

В. А. Колмыков, Л. А. Ковригин,  
И. С. Ефремов, Е. Ю. Поликарпов,  
Н. В. Полухин, А. В. Ширяев,  
А. Г. Овчинников, С. П. Яковлев,  
С. С. Яковлев, В. Н. Чудин

**КОМПЛЕКСЫ ТЕХНОЛОГИЙ  
И НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
ОСОБО ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ  
АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*На основе прикладных исследований теории обработки металлов давлением создана научная база для проектирования, анализа и расчета технологических параметров процессов деформирования анизотропных материалов при изготовлении ответственных деталей машиностроения, позволяющая определять силовые параметры, учитывать условия деформирования и свойства обрабатываемого материала, оценивать предельные возможности формоизменения, определять показатели качества изготавливаемого изделия, назначать параметры технологического процесса с учетом условий эксплуатации изделия. Приведены примеры внедрения полученных результатов исследований в промышленность.*

В настоящее время проблемой машиностроения является повышение эффективности и конкурентоспособности технологических процессов производства с обеспечением высоких эксплуатационных характеристик изделий, что наиболее актуально для ракетно-космической техники. Решение этой проблемы связано с технологиями обработки материалов давлением. Высокий уровень сложности и уникальности технологических процессов изготовления таких изделий обуславливает необходимость серьезного научного обеспечения.

К типовым конструкциям ракетно-космической техники относятся: корпусные оболочки цилиндрической, сферической, сфероконической, эллиптической и оживальной форм, оболочки камер сгорания, сферические сосуды, работающие под высоким давлением, сферические и тороидальные оболочки емкостей горючего и окислителя, элементы трубопроводных систем и аппаратуры. Заготовки и детали, полученные обработкой давлением, являются важнейшими элементами корпусных конструкций, систем жизнеобеспечения, терморегулирования, пневмогидросистем, электропитания и всех двигательных систем ракетной техники (рис. 1 и 2, см. 3-ю и 4-ю полосы обложки).

Особенность конструкций указанных изделий — их технологическое подобие, обусловленное едиными геометрическими формами,

тонкостенностью и использованием в них легких высокопрочных сплавов. Это, в свою очередь, обеспечивает единство и уникальность научных подходов при разработке технологических процессов, модернизации изделий, освоении новых конструкционных материалов на всех этапах производства.

Прокат, используемый для изготовления изделий, обладает анизотропией механических характеристик, которая проявляется как при холодном пластическом деформировании, так и при деформировании в режиме кратковременной ползучести, и оказывает существенное влияние на силовые, деформационные параметры процессов обработки металлов давлением, на качество изготавливаемых изделий. Игнорирование анизотропии заготовки при расчетах процессов пластического формоизменения приводит к недопустимым (более 50 %) отклонениям расчетных значений критических деформаций от действительных [1–5].

Решение проблемы эффективности производства достигается за счет вскрытия внутренних резервов деформирования, связанных не только с анизотропией механических свойств, но и с неоднородностью, упрочнением и вязкостью обрабатываемого материала. Необходимо назначение научно обоснованных термомеханических режимов процессов, основанных на базе развития теории формоизменения.

Теория деформирования анизотропных материалов при различных температурно-скоростных режимах формоизменения разработана на базе теории пластичности и ползучести анизотропных материалов. Созданная теория деформирования анизотропных материалов позволила определять силовые и деформационные параметры, предельные возможности формоизменения изделий: полученных операциями обработки металлов давлением, вытяжка без утонения, с утонением стенки, комбинированная вытяжка цилиндрических и коробчатых оболочек, обжим, раздача, пневмоформовка, прямое и обратное выдавливание с активными и реактивными силами трения, штамповка орребренных, набор утолщений, термокалибровка, объемная изотермическая и многоплунжерная штамповка, осадка с кручением круглой листовой заготовки, сварка давлением и др. [1–16].

Для оценки предельных возможностей деформирования и качества заготовок и деталей разработаны феноменологические модели разрушения и критерии локальной потери устойчивости. В теоретической части работы применены различные методы решения технологических задач: верхних оценок, характеристик, приближенного решения уравнений равновесия с условием текучести, конечных элементов и др. Проведена оценка прогнозируемого расчетами качества и фактических данных механических испытаний на прочность и металлографических исследований.

