

УДК 621.73.043.016.3

**В. А. Томило**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ В ОБЛАСТИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Представлены основные этапы развития теоретических и технологических основ обработки металлов давлением в Государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси». Показана большая роль учёных института в становлении и развитии таких направлений, как горячая и холодная объёмная штамповка, горячее гидродинамическое выдавливание, поперечно-клиновое прокатка, импульсные методы обработки и др. По некоторым из передовых разработок институт занимает лидирующее положение в мире. Указаны перспективные направления обработки давлением, в том числе комбинированные методы, имеющие спрос в различных отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** деформационные технологии, холодная и горячая обработка металлов давлением, гидроударная штамповка, магнитно-импульсная штамповка.

**Введение.** Основной тенденцией в промышленности экономически развитых стран, особенно в заготовительном и основном производстве изделий машиностроения, является максимальное использование методов обработки металлов давлением (далее — ОМД), позволяющих существенно снижать металлоёмкость изделий, повышать механические свойства материалов, обеспечивать высокую производительность и снижение себестоимости деталей. Пластическая деформация, обеспечивая необратимые изменения тонкого кристаллического строения, является одним из эффективных средств формоизменения структуры металлов и сплавов, а следовательно, улучшения физико-механических и эксплуатационных характеристик полученных изделий. В машиностроении существуют большие группы деталей, получение которых другими методами крайне затруднительно и даже невозможно (например, кузовные детали, элементы подвески, трансмиссии, детали рамы автомобиля, диски колёс, детали сельскохозяйственных машин и др.).

**Основная часть.** В Республике Беларусь лидирующие позиции в области ОМД занимало и занимает в настоящее время Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (далее — ФТИ НАН Беларуси). Систематические исследования процессов обработки металлов давлением в институте начались в 1948 году, когда его возглавил академик Академии наук БССР С. И. Губкин. Им была создана инженерная теория течения металла, положенная в основу разработки и совершенствования технологий ОМД.

Под его руководством разработаны математические методы исследования процессов формообразования при прокатке, волочении, ковке и штамповке. Он ввёл понятие о механических схемах деформации, создал научно обоснованную классификацию видов ОМД. Возглавляемый С. И. Губкиным коллектив был ориентирован на решение актуальных проблем в области теории и технологии ОМД. Это позволило заложить мощный научный фундамент, отражённый в его многочисленных трудах, а также в работах его учеников и последователей. Более 70 человек защитили кандидатские и докторские диссертации под руководством С. И. Губкина.

С 1956-го по 1970-й год научные исследования в области теории и практики пластического деформирования металлов и сплавов проводились под руководством академика Академии наук БССР В. П. Северденко. Вместе со своими учениками он провёл большой объём исследований в различных областях ОМД. Теоретически исследовано формообразование в очаге деформации, выявлены закономерности и особенности процесса пластической деформации в зависимости от условий на контактной поверхности. Изучены силовые параметры основных процессов ОМД, исследованы закономерности образования рельефа и структуры поверхностного слоя, а также кинетика формирования дислокационной

структуры металлов. Предложен ряд новых способов ОМД с применением ультразвуковых и низкочастотных колебаний, разработаны высокоэффективные способы изготовления деталей машин и режущего инструмента пластическим деформированием, созданы новые материалы и др.

Результаты многих исследований, проведённых В. П. Северденко, внедрены в промышленность, отражены в учебниках, учебных пособиях и справочниках. Некоторые работы опубликованы в зарубежных журналах, несколько монографий переведены на иностранные языки и изданы за рубежом. Лично и в соавторстве В. П. Северденко опубликовал свыше тысячи работ, среди них 29 монографий, 2 учебника и 5 учебных пособий для учреждений высшего образования.

