки как средство его интенсификации на этапе синтеза // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрена системная модель способа зубообработки, построенная на основе деления основной функции системного объекта. Приведена древовидная схема модели, поставленная в соответствие с этапами проектирования способа зубообработки. – Ил. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.915

Куптель В.Г. Стойкость режущего инструмента при вибрационном точении // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены вопросы обеспечения стойкости инструмента при вибрационном точении деталей из различных материалов. Определены оптимальные по критерию стойкости инструмента уровни амплитуд колебаний для различных частотных диапазонов. – Ил. 3, Библиогр. 2.

УДК 621.9

Михайлов М.И. К вопросу о методике моделирования кинематических поверхностей, сформированных режущим инструментом по различным схемам формообразования // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Содержит методику моделирования кинематических поверхностей полученных режущими инструментами. Приведена классификация кинематических поверхностей для различных схем формообразования. Раскрыты способы упрощенной записи кинематических поверхностей, полученных по схемам следа, огибания и комбинированной. Приведена параметризация сложных кинематических поверхностей. – Ил. 1. Библиогр. 13.

УДК 621.941-529.004

Туромша В.И. Точение деталей сложной формы с переменной глубиной резания // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Получены математические модели для определения периода стойкости и величины износа инструмента при точении деталей сложной формы (сферических, конических, фасонных) с пере-

менной глубиной резания. Экспериментальная проверка моделей подтверждает их высокую точность. – Ил. 2. Библиогр. 1.

УДК 621.9.01+669.15

Беляева Г.И., Кочергин А.И. Влияние тонкой кристаллической структуры сталей на их обрабатываемость резанием // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

На основе опытов сделан вывод о возможности использования в будущем в качестве возможных косвенных показателей обрабатываемости параметров тонкой кристаллической структуры сталей (плотности дислокаций, величины блоков мозаики и т. д.). – Ил. 7. табл. 2.

УДК 621.9.048.7

Беляев Г.Я., Крайко С.Э. Геометрические характеристики качества рабочих поверхностей штампового инструмента, обработанного лучом лазера // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Приводятся результаты исследования микрогеометрии поверхностей, обработанных лазерным лучом в режиме импульсного упрочнения. Показано что, лазерное упрочнение проведенное при оптимальных режимах способствует увеличению несущей способности шероховатости поверхности и уменьшает высотные параметры, что наряду с увеличением микротвердости поверхностных слоев, приводит к повышению стойкости рабочих поверхностей штампового инструмента.- Ил. 4. Библиогр. 7.

УДК 621.789 – 977

Беляев Г.Я., Сакович Н.А. Триботехнические свойства металлопокрытий, упрочненных поверхностной термомеханической обработкой. // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Приведены результаты экспериментальных исследований триботехнических свойств металлопокрытий, упрочненных термомеханической обработкой (ТМО). Показано, что в результате ТМО износ и коэффициент трения металлопокрытий по сравнению с обычной закалкой уменьшаются.- Ил. 2. Библиогр. 3.

УДК 621.789 – 977

Беляев Г.Я., Сакович Н.А. Влияние поверхностной термомеханической обработки металлопокрытий на температуру нагрева образцов при трении. // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Приведены результаты исследований температуры нагрева образцов металлопокрытий, упрочненных поверхностной термомеханической обработкой (ПТМО). Показано, что в результате ПТМО металлопокрытий значительно уменьшается температура нагрева образцов по сравнению с обычной закалкой, что способствует уменьшению работы трения и увеличению их износостойкости.- Ил. 1. Библиогр. 1.

Беляев Г.Я., Сиянькевич Ю.В. Основные направления совершенствования технологии электроимпульсного полирования коррозионностойких сталей // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Приводятся результаты исследования фазового состава и микроструктуры коррозионностойких сталей 20Х13 и 12Х18Н10Т, обработанных методом электроимпульсного полирования. Показано, что введение в состав электролита органических комплексообразователей обеспечивает равномерность растворения основных структурных составляющих этих сталей и повышает качество поверхности. – Ил. 2. Библиогр. 1.

Буглаев А.М., Шуленина Т.И. Некоторые особенности лазерного упрочнения твердосплавных деталей штампов // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16. – С.