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования процессов с локальным характером деформирования — ротационной вытяжки цилиндрических и конических деталей роликами на специализированных раскатных станках и на токарно-винторезных станках с помощью раскатных устройств. Установлено влияние технологических параметров (степени деформации, геометрических параметров инструмента, условий трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и заготовки), характеристик начальной анизотропии механических свойств заготовки и анизотропного упрочнения на силовые режимы процессов, изменение анизотропии механических характеристик материала заготовки и предельные возможности формоизменения рассматриваемых технологических процессов. Получены соотношения для расчета силовых режимов, предельных возможностей формоизменения процессов ротационной обработки.

Проведенные научные работы являются оригинальными и отличаются от известных комплексной постановкой задач исследований: при холодном пластическом формоизменении — учетом анизотропного упрочнения начально ортотропного материала, критериев локальной потери устойчивости, процесса накопления микрповреждений, разработкой моделей поведения и разрушения и т.д.; при горячем деформировании — учетом характеристик анизотропии при ползучем и ползуче-пластическом течении материала, введением в расчеты функции микрповреждений, решением задач о предельных возможностях деформирования материала, как при локальной потере устойчивости, так и при накоплении повреждаемости материала и т.д.

Созданы основы расчета наукоемких технологических процессов, обеспечивающих снижение массы узлов, повышение их несущей способности и точности. Задачи решены на базе перспективных методов обработки давлением заготовок: изотермической штамповки, формообразования с локальным нагревом, совмещенных процессов деформирования и диффузионной сварки. Получены новые конструкторско-технологические решения, разработаны принципиально новые технологические процессы, технологическая оснастка и оборудование для производства узлов из высокопрочных алюминиевых, алюминиево-магниевого, литиевых, титановых сплавов, сталей.

Выполнены научные и экспериментальные исследования прогрессивных наукоемких процессов производства однослойных, многослойных и подкрепленных конструкций из композиционных материалов и металлических сплавов. Применение новых технологических процессов прессования оболочек из композитов обеспечило возможность изготовления изделия с заданными тактико-техническими характеристиками при снижении полетной массы изделия на 30 %.

На полученных результатах базировались технологические работы по изготовлению точных высокопрочных деталей агрегатов и узлов

ракетно-космической техники: корпусов отсеков, топливных баков, обтекателей, огневых рубашек, мембран и диафрагм устройств сопл двигательных установок, топливных емкостей, деталей вытеснительных устройств, арматуры трубопроводов, вафельных оболочек, корпусных узлов из композитов т.д.

Разработанные технологические процессы обеспечивают изготовление типовых деталей узлов изделий высокого качества, в частности, требуемых геометрических форм с минимальными допусками под механическую обработку, с заданными характеристиками прочности, вибрационной и коррозионной стойкости, герметичности и др. Технологические и конструкторские решения, устройства и оборудование защищены авторскими свидетельствами и патентами РФ.

В результате внедрения новых разработок в промышленность обеспечено: сокращение в 1,5... 2 раза сроков подготовки производства и трудоемкости изготовления изделий; повышение на 20... 30% удельной прочности изделий; повышение в 3... 5 раз точности геометрии узлов; увеличение коэффициента использования материала (КИМ) от 0,2 до 0,8, снижение на 10% массы изделия.

Результаты исследований и разработок внедрены на многих машиностроительных предприятиях РФ, где созданы специализированные производственные цеха и участки. Внедрение технологических процессов позволило освоить серийное производство ряда изделий ракетно-космической техники и изделий широкого назначения с высокими техническими характеристиками. Разработанные технологические процессы особенно эффективны в производстве изделий ракетно-космической техники, так как их применение обеспечило снижение массы деталей и узлов, входящих в конструкцию изделий. Это позволило увеличить массу выводимой полезной нагрузки (например, массу спутников, выводимых на геостационарную орбиту, увеличить полезный груз в космических кораблях “Союз” и “Прогресс” и др.). Данные технологические процессы широко применяются при производстве ракетных разгонных блоков типа “ДМ” для выведения космических аппаратов на геостационарные орбиты (программа “Морской старт”, программы МО РФ, коммерческие программы), космических кораблей “Союз ТМА” и “Прогресс М”, крылатых ракет типа “Яхонт”; они используются при изготовлении узлов и агрегатов международной космической станции (МКС) и т.д.

