

УДК 621.77

*В. Я. ЦУКИН, Г. В. КОЖЕВНИКОВА***БЕЛОРУССКАЯ ШКОЛА ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ***Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: fti@tut.by*

В настоящее время белорусская школа исследователей и технологов поперечно-клиновой прокатки признана одним из мировых лидеров по этому направлению. Описаны основные достижения белорусской школы поперечно-клиновой прокатки. Рассмотрены основные направления развития теории поперечно-клиновой прокатки. Представлены новые технологии и оборудование поперечно-клиновой прокатки.

Ключевые слова: пластическое деформирование, поперечно-клиновая прокатка, пластичность.

*V. Ya. SHCHUKIN, G. V. KOZHEVNIKOVA***BELARUS CROSS-WEDGE ROLLING SCHOOL OF THOUGHT***Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: fti@tut.by*

At present Belarus school of thought that unites cross-wedge rolling researchers and manufacturing engineers is recognized as one of the world leading schools of thought in this field. Major achievements of Belarus school of thought have been described. Main tendencies of cross-wedge rolling theory development are investigated. New cross-wedge rolling technologies and equipment have been presented.

Keywords: plastic deforming, cross-wedge rolling, plasticity.

Введение. Поперечно-клиновая прокатка (ПКП) – один из наиболее экономных способов изготовления давлением осесимметричных деталей при крупносерийном и массовом производстве. Он сочетает в себе экономное использование материала, высокую производительность, максимальное приближение прокатанной детали к профилю изделия, высокую для процессов обработки давлением точность изделий, широкие технологические возможности, высокую стойкость инструмента, возможность полной автоматизации процесса [1–3].

Области применения процесса: производство валов, осей, штифтов, пальцев для автомобилей, тракторов, самолетов, приборов, бытовой техники, железной дороги, инструментов, в том числе для горных и дорожных работ, сельхозтехники и др. Прокатка конструкционных сталей, ряда пластичных сплавов на основе меди, никеля, алюминия и циркония осуществляется без осложнений. Диапазон размеров деталей, освоенных в производстве, обеспечивает полностью потребности промышленности: диаметры от 1 до 190 мм, длины от 20 до 1000 мм [4, 5]. Процесс ПКП может также эффективно использоваться для производства винтовых поверхностей, шаров [6] или сочетаться со штамповкой при изготовлении поковок с удлиненной осью (например, шатунов автомобильных двигателей, вилок кардана).

Коэффициент использования металла при ПКП достаточно высокий для процессов обработки давлением и находится в диапазоне от 0,8 до 0,98. Значение 0,98 достигается редко, когда прокатанная деталь допускает утяжины на торцах и процесс ведется без обрезки концевых отходов. Часто процесс ПКП применяется в сочетании со штамповкой, которая осуществляется как до прокатки, так и после нее [7]. В этих случаях оба процесса проводят, как правило, с одним нагревом. Таким образом, производится штамповка лопаток авиационных двигателей, вилок кардана автомобиля, железнодорожных шурупов, гаечных ключей и других поковок с удлиненной осью. Точное дозирование заготовки при прокатке обеспечивает

повышение стойкости инструмента при штамповке до 2 раз и в ряде случаев позволяет осуществить безоблойную штамповку.

ПКП стальных поковок подразделяют на горячую прокатку – нагрев до 1170–1470 К, теплую прокатку – нагрев до 870–1070 К и холодную прокатку при 290 К. Нагрев до 1170–1470 К обеспечивает высокую пластичность прокатываемого материала и, как следствие, снижение усилий прокатки и вероятности вскрытия осевой полости внутри прокатываемой заготовки. Теплая прокатка снижает расход электроэнергии на нагрев, исключает образование окалины и обезуглероживание поверхности прокатываемой детали, улучшает чистоту поверхности до 0,6 Ra. При этом увеличиваются усилия прокатки, и для исключения осевой полости угол заострения клинового инструмента необходимо значительно уменьшать, что снижает производительность процесса [8]. Холодная ПКП имеет ограниченное применение и используется для высокопластичных металлов, таких как цирконий, или сплавов на основе меди и цинка.