Рассмотрен способ увеличения стойкости твердосплавных деталей штампов при воздействии на них лазерного излучения. На основании выполненных исследований установлено, что, варьируя режимами лазерной обработки, можно, наряду с улучшением эксплуатационных показателей работоспособности поверхностей с переменным уровнем отражательной способности, добиться улучшения характеристик качества рабочих поверхностей твердосплавных деталей штампов. – Ил. 3. Табл. 1.

Девоyno О.Г., Кочеров А.Л., Пилипчук А.П. Моделирование многомодового излучения лазера как этап синтеза технологии оплавления газотермических покрытий // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Статья посвящена изложению оригинального способа моделирования распределения интенсивности лазерного излучения многомодового лазера. Решение данной задачи позволяет с помощью уравнения теплопроводности научно обоснованно выполнить синтез технологии оплавления покрытий газоплазменного напыления. Сформулированы необходимые условия применимости предлагаемого способа, обсуждены пути параметризации описываемых моделей. На примере экспериментального распределения интенсивности технологического лазера продемонстрированы недостатки традиционных подходов моделирования, а также этапы применения предлагаемого способа. – Ил. 2. Библиогр. 7.

Кожуро Л.М., Хилько Д.Н., Кольцов А.Н. Моделирование магнитного поля в технологической зоне электромагнитной наплавки // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16. – С.

Проведено моделирование магнитного поля в технологической зоне электромагнитной наплавки цилиндрических деталей с использованием уравнения Лапласа. Получены аналитичес-

кие выражения, позволяющие рассчитать величину магнитной индукции и ее градиент в любой точке пространства технологической зоны. – Ил. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.792

Мрочек Ж.А., Ракомсин А.П., Кожуро Л.М., Хилько Д.Н. Теплофизическая модель процесса формирования покрытия при электромагнитной наплавке // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Приведено решение задачи кристаллизации жидкой частицы при электромагнитной наплавке. Полученные результаты позволяют количественно оценить влияние основных теплофизических параметров материалов покрытия и основы на продолжительность цикла термического взаимодействия. – Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 674.055.004.62./63

Е.А. Памфилов, П.Г. Пыриков, А.С. Рухлядко Использование магнитных эффектов для повышения эффективности эксплуатации деревообрабатывающего оборудования и инструмента // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены особенности управления прочностными свойствами металлических материалов в области магнитной восприимчивости и, в частности, магнитной анизотропии. Рассмотрено влияние указанного фактора на возможности обеспечения направленной (регламентированной) кристаллизации металлов при упрочнении высокоэнергетическими источниками.

УДК 674.05:621.9.02

Сиваков В.В., Грядунов С.С. Применение упрочняющей обработки для повышения износостойкости инструмента, работающего в условиях климатически низких температур // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены условия эксплуатации инструмента при низких климатических температурах и при резании мерзлой древесины, причины выхода из строя и высокоэффективные способы упрочняющей обработки для увеличения его износостойкости. Проведенный анализ результатов экспериментов показал, что в результате применения комплексного упрочнения, заключающегося в электроискровом легировании и последующем многократном плазменном воздействии, происходит формирование высокого уровня физико-механических характеристик поверхностных слоев, и повышает износостойкость инструмента. – Ил. 2.

УДК 691.175

Спиридонов Н.В., Володько А.С., Пилецкая Л.И., Степук Д.В. Декоративные полимерные покрытия для защиты различных конструкций // Машиностроение. – Мн., 2000. Вып. 16. – С.

Рассмотрены особенности нанесения защитно-декоративных композиций из полимерных материалов. – Ил. 3. Библиогр. 1.

Спиридонов Н.В. Композиционные армированные газотермические покрытия для вытяжки проволоки // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Разработан состав и особенности формирования износостойких покрытий на основе самоплюсующегося сплава и карбида вольфрама. – Библиогр. 1.

УДК 674.055:621.914.02

Ульянов А.А., Петренко Н.М. Повышение износостойкости фрезерного инструмента для обработки цельной древесины // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Разработан метод комплексной упрочняющей обработки, включающий в себя направленное упругое деформирование поверхностных слоев в зоне упрочнения, электроискровое легирование, последующее снятие нагрузки и доводки упрочненной поверхности эластичным шлифованием. Приведены результаты исследований стойкости ножей из сталей 8Х6НФТ и Р6М5 сборных фрез для обработки древесины. – Ил. 1.

