

Рис. 3. Зависимость удельного поверхностного электросопротивления сеток от поверхностной плотности:

1 — сетки из проволоки диаметром 0,08 мм (1, 2, 3 проволоки в пучке);  
2 — диаметром 0,12 мм (1, 2, 3 проволоки в пучке)

Нашими экспериментами было также установлено, что наряду с молниезащитными сетками положительное влияние на распределение электрических зарядов по поверхности лопасти оказывают углеродные наномодификаторы, которые снижают электросопротивление эпоксидного связующего примерно на 3 порядка. Было

**Вывод.** Прогресс в области ветроэнергетики тесно связан с разработкой, производством и применением конструкционных и молниезащитных композиционных материалов, в которых важную роль играют армирующие наполнители — углеродные волокна, токоотводящие проволочные сетки и электропроводящие частицы.

установлено, что если расположить электропроводящий слой непосредственно под сетчатым молниеуловителем с заменой, например, слоя стеклопластика на углепластик либо применением стеклопластика, наполненного углеродными частицами, можно избежать опасной локализации заряда в точке попадания молнии. Это предотвратит возможный пробой материала с поверхности на расположенные внутри конструкционного набора лопасти углепластиковые проводящие слои, подобно пробую обкладок конденсатора.

Выпуск вязано-паяных токоотводящих сеток для ветроэнергетики и авиации осуществляет производственный участок Научно-технического центра «Композиционные материалы» при ИПМ НАН Украины, г. Киев.

## РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

*В.А. Томило*

*Физико-технический институт НАН Беларуси*

*г. Минск, Беларусь*

Основной тенденцией в промышленности экономически развитых стран, особенно в заготовительном и основном производстве изделий машиностроения, является максимальное использование методов обработки металлов давлением

(ОМД), позволяющих существенно снижать металлоемкость 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, детали рамы автомобиля, элементы подвески, трансмиссии, диски колес, детали сельхозмашин и др.

В Республике Беларусь лидирующие позиции в области ОМД занимал и занимает в настоящее время ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси». Систематические исследования процессов обработки металлов давлением в Физико-техническом институте начались в 1948 г., когда институт возглавил академик АН 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 ввел понятие о механических схемах деформации, создал научно-обоснованную классификацию видов обработки металлов давлением. Возглавляемый С.И. Губкиным коллектив был ориентирован на решение актуальных проблем в области теории и технологии обработки металлов давлением. Это позволило заложить мощный научный фундамент, отраженный в его многочисленных трудах, а также в трудах его учеников и последователей. Более 70 человек защитили кандидатские и докторские диссертации под руководством С.И. Губкина.

С 1956 по 1970 г. научные исследования в области теории и практики пластического деформирования металлов и сплавов проводились под руководством академика АН БССР В.П. Северденко. Вместе со своими учениками В.П. Северденко провел большой объем исследований в различных областях обработки металлов давлением. 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 обработки металлов давлением, исследованы закономерности образования рельефа и структуры поверхностного слоя, а также кинетика формирования дислокационной структуры

металлов. Предложен ряд новых способов обработки металлов давлением 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, проведенных 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. Василий Петрович Северденко лично и в соавторстве опубликовал свыше тысячи работ, среди них 29 монографий, 2 учебника и 5 учебных пособий для высших учебных заведений.

В своей работе В.П. Северденко уделял большое внимание подготовке высококвалифицированных научных кадров. Под его руководством выполнено свыше ста пятидесяти докторских и кандидатских диссертаций. Под руководством Василия Петровича Северденко была создана и получила развитие белорусская школа обработки металлов давлением. К ее 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.С. Мураса, Э.Ш. Суходрева, В.Г. Кантина, разработавших новый высокоэффективный способ горячего гидродинамического выдавливания, М.И. Калачева, показавшего возможность использования деформационного упрочнения для повышения прочности и эксплуатационных качеств изделий. Исследование связи механизмов взаимного скольжения слоев металла в процессе деформирования с эффектом упрочнения привело к созданию технологии углового выдавливания (В.М. Сегал, В.И. Копылов, В.Ф. Малышев и др.). А.В. Алифановым получены важные теоретические и прикладные результаты при исследовании процессов холодной объемной штамповки с применением теории линий скольжения и представлений о переходных областях.