Точность размеров прокатанных деталей зависит в основном от их габаритов и температуры нагрева. Для горячей прокатки точность размеров составляет $\pm 0,2$ мм на диаметре 30 мм и $\pm 0,5$ мм на длине 100 мм, для теплой и холодной прокатки – $\pm 0,01$ мм на диаметре 7 мм и $\pm 0,1$ мм на длине 40 мм.

Развитие ПКП в Беларуси. Первые работы по освоению ПКП начались в 70-х годах 20 в. Созданием теории процесса и разработкой оборудования занимались в СССР (в том числе в БССР), в Чехословакии, Германии и Японии. Второй этап развития ПКП идет в настоящее время. Исследованиями в области ПКП занимаются в Беларуси, России, США, Германии, Франции, Испании, Польше, Турции, Бразилии, Китае, Индии, Вьетнаме, Южной Корее.

Белорусская школа ПКП, занимает одно из лидирующих мест в мире в данной области. Первые исследования ПКП выполнены в Физико-техническом институте НАН Беларуси в 1969 г. [1, 2]. В настоящее время в институте на высоком уровне разработаны теоретические и технологические основы ПКП [5, 9]. По оснащенности станами ПКП и по количеству ученых и специалистов в этой области Беларусь, несомненно, занимает лидирующее место в мире.

Научные исследования в области ПКП продолжили известные работы академика АН СССР А. И. Целикова, академиков АН БССР С. И. Губкина, В. П. Северденко, А. В. Степаненко в области прочности и пластичности. В Физико-техническом институте НАН Беларуси при активном участии канд. техн. наук В. Я. Щукина создана белорусская школа ПКП. Значительный вклад в развитие ПКП внесли сотрудники Физико-технического института д-р техн. наук В. М. Сегал, д-р техн. наук Е. М. Макушок, канд. техн. наук Г. В. Андреев, канд. техн. наук В. А. Клушин, канд. техн. наук В. И. Садко, А. О. Рудович, канд. техн. наук А. С. Дубень, канд. техн. наук А. Н. Давидович, канд. техн. наук С. М. Красневский, Э. М. Горбунов, Э. А. Воронцов, Н. М. Бойко, К. Д. Кирдун, Н. В. Суша, А. А. Горностаи и др. Учениками школы ПКП Физико-технического института созданы фирмы ЗАО «Белтехнология и М» (директор канд. техн. наук В. И. Садко), ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг» (директор А. О. Рудович) [10]. Исследования ПКП осуществлялись в НИЛ пластичности НИЧ БНТУ (канд. техн. наук В. А. Клушин).

Белорусское оборудование и научные разработки белорусской школы ПКП экспортированы в США, Россию, Мексику, Китай, Южную Корею, Италию, Испанию, Индию, Вьетнам, Чехию, Австралию, всего в 18 стран мира. Около 200 ед. оборудования для прокатки, созданных специалистами белорусской школы ПКП, работают в этих странах. Это стало возможным благодаря тому, что в Физико-техническом институте НАН Беларуси (канд. техн. наук В. Я. Щукиным) создана классическая теория поперечной прокатки (ПП), исследованы напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации, условия устойчивого протекания процесса, впервые математически обосновано явление вскрытия осевой полости, получены математические модели, прогнозирующие качество прокатываемых изделий [1, 2, 9]. Разработаны и исследованы компьютерные модели ПКП на базе пакета программ LS-DYNA, определена достоверность параметров процесса, рассчитанных при помощи компьютерных моделей. В 2015 г. канд. техн. наук Г. В. Кожевниковой защищена первая в Беларуси докторская диссертация по ПКП. Получены значимые научные результаты: корректно решена задача ПП, отвечающая всем условиям

пластического течения, в том числе условие подобия и коаксиальности девиатора напряжений и тензора скоростей деформации, открыт совместно с канд. техн. наук В. Я. Щукиным эффект деформационной сварки при ПКП, установлены 3D-закономерности пластичности металла от инвариантов тензора и девиатора напряжений, решена 3D-задача определения кинематики и динамики ПКП, обнаружен эффект самоустановления сил трения при ПП и ПКП.