Новые конструкторско-технологические решения обеспечили для разгонных блоков типа “ДМ” увеличение полезной нагрузки в среднем на 900 кг, для крылатой ракеты “Яхонт” и ее аналогов — повышение в 1,3 раза тактико-технических характеристик, и позволили существенно превзойти по этим характеристикам зарубежные аналоги. При модернизации конструкций космических кораблей “Союз” и

“Прогресс” их масса была снижена на 10%, а сроки эксплуатации в космосе увеличены с 6 до 9 месяцев. Применение новых технологий позволяет разгонному блоку ДМ прочно удерживать лидирующие позиции России на рынке носителей для запусков космических аппаратов на высокие орбиты. Ежегодно 25...30% космических аппаратов в мире выводятся разгонными блоками ДМ. С использованием этих разгонных блоков выведены на геостационарную орбиту космические аппараты Echostar 10 (США), JCSat-9 (Япония), Galaxy 16 (США), KasSat 1 (Казахстан), KoreaSat 5 (Корея). Усовершенствованные ракетные блоки обеспечивают возможность полетов на другие планеты Солнечной системы.

Особый интерес представляют технологические процессы при создании космических кораблей нового поколения таких, как “Клипер”, “Паром”, “Буксир”, при развитии МКС и др. Технологические процессы имеют двойное назначение. В РКК “Энергия” имени С.П. Королева организовано производство широкой номенклатуры современных модулей узлов и деталей для протезов, а также экологических постов мониторинга окружающей среды из высокопрочных материалов, которые имеют устойчивый спрос на российском и мировых рынках и потребность в которых постоянно увеличивается.

Результаты работы имеют государственное значение и вносят значительный вклад в экономику страны и повышение ее обороноспособности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И з о т е р м и ч е с к о е деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, С.С. Яковлев, Я.А. Соболев. – М.: Машиностроение-1. – Тула, 2004. – 427 с.
2. С п е ц и а л ь н ы е технологические процессы и оборудование обработки давлением / В.А. Голенков, А.М. Дмитриев, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев и др.; под ред. В.А. Голенкова, А.М. Дмитриева – М.: Машиностроение, 2004. – 464 с.
3. Ш е в е л е в В. В., Я к о в л е в С. П. Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку. – М.: Машиностроение, 1972. – 136 с.
4. Я к о в л е в С. П., К у х а р ь В. Д. Штамповка анизотропных заготовок. – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с.
5. Я к о в л е в С. П., Я к о в л е в С. С., А н д р е й ч е н к о В. А. Обработка давлением анизотропных материалов. – Кишинев: Квант, 1997. – 332 с.
6. Ж и в о в Л. И., О в ч и н н и к о в А. Г. Кузнечно-штамповочное оборудование. Прессы. – Киев: Вышш. шк., 1981. – 376 с.
7. К о в к а и штамповка: Справочник: В 4 т. / Под общ. ред. Е.И. Семенова. – Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева. – М.: Машиностроение, 1987. – 544 с.
8. М а л о о т х о д н а я, ресурсосберегающая технология штамповки / Под ред. В.А. Андрейченко, Л.Г. Юдина, С.П. Яковлева. – Кишинев: Universitas, 1993. – 238 с.
9. М е х а н и к а процессов изотермического формоизменения элементов многослойных листовых конструкций / С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, В.Н. Чудин, Я.А. Соболев. – Тула: ТулГУ, 2001. – 254 с.

10. О в ч и н н и к о в А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
11. Т е о р и я и технология изотермической штамповки труднодеформируемых и малопластичных сплавов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, С.С. Яковлев, В.А. Андрейченко. – Тула: ТулГУ, 2000. – 220 с.
12. Т е о р и яковки и штамповки / Е.П. Унксов, У.Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; под общ. ред. Е.П. Унксова и А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с.
13. Т е х н о л о г и я конструкционных материалов (Технологические процессы в машиностроении): В 4 ч. Ч. 3. Производство заготовок / С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, Л.Г. Юдин и др. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. – 582 с.
14. Ю д и н Л. Г., Я к о в л е в С. П. Ротационная вытяжка цилиндрических обочечек. – М.: Машиностроение, 1984. – 128 с.
15. Я к о в л е в С. П., Я к о в л е в С. С., Н е ч е п у р е н к о Ю. Г. Глубокая вытяжка цилиндрических изделий из анизотропного упрочняющегося материала. – Тула: ТулГУ, 2000. – 182 с.
16. Я к о в л е в С. С., П и л и п е н к о О. В. Изотермическая вытяжка анизотропных материалов. – М.: Машиностроение–1. – Тула, 2007. – 212 с.