Особое место среди деформационных процессов, разработанных и исследованных в ФТИ, занимает поперечно-клиновое прокатание (Е.М. Макушок, Г.В. Андреев, В.Я. Щукин, В.А. Клушин, В.И. Садко, А.Н. Давидович и др.). По оснащенности оборудованием и специалистами в этой

области Республика Беларусь занимает лидирующее позиции в мире, что стало возможным благодаря более чем 30-летнему опыту работы над этой темой сотрудниками ФТИ.

В 1966 г. 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 ученых, 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. В настоящее время это научное направление возглавляет Г.Н. Здор.

Огромный вклад в развитие теории и технологии ОМД в ФТИ внес академик А.В. Степаненко, исследовавший процессы периодической прокатки. Наибольший экономический эффект от использования переменных периодических профилей в автомобилестроении получен при введении новых технологий изготовления малолистовых рессор. В Физико-техническом институте НАН Беларуси под руководством академика А.В. Степаненко 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 путем 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.

В приведенной схеме прокатки валки являются неприводными. Поэтому заготовка в процессе обжатия постоянно прижата к торцу оправки, что исключает смещение заготовки относительно профилированных рабочих поверхностей оправки в направлении перемещения последней. За счет этого устраняется явление опережения, чего трудно добиться при обычной прокатке в при-

водных валках. В связи с этим повышается точность формообразуемого профиля в прокатанных полосах. Кроме того, в данном способе имеет место переднее натяжение, поскольку одних сил трения на контакте полосы с оправкой недостаточно для передачи энергии от металла к валкам и обеспечения вращения последних. Натяжение, создаваемое при воздействии переднего конца оправки на серединную часть полосы, возрастает по мере увеличения обжатия. Наличие переднего натяжения приводит к существенному снижению давления металла на валки и, тем самым к уменьшению упругой деформации нагруженных элементов в прокатной клети, что также способствует повышению точности размеров и формы получаемых изделий. Известно также, что уменьшение диаметра бочки валков приводит к снижению распорного усилия на них и тем самым способствует повышению точности профиля прокатанных полос. Кроме того, уменьшение диаметра валков приводит к увеличению коэффициента вытяжки и снижению величины уширения, которое существенно влияет на перераспределение металла по длине заготовки и, следовательно, на упругие характеристики полученных полос переменной толщины. Вместе с тем, уменьшение диаметра валков ограничено снижением их жесткости, а также условиями захвата металла. В нашем случае это ограничение сводится к условию вращения неприводных валков. При прокатке в неприводных валках очаг деформации в общем случае включает зоны отставания и опережения (рис. 1). Резерв сил контактного трения, передаваемый от металла к валкам, в зоне опережения играет активную роль и обеспечивает вращение валков. В зоне отставания силы контактного трения реактивны и препятствуют вращению валков. Поэтому вращение неприводных валков в процессе деформации возможно лишь при условии, когда протяженность зоны опережения будет больше протяженности зоны отставания, а именно

$$\alpha / 2 \leq \gamma \leq \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол прокатки;  $\gamma$  — нейтральный угол.

Предельное ограничение по данному условию  $\alpha = \gamma$  показывает, что в этом случае резерв активных сил контактного трения в зоне опережения исчерпан. Это приводит к остановке валков, и процесс прокатки переходит в протяжку, что вызывает локальный износ самих валков.

Известно, что при установившемся процессе прокатки в приводных валках, предельное значение угла прокатки выражается соотношением  $\alpha \leq 2f$ , где  $f$  — коэффициент контактного трения.