Первые международные научно-технические конференции, проведенные в Физико-техническом институте НАН Беларуси (в 2002, 2004, 2006 гг.), были посвящены исключительно технологиям ПКП. Они позволяют представителям разных школ и направлений ПКП обсудить результаты своей исследовательской деятельности и наметить перспективы и пути сотрудничества.

Достижением белорусской школы исследователей и разработчиков ПКП (ФТИ НАН Беларуси, БНТУ, ЗАО «Белтехнология и М», ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг») стала организация на 15 предприятиях республики (ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «БЕЛКАРД», ОАО «Борисовский завод агрегатов», РУП «Гомельский завод «Гидропривод», ОАО «Лидсельмаш», ОАО «Житковичский моторостроительный завод», ОАО «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО» и др.) производства поковок методом ПКП в объеме более 4000 т в год, что является самым высоким показателем в мире на душу населения. В настоящее время белорусская школа исследователей и технологов ПКП признана одним из мировых лидеров по этому направлению.

Научные исследования процесса ПКП. ПКП относится к объемным задачам обработки металлов давлением, трудно поддающимся теоретическому описанию вследствие того, что очаг деформации постоянно вращается вокруг оси заготовки и при этом перемещается вдоль ее оси [1, 10, 11]. Деформации и напряжения при прокатке характеризуются значительной неоднородностью, и их экстремальные сочетания могут сопровождаться существенной деградацией пластических свойств металла.

Для упрощения задачи исследования процесса ПКП объект исследования можно свести к плоскодеформированному состоянию, так как ПКП является частным случаем ПП, поэтому теоретические представления о ней базируются на закономерностях ПП. Это состояние абсолютно точно реализуется при ПП бесконечного цилиндра или приближенно при прокатке по всей длине цилиндра с отношением длины к диаметру более двух [1, 12]. При центрированном поле деформаций можно выделить в поперечном сечении заготовки при ПП пластическую область и две жесткие области, которые вращаются вокруг различных центров. *Методом верхнеграницной оценки* путем минимизации энергии процесса ПП может быть найдена оптимальная геометрия сечения [4], которая подтверждена как экспериментально, так и компьютерным моделированием.

На рис. 1, а показано полученное численным построением поле линий скольжения при ПП идеально пластического тела в условиях плоскодеформированного состояния [5]. Данное решение учитывает условие пластичности Треска – Сен-Венана, условие Гейрингер, параметры Леви и Мизеса, условия подобия и коаксиальности девиатора напряжений и тензора скоростей деформаций. Решение предусматривает разрывы скоростей по границам и внутри поля с отражением от контактной поверхности. Гидростатическое давление в очаге деформации определялось с учетом равенства моментов сил, способствующих и препятствующих вращению.

Анализ поля показывает наличие двух жестких областей за его пределами, которые вращаются вокруг центров O_1 и O_2 , а также изменение гидростатического давления от сжимающего вблизи контактной поверхности до растягивающего в осевой области (рис. 1, б). Аналогичную картину дает компьютерное моделирование ПП с помощью пакета LS-DYNA (рис. 1, в). Аналогичное значение напряжений показывает компьютерное моделирование процесса ПКП; отличие заключается в преобразовании жестких областей в псевдожесткие, в которых наблюдаются деформации на порядок меньше, чем в очаге деформации.