УДК 621.793.1

Фролов И.С., Мрочек Ж.А., Иващенко С.А. Исследование пористости вакуумных электродуговых конденсатов // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Проведены исследования сквозной пористости вакуумных электродуговых покрытий. Установлены факторы, влияющие на пористость покрытия. Определены оптимальные параметры и предложены технологические приемы, обеспечивающие минимальную пористость вакуумных электродуговых покрытий. – Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 7.

УДК 621.792

Ящерицын П.И., Ракомсин А.П., Филонов И.П., Кожуро Л.М. Повышение конкурентоспособности изделий технологическими методами // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрено повышение долговечности деталей машин методом электромагнитной наплавки с последующим поверхностным пластическим деформированием. Исследования показали, что применение данного метода для упрочнения или восстановления деталей, работающих в условиях повышенного абразивного изнашивания и циклического нагружения, позволяет увеличить их износостойкость и усталостную прочность. – Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 6.

УДК 539.3

Авдошка И.В. О распространении изгибных волн в вязкоупругой некруговой цилиндрической оболочке // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассматривается задача о движении тонкой некруговой вязкоупругой цилиндрической оболочки с кусыми краями после сообщения ей начальных перемещений и скоростей, локализованных в окрестности некоторой образующей. Строится асимптотическое решение в виде наложенных бегущих в окружном направлении пакетов изгибных волн. – Ил. 1. Библиограф. 3.

Акимов В.А. Использование операторов бесконечно высокого порядка при построении общих задач теории упругости // *Машиностроение*. – Мн., 2000. – Вып. 16.– С.

В статье рассматривается метод представления общего решения уравнений эластокинетики посредством операторов бесконечно высокого порядка. В качестве иллюстрации данного метода рассматривается задача о распространении плоской волны в неограниченном упругом слое толщины $2h$. Волна движется вдоль слоя в положительном направлении оси x . – Библиогр. 2.

Беляев Г.Я., Головаченко А.Ф. Моделирование начала процесса трения // *Машиностроение*. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены особенности разрушения поверхностей трения деталей машин в начале движения двух трущихся тел. Предложена модель структуры поверхности трения и два типа ее разрушения, на основе которой даны приближенные методы определения напряжений и сил разрушения микронеровностей трущихся поверхностей. – Ил. 4. Библиогр. 7.

Василевич Ю.В., Курбачев А.В. Исследование эффективности виброизолирующего экрана в среде распространения продольных и поперечных волн // *Машиностроение*. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Решена задача о виброизоляции продольной и поперечной волн тонкой плитой в упругом изотропном пространстве. Дан анализ волновых полей и получены условия оптимального функционирования плиты как эффективного виброизолирующего экрана. – Ил. 1., Библиогр. 2.

Крушевский А.Е., Лудеманн Т.А. Уточненная теория динамики пластин // *Машиностроение*. – Мн., 2000. – Вып. 16.– С.

В данной статье рассматривается новый подход вывода уравнений уточненной теории динамики тонких пластин. Теория пластин более точная, если удовлетворить все краевые условия на торцах. Данное условие выполняется на базе рядов по полиномам Лежандра с использованием вариационного уравнения равновесия элементарного столбика. – Библиогр. 6.

Лабер С. Влияние состояния поверхностного слоя на сопротивление схватыванию серого чугуна // *Машиностроение*. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены результаты исследований поверхностного слоя сфероидального ферритного чугуна после шлифования и обкатки, а также результаты исследований на сопротивление схватыванию. Показано, что на сопротивление схватыванию влияет технология обработки поверхности, особенно она

зависит от характеристик поверхностного слоя. Накатанные поверхности по сравнению со шлифованными характеризуются повышенным сопротивлением схватыванию. – Ил. 3. Табл. 2. Библиогр. 5.

УДК 531.1:621.01]:681.3 (075.8)

Носов В.М. Комплексное использование на ПК аналитических и численных расчетов в курсе теоретической механики // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены особенности совместного использования на ПК систем аналитических вычислений (CAV) REDUCE и DERIVE. Разработана методика их совместного использования, которая с дополнением текстового процессора типа Word организует рабочее место исследователя для студента и инженера, сравнимое с самыми сложными современными интегрированными пакетами. – Ил. 3. Библиогр. 3.