В своей работе В. П. Северденко уделял большое внимание подготовке высококвалифицированных научных кадров. Под его руководством выполнено свыше 150 докторских и кандидатских диссертаций, была создана и получила развитие белорусская школа ОМД. К её самым ярким представителям следует отнести Е. М. Макушка, А. С. Матусевича, В. М. Сегала, разработавших методику графоаналитического построения полей линий скольжения для пластической деформации; В. В. Клубовича, А. В. Степаненко, исследовавших влияние ультразвуковых колебаний на деформационные процессы; В. Г. Кантина, В. С. Мураса, Э. Ш. Суходрева, разработавших новый высокоэффективный способ горячего гидродинамического выдавливания; М. И. Калачёва, показавшего возможность использования деформационного упрочнения для повышения прочности и эксплуатационных качеств изделий. Исследование связи механизмов взаимного скольжения слоёв металла в процессе деформирования с эффектом упрочнения привело к созданию технологии углового выдавливания (В. И. Копылов, В. Ф. Малышев, В. М. Сегал и др.). Важные теоретические и прикладные результаты при исследовании процессов холодной объёмной штамповки получены А. В. Алифановым.

Особое место среди деформационных процессов, разработанных и исследованных в ФТИ НАН Беларуси, занимает поперечно-клиновое прокатание (Г. В. Андреев, А. Н. Давидович, В. А. Клушин, Е. М. Макушок, В. И. Садко, В. Я. Щукин и др.). По оснащённости оборудованием и квалификации специалистов в этой области Республика Беларусь занимает лидирующие позиции в мире, что стало возможным благодаря более чем 30-летнему опыту работы сотрудников института над этой темой.

Фундаментальные исследования и прикладные разработки в области поперечно-клинового прокатания на протяжении ряда лет выполняются в научных центрах Беларуси, Германии, Испании, Польши, России, Чехии, Китая. Белорусская школа поперечно-клинового прокатания занимает одно из лидирующих мест в мире в этой области. Первые исследования поперечно-клинового прокатания были выполнены в ФТИ НАН Беларуси в 1969 году. В настоящее время в институте на высоком уровне разработаны теоретические и технологические основы поперечно-клинового прокатания. Разработки, выполненные в ФТИ НАН Беларуси, защищены более чем 150 авторскими свидетельствами и патентами Беларуси и промышленно развитых стран, что составляет приблизительно 30% патентов по клиновому прокатанию, зарегистрированных в мире на данный момент. Разработанные в ФТИ НАН Беларуси технологии и соответствующая технологическая оснастка поперечно-клинового прокатания (рисунок 1) обеспечивают

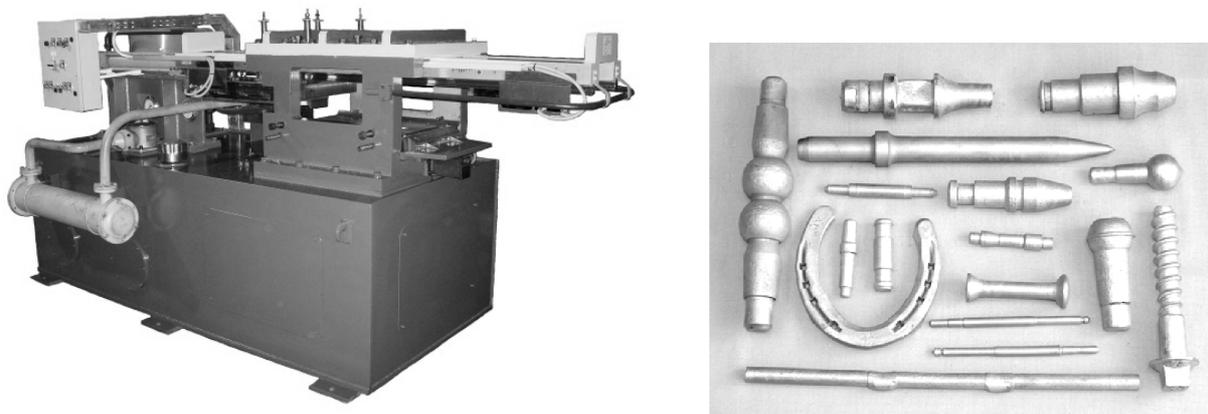


Рисунок 1 — Стан поперечно-клиновой прокатки и прокатанные поковки

следующие показатели: коэффициент использования металла — 0,80...0,98, стойкость плоскопрокатного инструмента до его полного выхода из строя — около 1 млн шт. изделий, производительность процесса в зависимости от конфигурации изделия и схемы прокатки — 300...720 шт. / ч, повышение эксплуатационных характеристик прокатанных изделий на 10...15%. Разработаны технологии горячей, тёплой и холодной прокатки, комбинированные технологии со штамповкой, в том числе безоблойной.