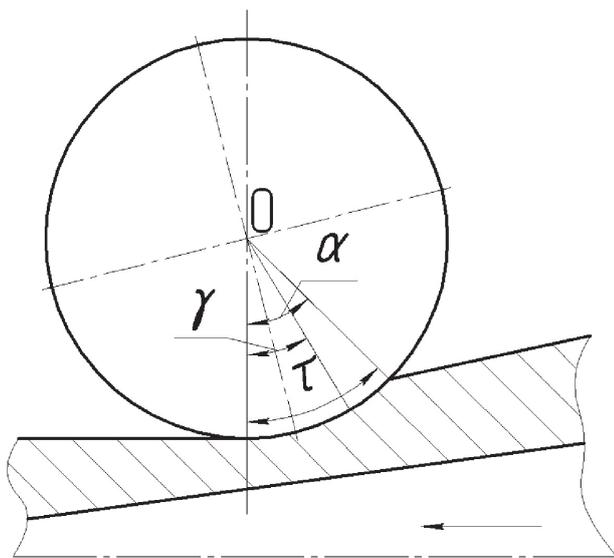


Рис. 1. Схема очага деформации при прокатке с переменным обжатием полосы на оправке

При несоблюдении данного условия валки начинают буксовать по металлу. Приведенное соотношение справедливо и для случая прокатки в неприводных валках. Но поскольку при этом энергия передается от металла к валкам, то несоблюдение указанного условия приводит к остановке валков, что вызывает локальный износ их рабочих поверхностей и, как следствие, потерю точности формообразуемых полос. Данное об-

стоятельство диктует необходимость дробления суммарной деформации при сохранении цикла обработки за один ход оправки, что возможно при деформировании в клетке с несколькими парами валков, установленными последовательно одна за другой.

Для промышленной реализации предложенного способа изготовления заготовок малолитровых рессор предназначен опытно-промышленный прокатный стан СП-1298. Комплекс оборудования включает соединенные между собой с помощью рольганга 1 установку для индукционного нагрева 2 и стан 3 для прокатки полосы с механизмами съема и разгиба прокатанной заготовки (рис. 2 и 3). Индуктор щелевого типа обеспечивает нагрев полосовой заготовки длиной до 2000 мм и запитан от двух генераторов тока высокой частоты мощностью по 250 кВт каждый. Прокатный стан включает сварную станину 4 коробчатого типа, внутри которой смонтирована рабочая клетка 5 с установленными в ней в вертикальном положении последовательно друг за другом тремя парами рабочих валков 6 с ребордами. Перед валками расположены направляющие ролики 7, служащие для удержания поставленной на ребро прокатываемой полосы и направления профилированной оправки 8. Оправка жестко связана с кареткой 9, опирающейся на направляющие 10, которая соединена со штоком 11 горизонтально расположен-