УДК 621.762.4:539

Сидоров В.А., Хмелев А.А. Деформационная модель уплотнения аморфных и мелкокристаллических материалов // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Предложена новая деформационная модель уплотнения аморфных и мелкокристаллических материалов, в основу которой положена гипотеза о том, что скорость прироста контактного сечения, полученного за некоторый промежуток, пропорциональна степени деформации сдвига, накопленной к рассматриваемому моменту. Модель учитывает влияние схемы напряженного состояния и термодинамические условия нагружения. Поверхность пластичности зависит от истории деформирования и не является фиксированной. – Ил. 1. Библиогр. 4.

УДК 539.3

Соколовский Г.С. Метод решения задачи деформирования биметаллической полосы при ползучести // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассматривается задача ползучести биметаллической полосы при нагреве с растяжением. Решение основывается на реологическом уравнении модели Бюргерса, взятом в дифференциальной форме. Интегрирование системы дифференциальных уравнений методом Эйлера позволило определить при начальных условиях полную деформацию полосы при ползучести. – Библиогр. 2.

УДК 539.3

Соколовский Г.С. Методика определения характеристик ползучести в реологических уравнениях состояния // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Предлагаемая методика позволяет, используя экспериментальную кривую ползучести однородного материала, графо-аналитическим способом определить упругие, вязко-упругие и вязкие характеристики материала. Полученные результаты могут быть использованы при расчетах напряженно-деформированного состояния биметаллических полос при нагреве. – Ил. 2. Библиогр. 1.

Тульева М.В., Чигарев А.В. Влияние отверстий на устойчивость стержней под действием нагрузки и собственного веса // Машиностроение. – Мн., 2000 – Вып. 16. – С.

Рассмотрено влияние на устойчивость стержня, находящегося под действием нагрузки и собственного веса, одного и двух отверстий. – Ил. 1. Табл. 5, Библиогр. 2.

УДК 620.178.7: 669.14

Хмелев А. А., Сидоров В. А. Об удельной работе пластического деформирования стали, как критерии оценки ее качества // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрен вопрос введения значения удельной работы пластического деформирования при ударном изгибе в качестве критерия оценки склонности стали к хрупкому разрушению. Приведена зависимость значения удельной работы пластического изгиба стандартного образца. – Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 532.135:537.212

Носов В.М. Влияние момента сопротивления на механические характеристики вращения непроводящих тел в электрореологических суспензиях // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены особенности измерения вращающего момента непроводящих осесимметричных тел в электростатических полях. Разработан прямой метод измерения прикладываемого момента сопротивления, вызванного регулируемой силой трения. Результаты исследования могут быть использованы при создании реоэлектрических микродвигателей для приборостроения и измерительной техники. – Ил. 1. Библиогр. 4.

УДК 681.3 (082):539.1

Громыко О.В. Конечно-разностные соотношения при расчете тонкостенных элементов конструкций // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Приведен алгоритм автоматической генерации конечно-разностных соотношений произвольного порядка точности. Представлены числовые значения матриц дифференцирования для полиномов порядка от первого до пятого. Получены конечно-разностные соотношения для производных высоких порядков. – Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 3.

УДК 539.22.002.3

Громыко О.В. Экспериментальное исследование колебаний несущей фермы радиотелескопа // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Приведена схема экспериментальной установки и методика испытаний антенного блока радиотелескопа на собственные колебания. Представлены результаты экспериментального исследования частот, форм и декрементов затухания свободных колебаний конструкции РТ-5. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр. 3.

УДК 339.137.2:631.37.002

Лузан Д.И., Тарасевич А.И. **Выбор и обоснование показателей конкурентоспособности тракторной техники** // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Систематизированы и обоснованы наиболее значимые показатели конкурентоспособности тракторной техники, рассчитаны резервы улучшения этих показателей, а также текущие и единовременные затраты на их реализацию. Предложены критерии эффективности обеспечения конкурентоспособности, применимые для оценки тракторной техники в условиях рыночных отношений. – Табл. 2. Библиогр. 8.

УДК 338.5:631.37.002

Похабов В.И., Лузан Д.И. **Обоснование лимитных цен на продукцию машиностроения на стадии проектирования** // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены особенности формирования лимитных цен на тракторную технику в рыночных условиях. Разработана методика расчета лимитных цен тракторов на стадии их проектирования. – Ил. 3. Библиогр. 7.