В 1966 году под руководством академика В. Н. Чачина были начаты работы по использованию концентрированных потоков энергии для осуществления различных технологических процессов в машиностроении, им создана белорусская школа учёных, плодотворно работающих в этой новой области технологии. Под его руководством широкое развитие в республике получили работы по использованию импульсных нагрузок, осуществляемых с помощью электрического разряда в жидкости и энергии сжатого газа.

На основании теоретического анализа основных явлений, возникающих при электрическом взрыве проводников в жидкости, В. Н. Чачиным установлен ряд механизмов нагружения обрабатываемой детали, изучена физика этих процессов. Ученики и последователи этой школы создали три тематических направления: 1) магнитно-импульсная обработка материалов; 2) электрогидроимпульсное деформирование; 3) гидроударная обработка.

Для создания специализированного оборудования на базе научных исследований и для его внедрения в ФТИ НАН Беларуси был образован конструкторский отдел, который разработал базовые модели гидроударного оборудования (рисунок 2), в дальнейшем переданные в серийное производство на завод «Кузлитмаш» (Пинск). В ФТИ НАН Беларуси были разработаны технологические основы импульсного формообразования листовых материалов применительно к созданному оборудованию. Осуществлено масштабное внедрение технологий на предприятиях Беларуси. Проданы лицензии на гидроударные прессы в Италию, Швецию, Венгрию. Выполненные работы соответствуют мировому уровню в области импульсной обработки материалов, что подтверждается более чем 100 патентами, дипломами и медалями международных выставок.

Магнитно-импульсная обработка материалов (далее — МИОМ) появилась в тематике ФТИ НАН Беларуси в 1965 году. В 1970—1990 годы были изготовлены полтора десятка магнитно-импульсных установок, поставленные на различные предприятия СССР: в Москву, Киев, Ригу, Ереван. В Австрию была импортирована установка для комбинированного электроразрядного и магнитоимпульсного спекания/прессования металлочерепичного порошка.

В 1990—2010 годах были организованы опытно-промышленные участки МИОМ, оснащённые магнитно-импульсными прессами институтской разработки на ОАО «МАЗ», ОАО «БелАЗ», Минском авиаремонтном заводе.



Рисунок 2 — Гидроударный пресс и отштампованные детали

В 2005—2010 годах разработаны базовые модели нового поколения магнитно-импульсных (рисунок 3) и электрогидроимпульсных прессов на современной элементной базе, предназначенные для серийного выпуска.

На этапе освоения осуществляется выпуск установочной серии прессов, два из которых в 2009 году переданы в промышленную эксплуатацию на ОАО «БелАЗ» и опытное производство Государственного научного учреждения «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси». Заинтересованность в приобретении магнитно-импульсного пресса проявили РУП «Белорусский протезно-ортопедический восстановительный центр», Центр светодиодных технологий Национальной академии наук Беларуси, Белорусское оптико-механическое объединение (БелОМО), ООО «Фотон» и др.

После демонстрации модели пресса на 9-м Московском международном салоне инноваций и инвестиций в августе 2009 года готовность в использовании разработок института в этой области выразили ряд предприятий России и Кореи. Заключены и выполняются несколько контрактов.

Огромный вклад в развитие теории и технологии ОМД в ФТИ НАН Беларуси внёс академик А. В. Степаненко, исследовавший процессы периодической прокатки. Наибольший экономический эффект от использования переменных периодических профилей в автомобилестроении получен при внедрении новых технологий изготовления малолистовых рессор. Под руководством академика А. В. Степаненко в ФТИ НАН Беларуси был разработан принципиально новый способ получения профилей переменного сечения, используемых в качестве упругих элементов рессорной подвески автомобилей семейства МАЗ, отличающийся тем, что окончательный профиль заготовки малолистовой рессоры получают с одного нагрева путём прокатки нагретой заготовки на перемещающейся при помощи силового механизма профильной оправке через неприводные валки с постоянным межвалковым зазором. Данная технология применяется в настоящее время на Минском рессорном заводе, где установлена и действует промышленная автоматическая линия для изготовления заготовок малолистовых рессор и направляющих опор пневмоподвески (рисунок 4).