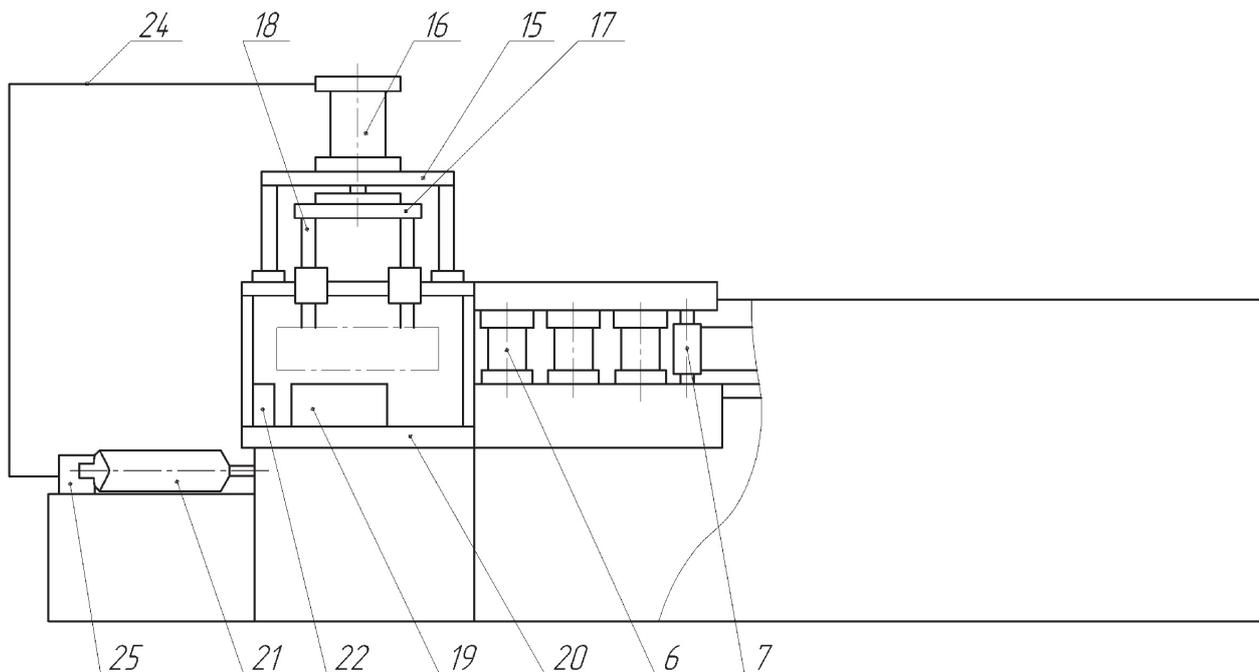


Рис. 2. Принципиальная схема стана для прокатки заготовок малолитровых рессор автомобилей МАЗ (вид сбоку)

ного в станине гидроцилиндра 12, обеспечивающего оправке возвратно-поступательное перемещение. Сбоку станины закреплена штанга 13 с регулируемым по ее длине упором 14 для фиксации в продольном направлении подаваемой по рольгангу исходной заготовки. За рабочей клетью расположены механизмы съема заготовки после прокатки с профилированной оправки и разгиба прокатанной полосы. Механизм съема заготовки содержит сварную раму 15, гидроцилиндр 16, шток которого жестко связан через траверсу 17 с толкателями 18, установленными в направляющих втулках, и обеспечивает посадку согнутой полосы после прокатки на сочлененную шарнирно оправку 19 разгиба, расположенную на столе 20. Раствор оправки разгиба относительно шарнира производится через систему тяг двумя гидроцилиндрами 21, имеющими возможность качания в горизонтальной плоскости относительно своих точек закрепления к станине. Линейка 22 жестко прикреплена к столу 20 и ограничивает величину угла разгиба прокатанной заготовки оправкой 19. Гидростанция 23 питает с помощью трубопроводов 24 через гидрораспределитель 25

всю гидросистему прокатного стана. Управление работой осуществляется от пульта 26.

С помощью описанного комплекса обеспечиваются следующие параметры процесса прокатки:

- температура нагрева заготовки под прокатку составляет 1000–1050 °С;
- число проходов равно 1;
- степень деформации в трех парах валков за проход достигает 55 %;
- наибольшее отклонение размеров от заданного профиля по толщине на всей длине заготовки не превышает  $\pm 0,1$  мм;
- продолжительность цикла обжатия заготовки в валках равна 10 с;
- продолжительность цикла обработки (загиб – прокатка – съем – разгиб) составляет 30 с.

Технические решения, апробированные при эксплуатации стана СП-1298, использованы в последующих комплексах периодической прокатки. На рис. 4 представлена полуавтоматическая линия МА-067, производящая последовательно прокатку заготовок, правку, обрезку концевых отходов и пробивку центрального отверстия.