УДК 658.14

Похабов В. И., Ридлевич Р. О. **Разработка динамических систем оценки финансового состояния предприятия** // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Рассмотрены преимущества и недостатки существующей системы показателей оценки финансовой устойчивости предприятия, определяемой на основе коэффициентов ликвидности, финансовой устойчивости и обеспеченности оборотным капиталом. Обоснована целесообразность дополнения традиционного метода анализа анализом денежного потока предприятия. Разработан ряд показателей оценки финансового положения предприятия на основе денежного потока. – Ил. 1. Библиогр. 5.

УДК 339.187.62

Старинович А.И. **Организационно-экономический механизм обеспечения лизинга на промышленных предприятиях РБ** // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып. 16. – С.

Разработан организационно-экономический механизм обеспечения лизинга машин и оборудования на промышленных предприятиях РБ. – Ил. 2. Библиогр. 5.

ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРА

Петр Иванович Ящерицын

Исполнилось 85 лет академику НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору, лауреату Государственной премии БССР, заслуженному деятелю науки и техники БССР Петру Ивановичу Ящерицыну.

Петр Иванович Ящерицын родился 30 июня 1915 года в г. Людиново Калужской области. В 15-летнем возрасте начал трудовую деятельность. В 1937–1941 гг. учился в Брянском машиностроительном институте. После окончания института был направлен на работу на Государственный подшипниковый завод №6 в г. Свердловске. В годы Великой Отечественной войны работал на этом заводе старшим мастером, начальником цеха, главным технологом. В 1949 г. Петр Иванович Ящерицын назначен главным инженером завода.



В 1952–1962 гг. Петр Иванович Ящерицын – директор Государственного подшипникового завода №11 в г. Минске, в 1962–1976 гг. – ректор Белорусского политехнического института (ныне БГПА). В 1963–1984 гг. заведующим кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» этого института.

В 1976–1987 гг. Петр Иванович Ящерицын – академик-секретарь Отделения физико-технических наук Академии наук Беларуси, одновременно заведующий лабораторией физики поверхностных явлений Физико-технического института Академии наук.

Петр Иванович Ящерицын является крупнейшим ученым в области технологии машиностроения. Он один из основоположников теории технологической наследственности. Выполнил фундаментальные исследования методов управления технологической наследственностью при абразивной и других финишных процессах обработки деталей машин. Школа белорусских ученых, возглавляемая П.И. Ящерицыным, разрабатывает научные основы физических и физико-химических явлений в процессе формирования обрабатываемых поверхностей, развивает методы

управления эксплуатационными свойствами изделий с учетом технологической наследственности, создает новые высокоэффективные процессы обработки материалов, а также инструменты и оборудование для их выполнения.

Широкую известность получили научные труды Петра Ивановича Ящерицына в области физико-химических основ резания металлов, новых видов инструментов для упрочняющей обработки, закономерностей изнашивания режущих инструментов, процессов полирования изделий уплотненным потоком свободного абразива, шлифования инструментами с ориентированными алмазными зернами, полирования шариков в ультразвуковом поле. Они не только существенно обогатили научные основы технологии машиностроения, но нашли широкое применение в производстве.

По результатам научных исследований Петром Ивановичем Ящерицыным опубликовано более 560 научных работ, в том числе более 30 монографий, получено 180 авторских свидетельств СССР и патентов Республики Беларусь на изобретения, 15 патентов других стран.

Как ректор Белорусского политехнического института, заведующий кафедрой и профессор П.И. Ящерицын много сделал в области подготовки инженерных кадров, совершенствования системы образования. Лекции по теории резания и технологии машиностроения, которые он читает более 40 лет, отличаются высоким научным уровнем и логической стройностью. По учебникам и учебным пособиям Петра Ивановича учатся многие сотни студентов.

Огромен труд Петра Ивановича по подготовке специалистов высшей квалификации. Под его научным руководством подготовлено 16 докторов наук и 87 кандидатов наук.

За большие заслуги перед народом Петр Иванович Ящерицын награжден орденами Ленина, Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, Дружбы народов, медалями. Он избирался в высшие выборные органы Беларуси.

Все, кто работает и общается с Петром Ивановичем, студенты и аспиранты знают его как человека с огромными знаниями, богатым жизненным опытом, всегда доброжелательного и активного.

Желаем Петру Ивановичу Ящерицыну доброго здоровья, дальнейшей плодотворной работы и благополучия.