При изготовлении сложнопрофильных ответственных деталей машиностроительного и автомобильного производств возможно свести к минимуму использование таких трудоёмких и низкопроизводительных операций, как сварка и механическая обработка, за счёт применения современных способов ОМД для различных видов переменных профилей. Максимальные возможности по снижению металлоёмкости производства и повышению качества деталей имеет периодическая прокатка. Созданные в ФТИ НАН Беларуси технологии и оборудование периодической прокатки (в общей сложности восемь прокатных станов) позволяют изготавливать значительную часть периодических профилей, применяемых на промышленных предприятиях Беларуси.

В настоящее время в промышленности республики наблюдается острая потребность в использовании новых высокоэффективных, ресурсосберегающих технологий ОМД. В институте ведутся работы в данном направлении. Поскольку «классические» технологии ОМД практически уже исчерпали себя,



Рисунок 3 — Магнитно-импульсный пресс и отштампованные детали

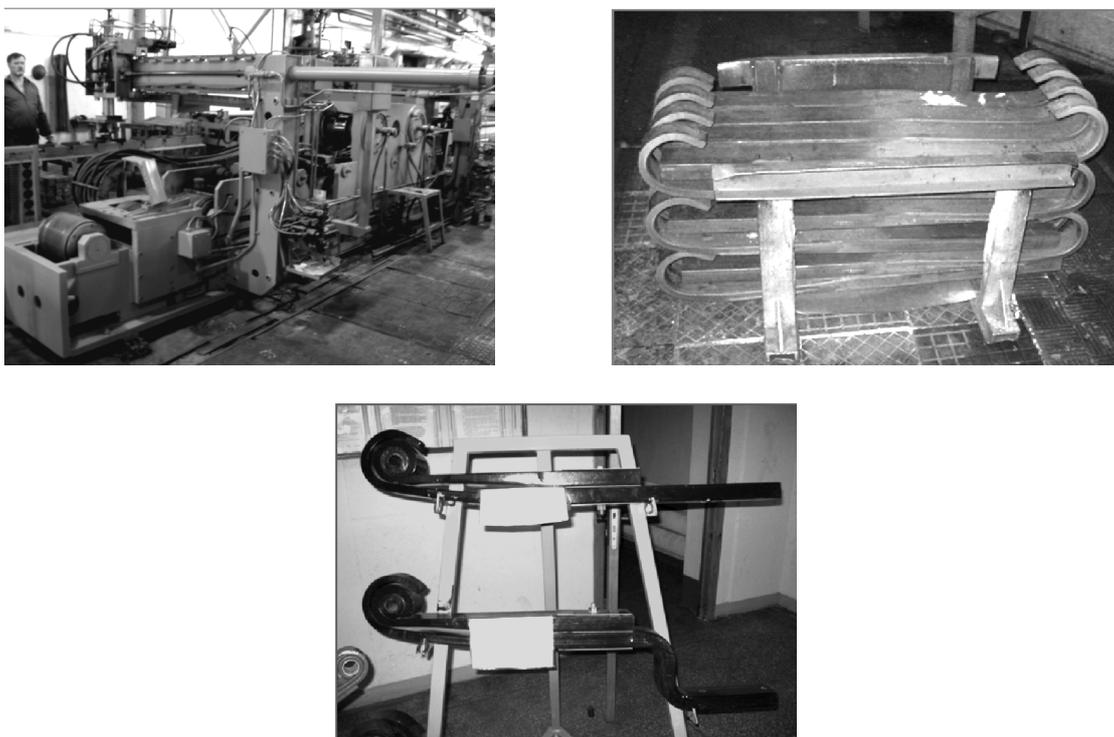


Рисунок 4 — Прокатный стан и заготовки детали опор пневмоподвески

то проблемы интенсификации и удешевления производства могут быть решены лишь за счёт разработки комбинированных операций ОМД в рамках одного технологического процесса, фасонирования исходных заготовок, оптимизации энергосиловых параметров, использования дифференциального нагрева, безоблойной и точной штамповки, комбинаций методов ОМД и методов высокоэнергетического, в том числе импульсного, воздействия, совершенствования и интенсификации методов пластического формообразования. Восстановление способности деформированных сталей и сплавов к дальнейшей пластической деформации предполагает снятие внутренних напряжений. Поэтому необходимо чёткое представление о механизме пластической деформации при режимах, реализуемых в производственных условиях на высокоэффективных промышленных агрегатах с большими скоростями деформации и очень кратковременным пребыванием металла в зоне деформации. Для этого предполагается использовать представления о закономерности разработанных в последние десятилетия теории больших пластических деформаций, физической мегамеханики, а также физики твёрдого тела, неравновесной термодинамики.

В связи с этим в институте получают дальнейшее развитие работы по совершенствованию импульсных методов обработки, созданию новых технологий получения пространственных тонкостенных деталей (оболочек) сложной формы (сферических отражателей, параболических, трубчатых заготовок, тороидальных заготовок из сложнелегированных и редкоземельных металлов и др.). Привлечение для изготовления деталей указанного типа методов импульсной и гидроударной штамповки позволит значительно (в 3...5 раз) сократить металлоёмкость штамповой оснастки и в 2 раза — время на подготовку производства. Потребители технологии и оборудования — машиностроительные и приборостроительные предприятия, предприятия электротехнической и других отраслей промышленности республики, научные учреждения за рубежом.