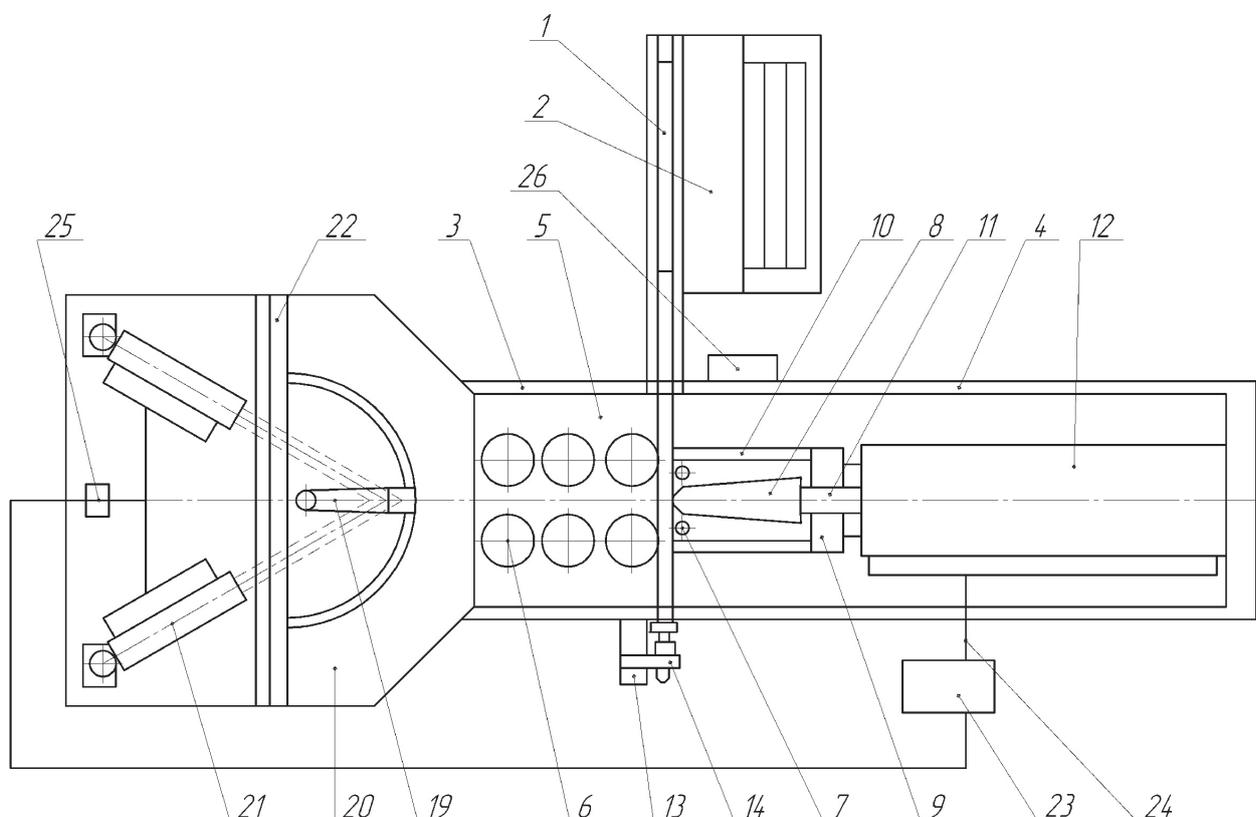


Рис. 3. Принципиальная схема стана для прокатки заготовок малолистовых рессор автомобилей МАЗ (вид сверху)