Редколлегия сборника "Машиностроение"

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ.....	3
Ракомсин А.П., Сидоренко М.И., Филонов И.П., Исаевич Л.А., Король В.А., Кожуро Л.М. Создание новых наукоемких технологий, оборудования и внедрение их в производство конкурентоспособных автомобилей семейства МАЗ	3
Домбэк З.А., Кане М.М. Управление эмпирическими распределениями размеров деталей при их обработке	13
Каштальян И.А. Точность размеров и формы деталей, обработанных на токарных ГПМ при кинематической нестабильности режимов резания	20
Маруга С. В., Козерук А. С., Филонов И. П., Климович Ф. Ф. Технология финишной обработки цилиндрических поверхностей деталей	26
Попок Н.Н., Новоселов Ю.А. Показатель сущностной сложности изделий как критерий выбора машиностроительных изделий для освоения их производства	31
Серебряков В.И. Анализ процесса и расчет погрешности базирования заготовок при механической обработке	37
Скойбеда А.Т., Баханович А.Г., Баханович И.Г. Технологические методы повышения несущей способности и долговечности приводных зубчатых ремней с износостойким покрытием зубьев	43
Филонов И.П., Курч Л.В., Вериге Е.Б., Политов И.А. Повышение эффективности применения Интернет-технологий в сферах образования и производства	46
Филонов И.П., Курч Л.В., Кучеров А.В. Перспективы использования современного программного обеспечения CAD-CAM-CAE для решения инженерных и технологических задач на промышленных предприятиях Республики Беларусь	50
Филонов И.П., Курч Л.В., Ревяко В.С., Шавель А.В. Использование интегрированных программных пакетов при проектировании и анализе технологических процессов	55
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ...59	
Колешко В.М. Разработка интеллектуальных машин, технологий и систем ..	59
Колешко В.М., Баркалин В.В., Полюнкова Е.В. Управление акустическим полем в микроэлектромеханических сенсорных системах	66

Колешко В.М., Баркалин В.В., Полинкова Е.В. Элементная база микроэлектро-механических сенсорных систем на поверхностных акустических волнах	72
---	----

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

Кусков Д.В. Основы теории принципа работы шагового двигателя. Область применения	79
--	----

Пашкевич М.Ф., Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Пашкевич В.М. Поводковое измерительное устройство для систем адаптивного управления технологическими процессами	84
--	----

Пашкевич В.М., Пашкевич М.Ф. Информационная система для исследований кинематической погрешности передач в сборе	88
---	----

Фельдштейн Е.Э. Современные тенденции в контроле состояния режущих инструментов на автоматизированном оборудовании	93
--	----

Филонов И.П., Вериге Е.Б. Исследование точности позиционирования и позиционной повторяемости сборочного центра с шаговым электроприводом	99
--	----

ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Баршай И. Л. Влияние иглофрезерование на физико-механические свойства поверхностного слоя материала деталей машин	105
---	-----

Данилов В.А., Данилова Л.А., Киселев Р.А. Анализ схем обработки поверхностей с периодически повторяющимся зубчатым профилем при непрерывном процессе деления	109
--	-----

Данилов В.А., Терентьев В.А. Системная модель способа зубообработки как средство его интенсификации на этапе синтеза	115
--	-----

Куптель В.Г. Стойкость режущего инструмента при вибрационном точении	120
---	-----

Михайлов М.И. К вопросу о методике моделирования кинематических поверхностей, сформированных режущим инструментом по различным схемам формообразования	125
--	-----

Туромша В.И. Точение деталей сложной формы с переменной глубиной резания	133
--	-----

Беляева Г.И., Кочергин А.И. Влияние тонкой кристаллической структуры сталей на их обрабатываемость резанием	138
---	-----