Статья поступила в редакцию 1.06.2008

***Коллективу авторов в составе В.А. Колмыкова, Л.А. Ковригина, И.С. Ефремова, Е.Ю. Поликарпова, Н.В. Полухина, А.В. Ширяева, А.Г. Овчинникова, С.П. Яковлева, С.С. Яковлева, В.Н. Чудина присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники 2006 года за разработку комплекса технологий и научное обеспечение производственных процессов пластического формообразования особо ответственных деталей машиностроения из высокопрочных анизотропных материалов.***



Владимир Афанасьевич Колмыков — генеральный директор ФГУП “Красноярский машиностроительный завод”, кандидат технических наук.

V.A. Kolmykov — Ph. D. (Eng.), general director of Federal State Unitary Enterprise “Krasnojarskii mashinostroitel’nyi zavod”.



Леонид Александрович Ковригин — заместитель главного конструктора ФГУП “Красноярский машиностроительный завод”

L.A. Kovrigin — deputy general designer of Federal State Unitary Enterprise “Krasnojarskii mashinostroitel’nyi zavod”.

Игорь Сергеевич Ефремов — заместитель генерального конструктора ОАО “Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва” (г. Королев Московской обл.), кандидат технических наук.

I.S. Yefremov — Ph. D. (Eng.), deputy general designer of public joint-stock company “Raketno-kosmicheskaya korporatsiya “Energiya” imeni S.P. Koroleva” (town Korolev, Moscow region).



Евгений Юрьевич Поликарпов — заместитель главного инженера ЗАО “Завод экспериментального машиностроения РКК “Энергия” имени С.П. Королёва” (г. Королев Московской обл.)

Ye.Yu. Polikarpov — deputy chief engineer of private joint-stock company “Zavod Experimental'nogo mashinostroeniya RKK “Energiya” imeni S.P. Koroleva” (town Korolev, Moscow region).



Николай Валерьевич Полухин — заместитель генерального директора, главный инженер ОАО “Корпорация “Тактическое ракетное вооружение” (г. Королев Московской обл.)

N.V. Polukhin — deputy general director, chief engineer of public joint-stock company “Korporatsiya “Takticheskoe raketnoe vooruzhenie” (town Reutov, Moscow region).



Александр Владимирович Ширяев — начальник научно-исследовательского отдела ФГУП “Научно-производственное объединение машиностроения” (г. Реутов Московской обл.)

A.V. Shiryayev — head of research department of Federal State Unitary Enterprise “Nauchno-proizvodstvennoe ob'edinenie mashinostroeniya” (town Reutov, Moscow region).



Анатолий Георгиевич Овчинников — профессор ГОУ “Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана”, доктор технических наук.

A.G. Ovchinnikov — D. Sc. (Eng.), professor of the Bauman Moscow State Technical University.





Сергей Петрович Яковлев — профессор ГОУ “Тульский государственный университет”, доктор технических наук.

S.P. Yakovlev — D. Sc. (Eng.), professor of the Tula State University.



Сергей Сергеевич Яковлев — профессор, заведующий кафедрой ГОУ “Тульский государственный университет”, доктор технических наук.

S.S. Yakovlev — D. Sc. (Eng.), professor, head of department of the Tula State University.



Владимир Николаевич Чудин — начальник сектора ФГУП “Научно-производственное объединение “Техномаш” (Москва), доктор технических наук.

V.N. Chudin — D. Sc. (Eng.), professor, head of sector of Federal State Unitary Enterprise “Nauchno-proizvodstvennoe ob'edinenie “Tekhnomash” (Moscow city).

---

**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
в 2008 г. вышла в свет книга**

**Проектирование полноприводных колесных машин:** Учебник для вузов: В 3 т. Т. 1 / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Г.И. Гладков и др.; под ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 496 с.

Учебник состоит из трех томов, в которых последовательно описаны общие вопросы проектирования колесных машин, а также методы расчета их агрегатов и систем, основанные на математическом и физическом моделировании, причем не только для детерминированных, но и для случайных условий нагружения. Особое внимание уделено полноприводным колесным машинам, получившим широкое распространение в связи с удовлетворительными показателями их устойчивости и проходимости.

В первом томе изложены основы и принципы проектирования полноприводных колесных машин, рассмотрены их надежность и обитаемость, а также требования к проектированию плавающих колесных машин и автопоездов.

Содержание учебника соответствует программам и курсам лекций, которые авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов вузов и технических университетов машиностроительного профиля, обучающихся по специальностям “Автомобиле- и тракторостроение”, “Многоцелевые гусеничные и колесные машины”. Может быть полезен аспирантам, преподавателям и работникам промышленных предприятий.

По вопросам приобретения обращаться по тел. (499) 263-60-45;

e-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)