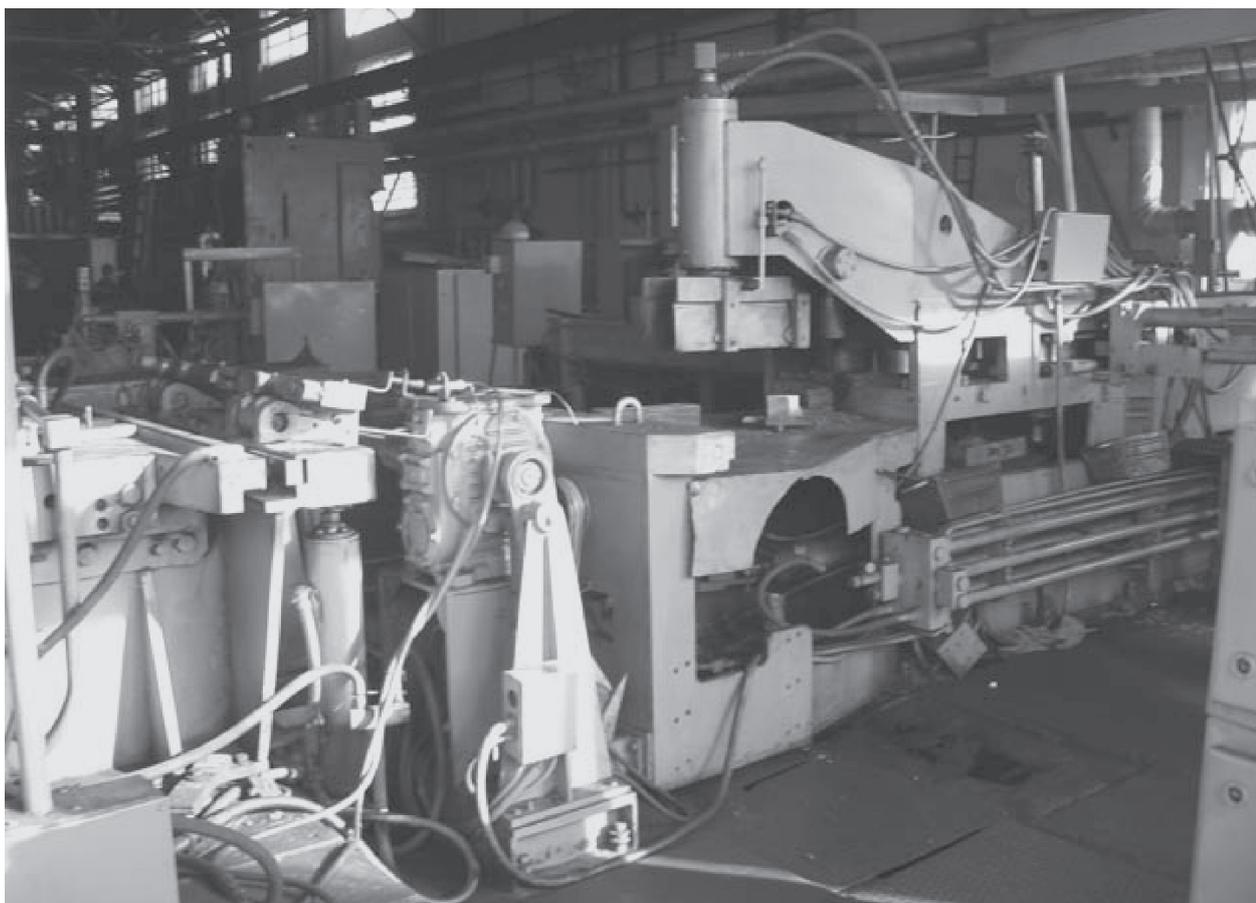


Рис. 4. Полуавтоматическая линия МА-067

Полуавтоматическая линия концептуально идентичная стану СП-1298 отличается от последнего повышенной мощностью и производительностью, возможностью выполнения дополнительных операций и высокой степенью автоматизации.

Полуавтоматическая линия МА-067 включает устройства нагрева, прокатную установку, манипуляторы и рольганги. Прокатная установка состоит из рабочей клетки, станины, каретки, оправки, механизма съема, разгиба и правки заготовки, ножниц, механизма загрузки и разгрузки, системы гидропривода, включающей гидронасосную станцию, систему трубопроводов и гидроцилиндры рабочие, а также комплекта электрооборудования, обеспечивающего общее электроснабжение установки и ее управление.

С освоением МАЗом выпуска грузовых автомобилей средней грузоподъемности возникла проблема изготовления подрессорника задней подвески. Подрессорник представляет собой короткий лист переменного сечения с большим перепадом толщин. Такой профиль невозможно получить по традиционной схеме прокатки — с за-

гибом заготовки. Для производства подрессорников была произведена модернизация опытно-промышленного прокатного стана СП-1298. Новая технология предусматривает прокатку одновременно двух заготовок. Внешний вид модернизированного стана СП-1298М представлен на рис. 5.

Свести к минимуму использование при изготовлении сложнопрофильных ответственных деталей машиностроительного и автомобильного производств таких трудоемких и низкопроизводительных операций как сварка и механическая обработка возможно за счет применения современных способов обработки металлов давлением для различных видов переменных профилей. Максимальные возможности по снижению металлоемкости производства и повышению качества деталей имеет периодическая прокатка. Созданные в ФТИ технологии и оборудование периодической прокатки (в общей сложности восемь прокатных станков) позволяют изготавливать значительную часть периодических профилей, применяемых на промышленных предприятиях Беларуси.