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ	146
Беляев Г.Я., Крайко С.Э. Геометрические характеристики качества рабочих поверхностей штампового инструмента, обработанного лучом лазера	146
Беляев Г.Я., Сакович Н.А. Триботехнические свойства металлопокрытий, упрочненных поверхностной термомеханической обработкой	149
Беляев Г.Я., Сакович Н.А. Влияние поверхностной термомеханической обработки металлопокрытий на температуру нагрева образцов при трении	153
Беляев Г.Я., Синькевич Ю.В. Основные направления совершенствования технологии электроимпульсного полирования коррозионноустойчивых сталей	156
Буглаев А.М., Шуленина Т.И. Некоторые особенности лазерного упрочнения твердосплавных деталей штампов	159
Девойно О.Г., Кочеров А.Л., Пилипчук А.П. Моделирование многомодового излучения лазера как этап синтеза технологии оплавления газотермических покрытий	163
Кожуро Л.М., Хилько Д.Н., Кольцов А.Н. Моделирование магнитного поля в технологической зоне электромагнитной наплавки	169
Мрочек Ж.А., Ракомсин А.П., Кожуро Л.М., Хилько Д.Н. Теплофизическая модель процесса формирования покрытия при электромагнитной наплавке	173
Памфилов Е.А., Пыриков П.Г., Рухлядко А.С. Использование магнитных эффектов для повышения эффективности эксплуатации деревообрабатывающего оборудования и инструмента	178
Сиваков В.В., Грядун С.С. Применение упрочняющей обработки для повышения износостойкости инструмента, работающего в условиях климатически низких температур	180
Спиридонов Н.В., Володько А.С., Пилецкая Л.И., Степук Д.В. Декоративные полимерные покрытия для защиты различных конструкций	183
Спиридонов Н.В. Композиционные армированные газотермические покрытия для вытяжки проволоки	188
Ульянов А.А., Петренко Н.М. Повышение износостойкости фрезерного инструмента для обработки цельной древесины	191
Фролов И.С., Мрочек Ж.А., Иващенко С.А. Исследование пористости вакуумных электродуговых конденсатов	194

Ящерицын П.И., Ракомсин А.П., Филонов И.П., Кожуро Л.М. Повышение конкурентоспособности изделий технологическими методами	198
ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН	204
Авдошка И.В. О распространении изгибных волн в вязкоупругой некруговой цилиндрической оболочке	204
Акимов В.А. Использование операторов бесконечно высокого порядка при построении общих задач теории упругости	210
Беляев Г.Я., Головаченко А.Ф. Моделирование начала процесса трения двух тел ...	214
Василевич Ю.В., Курбачев А.В. Исследование эффективности виброизолирующего экрана в среде распространения продольных и поперечных волн	219
Крушевский А.Е., Лудеманн Т.А. Уточненная теория динамики пластин	225
Лабер С. Влияние состояния поверхностного слоя на сопротивление схватыванию серого чугуна	229
Носов В.М. Комплексное использование на ПК аналитических и численных расчетов в курсе теоретической механики	236
Сидоров В.А., Хмелев А.А. Деформационная модель уплотнения аморфных и мелкокристаллических материалов	244
Соколовский Г.С. Метод решения задачи деформирования биметаллической полосы при ползучести	250
Соколовский Г.С. Методика определения характеристик ползучести в реологических уравнениях состояния	252
Тульева М.В., Чигарев А.В. Влияние отверстий на устойчивость стержней под действием нагрузки и собственного веса	255
Хмелев А. А., Сидоров В. А. Об удельной работе пластического деформирования стали как критерия оценки ее качества	260
Носов В.М. Влияние момента сопротивления на механические характеристики вращения непроводящих тел в электрореологических суспензиях	263
Громыко О.В. Конечно-разностные соотношения при расчете тонкостенных элементов конструкций	266
Громыко О.В. Экспериментальное исследование колебаний несущей фермы радиотелескопа	271

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ	279
Лузан Д.И., Тарасевич А.И. Выбор и обоснование показателей конкурентоспособности тракторной техники	279
Похабов В.И., Лузан Д.И. Обоснование лимитных цен на продукцию машиностроения на стадии проектирования	283
Похабов В. И., Ридлевич Р. О. Разработка динамических систем оценки финансового состояния предприятия	288
Старинович А.И. Организационно-экономический механизм обеспечения лизинга на промышленных предприятиях РБ	293
РЕФЕРАТЫ	298
Поздравляем юбиляра	311

Научное издание

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Выпуск 16

Сдано в набор 1.12.2000 г.

Подписано к печати 16.12.2000 г.

Ответственный за выпуск *А. П. Аношко*

Технический редактор *Ю. А. Евсюкова*

Корректор *Н. Ф. Крицкая*

Печать офсетная. Бумага офсетная.

Формат 60х84/16.

Усл. печ. л 18,48. Тираж 250 экз. Зак. 488.

Налоговая льгота - по ОКРБ 007-98 ч.1 22.11.20.500

Издано на УП "Технопринт".

Лицензия ЛВ № 380 от 28.04.99.

Отпечатано в типографии УП "Технопринт".

Лицензия ЛП № 203 от 26.01.98.

220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65, к. 14, оф. 215.

Тел./факс 231-86-93.