В рамках данного направления будет осуществляться развитие теоретических основ совместимости схем напряжённо-деформированного состояния с динамикой пластического формообразования на базе классической теории ОМД с применением компьютерного моделирования, механики сплошных сред, современных представлений о контактном взаимодействии и разрушении жёстко-пластических тел. Эти исследования являются научной основой дальнейшего развития производства изделий мето-

дом пластического формообразования, его совершенствования и интенсификации, создания новых наукоёмких технологических процессов, в том числе комбинированных, и высокопроизводительного современного оборудования для их реализации.

Разрабатываемый новый способ реверсивной поперечной прокатки отличается воздействием на зёрна металла в приконтактном слое за счёт увеличения накопленных деформаций в этой области заготовки и, как следствие, повышением усталостной прочности прокатанных поковок. Получит практическое применение эффект сварки давлением валов со слоями из однородных и разнородных металлов и сплавов при поперечной и поперечно-клиновой прокатке. Метод позволяет получать валы с поверхностными слоями заданной толщины и назначения и сердцевинной из сталей обыкновенного качества, полые валы, трубы с внутренним защитным слоем заданной толщины (нержавеющие стали) и внешней оболочкой из сталей обыкновенного качества. Области применения технологии: снижение веса автомобилей и самолетов за счёт применения полых валов; замена валов из дорогостоящей нержавеющей стали на дешёвые слоистые валы с наружным слоем из нержавеющей стали, использование труб с внутренним тонким слоем из нержавеющей стали и внешним более толстым слоем из сталей обыкновенного качества; получение поковок более прочных коленвалов и шатунов из слоистых заготовок; повышение износостойкости пар трения (например, шаровых пальцев, кулачков) за счёт применения слоистых валов с наружным износостойким слоем и др.

Будет продолжена разработка технологии, оборудования и инструмента для производства шаров методами поперечно-клиновой прокатки, штамповки, винтовой прокатки. Планируется разработка технологий тёплой штамповки с понижением температур нагрева заготовки. Научная новизна заключается в разработке условий деформирования при последовательном использовании различных схем напряжённо-деформированного состояния, позволяющих максимально реализовать ресурс пластичности металла и обеспечить получение изделия с улучшенной структурой и более высокими механическими свойствами за счёт оптимизации корреляционных характеристик схемы напряжённого состояния с реологическими свойствами деформируемого объекта. Данные технологии найдут широкое применение при изготовлении деталей типа ступенчатых валов на РУП «МТЗ», РУП «МАЗ», ОАО «Белкард» и других машиностроительных заводах республики и за её пределами.