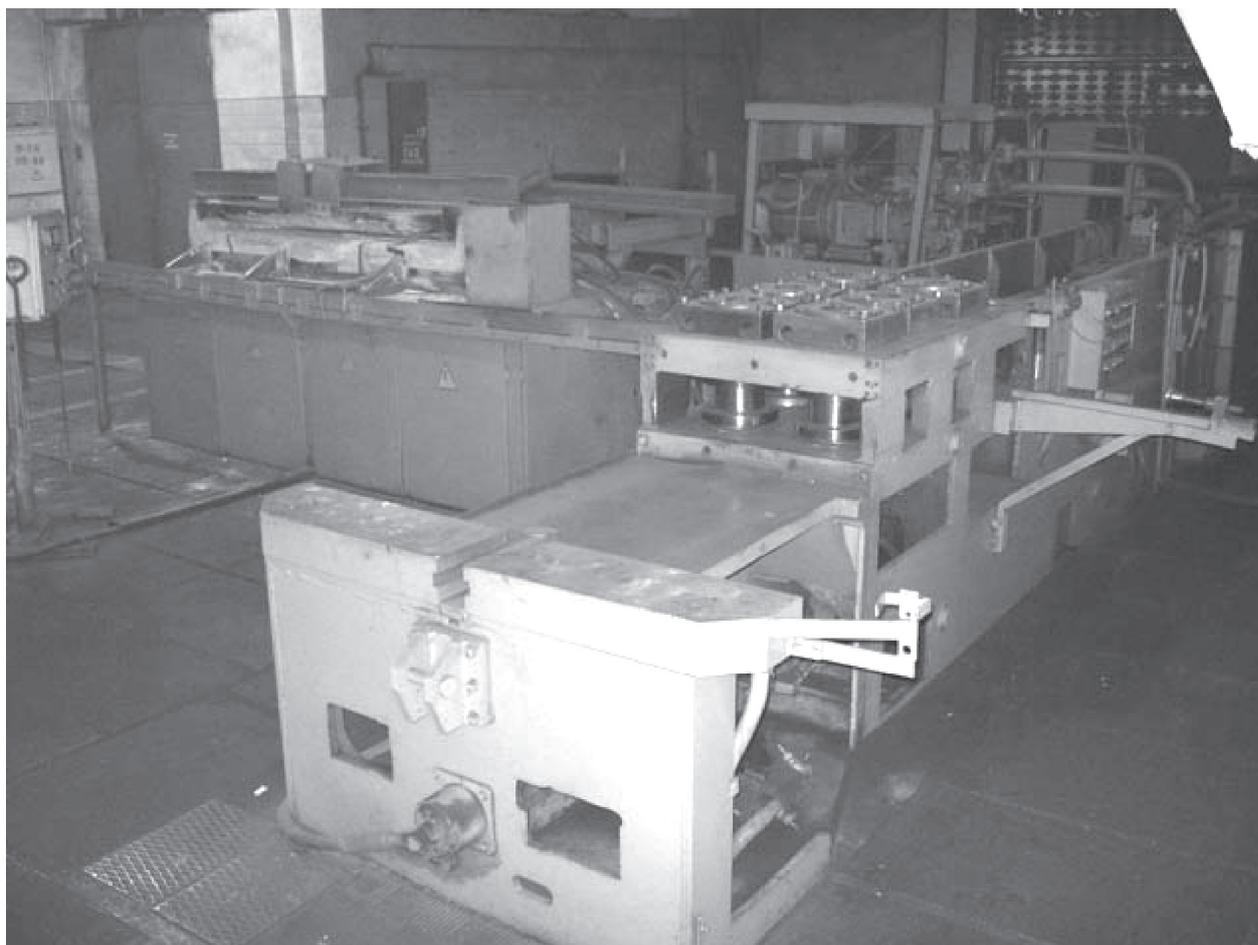


Рис. 5. Стан СП-1298М для прокатки заготовок прорессорника

В настоящее время в промышленности республики наблюдается острая потребность в использовании новых высокоэффективных, ресурсосберегающих технологий ОМД. В ФТИ ведутся работы в данном направлении. Поскольку «классические технологии» ОМД практически уже исчерпали себя, то проблемы интенсификации и удешевления производства могут быть решены лишь за счет 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 т. ч. импульсного, воздействия, совершенствования и интенсификации методов пластического формообразования. Восстановление способности деформированных сталей и сплавов к дальнейшей пластической деформации предполагает снятие внутренних напряжений. Поэтому необходимо отчетливое представление о механизме пласти-