Будут продолжены работы по совершенствованию и широкому использованию технологий, основанных на методах пластического деформирования, для производства деталей ортопедических имплантатов для нужд Министерства здравоохранения Республики Беларусь, обладающие большой социальной значимостью и актуальностью. Степень удовлетворения медицинских и технических требований к свойствам материалов-имплантатов определяет их стоимость, а следовательно, и экономическую составляющую операции для основного числа нуждающихся в эндопротезировании. Продолжатся работы по расширению применения фиксирующих пластин систем DCS и DHS при протезировании остеобольных в практике ортопедической хирургии. Дополнительный резерв уменьшения материальных затрат при формообразовании поковок деталей эндопротезов может быть реализован применением методов безоблойной штамповки в закрытых штампах за счёт рационального научно обоснованного выбора режимов механической и тепловой обработки Co-Cr-Mo-сплавов. Изучение роли влияния направленного воздействия пластического деформирования и температуры на структуру и свойства материалов-имплантатов сделает возможным переход от использования дорогостоящих Co-Cr-Mo-сплавов к нержавеющей сталям аустенитного класса и к снижению стоимости эндопротезов, созданию технологии выпуска ревизионных эндопротезов широкой номенклатуры, что позволит решить проблему более полного удовлетворения нуждающихся в оперативном лечении больных в Беларуси.

Проблема импортозамещения сложнагруженных деталей сельскохозяйственной техники будет решена за счёт разработки технологии и специальной оснастки для формообразования, её изготовления, испытания, наладки и организации производства по всему технологическому циклу на производственных площадях ФТИ НАН Беларуси.

Планируется продолжение работ по совершенствованию технологии изготовления деталей ходовой части и тормозной системы автомобилей семейства МАЗ. Реализация технологии изготовления колец и втулок из точных поковок обеспечит на ОАО «Завод тормозной аппаратуры и механизмов» («ТАиМ», Бобруйск) повышение коэффициента использования металла с 0,13 до 0,52 для колец и с 0,36 до 0,90 для втулок; повышение производительности механообработки на 40...50%; уменьшение расхода режущего инструмента на 25...30%.

**Заключение.** Благодаря большому объёму проведённых исследований, в ФТИ НАН Беларуси создана мощная теоретическая и практическая база для дальнейшего развития процессов обработки давлением.

В настоящее время осуществляется разработка технологий специализированного оборудования и технологической оснастки для изготовления плужных деталей с лемешно-отвальными поверхностями методом продольно-поперечной прокатки. Предполагаемая технология предусматривает термопластическую обработку заготовок, вырезанных плазменным методом. Формообразование режущих элементов лемехов и долот будет производиться методом продольно-поперечной прокатки валками на специализированном оборудовании, адаптированном для обработки плоских заготовок. Кроме времени придания особых механических свойств материалу лемехов и долот, рабочий цикл машины составит ~10 с. По сравнению с операцией фрезерования, применяющейся на РУП «Минский завод шестерён», производительность увеличивается в 5 раз. Износостойкость деталей, изготавливаемых методом термопластической обработки, установленных в результате предварительных испытаний на Белорусской машиноиспытательной станции и полевых испытаниях в агрохозяйствах, увеличивается в 1,5 раза. После внедрения на РУП «Минский завод шестерён» технология может быть растиражирована на Минойтовском межрайонном объединении «Агропромтехника», Пинском ПО «Кузлитмаш», Дрогичинском трактороремонтном заводе, а также на других предприятиях концернов «Белагро-сервис», «Белагромаш».

Материал поступил в редакцию 15.05.2014 г.

The article presents the main stages of the theoretical and technological fundamentals of metal pressure treatment at the State Scientific Institution "Institute of Physics and Technical Sciences of the Belarusian National Academy of Sciences ". The role of the Institute scientists in the development of such areas such as hot and cold forging, hot extrusion hydrodynamic, cross-wedge rolling, pulse processing techniques is shown. Due to some advanced developments the Institute has a leading position in the world. Much-promising directions of pressure treatment, including combined methods that enjoy high popularity in various industries are revealed.

**Key words:** deformation technology, hot and cold metal forming, hydraulic stamping, magnet and pulse stamping.