ческой 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 мегомеханики, а также физики твердого 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 сложнолегированных и редкоземельных металлов и др.). Привлечение для изготовления деталей указанного типа методов импульсной и гидроударной штамповки позволит значительно

(в 3–5 раз) сократить металлоемкость 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 совместности схем напряженно-деформированного состояния с динамикой пластического формообразования на базе классической теории обработки металлов давлением с применением компьютерного моделирования, механики сплошных сред, современных представлений о контактном взаимодействии и разрушении жестко-пластических тел. Эти исследования являются научной основой дальнейшего развития производства изделий методом пластического формообразования, его совершенствования и интенсификации, создания новых наукоемких технологических процессов, в т. ч. комбинированных, и высокопроизводительного современного оборудования для их реализации.

Разрабатываемый новый способ реверсивной поперечной прокатки отличается воздействием на зерна металла в приконтактном слое за счет 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 сердцевиной 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 счет применения полых валов; замена валов из дорогостоящей нержавеющей стали на дешевые 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 счет 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. Будут осуществлена разработка технологий теплой штамповки с понижением температур нагрева заготовки. Научная новизна заключается в разработке условий деформирования при последовательном использовании различных схем напряженно-деформированного состояния, позволяющих максимально реализовать ресурс пластичности металла и обеспечить получение изделия с улучшенной структурой и более высокими механическими свойствами за счет оптимизации корреляционных характеристик схемы напряженного 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 заводов республики и за ее пределами.

Будут продолжены работы по совершенствованию и широкому использованию технологий, основанных на методах пластического деформирования для производства деталей ортопедических имплантатов для нужд Минздрава РБ, обладающие большой социальной значимостью и актуальностью. Степень удовлетворения медицинских и технических требований к свойствам материалов имплантатов определяет стоимость последних, 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 счет 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 сложнонагруженных деталей сельскохозяйственной техники будет решена за счет разработки технологии и специальной оснастки для формообразования, ее изготовления, испытания, наладки и организации производства по всему технологическому циклу на производственных площадях ГНУ «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», г. Бобруйск) повышение коэффициента использования металла с 0,13 до 0,52 для колец и с 0,36 до 0,9 для втулок; повышение производительности механообработки на 40–50 %; уменьшение расхода режущего инструмента на 25–30 %.

Будут осуществлена 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 к обработке плоских заготовок. Кроме придания особых механических свойств материалу лемехов и долот, рабочий цикл машины составит ~10 с. По сравнению с операцией фрезерования, применяющейся на РУП «Минский завод шестерен», производительность увеличивается в 5 раз. Износостойкость деталей, изготавливаемых методом термопластической обработки, установленных в результате предварительных испытаний на БелМИС и полевых испытаниях в агрохозяйствах, увеличивается в 1,5 раза. После внедрения на РУП «Минский завод шестерен» технология может быть ратифицирована на Минской области межрайонном объединении «Агропромтехника», Пинском ПО «Кузлитмаш», Дрогичинском трактороремонтном заводе, а также на других предприятиях концернов «Белагросервис», «Белагромаш».

УДК 666.3

## СИНТЕЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ФУТЕРОВОК ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

*А.Т. Волочко, А.А. Жукова, К.Б. Подболотов*  
Физико-технический институт НАН Беларуси  
г. Минск, Беларусь

*The paper discusses the possibility of production of porous ceramic materials by the method of chemical pore-formation using a synthetic wollastonite and silicon-containing components. The physicochemical properties and microstructure of obtained materials have been studied.*

*Obtainment of refractory protection coatings using the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) in the system Al – SiO<sub>2</sub> – MgO with application of different activation agents are considered in this paper. The role of part agents is identified and possible processes and mechanism of their influence on the synthesis of refractory protection coatings is shown. Investigation of physicochemical properties and regularities of coating obtainment are presented.*