Современные тенденции развития производства требуют применения компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения при проектировании технологий и оборудования ПКП. Осуществлено компьютерное моделирование процесса ПКП [4, 13] методом конечных элементов с использованием пакетов ANSYS и LS-DYNA. Компьютерная модель процесса

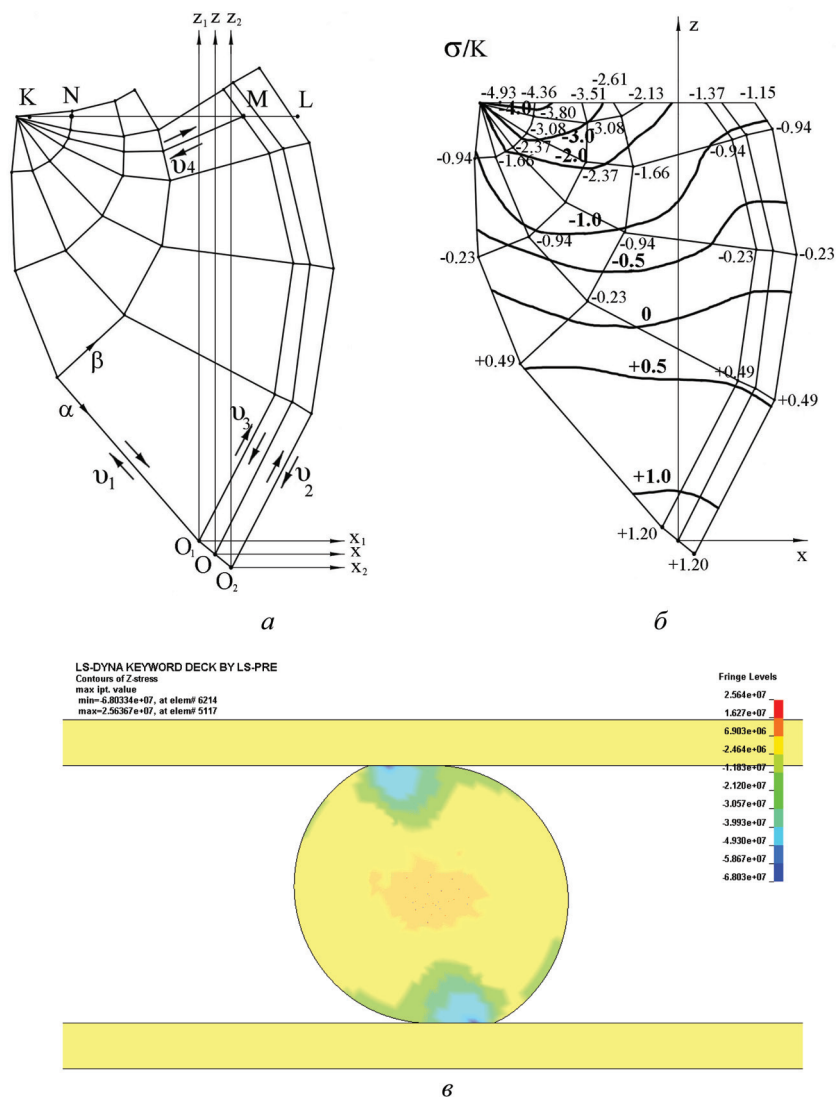


Рис. 1. Поле линий скольжения при поперечной прокатке идеально пластического тела в условиях плоскодеформированного состояния, полученное численным построением (а), результат расчета значения среднего напряжения σ/K в узлах поля линий скольжения (б) и распределение среднего нормального напряжения σ , полученное компьютерным моделированием (в)

ПКП учитывает многофакторность условий и характеристик, зависимых от граничных контактных условий, теплового режима, материала заготовки, влияющих в свою очередь на напряженно-деформированное состояние и энергосиловые параметры, которые лимитируют устойчивое протекание процесса, в том числе вскрытие осевой полости. Решаются задачи управления пространственным развитием пластического формообразования для различных технологических процессов ПКП. Моделирование позволило повысить эффективность процесса за счет наиболее полного использования ресурса пластических свойств металлов и сплавов.

Отличительной особенностью ПКП по сравнению с другими процессами обработки металлов давлением является высокая неравномерность напряженно-деформированного состояния в очаге деформации [14]. В области контакта заготовки с инструментом наблюдаются сжимающие напряжения и значительные накопленные деформации, в осевой области заготовки – растягивающее гидростатическое давление и значительные знакопеременные деформации, которые могут привести к разрушению металла в виде осевого вскрытия полости, известного как *эффект Маннесмана*. В других областях (между контактом и осью заготовки) величина гидростатического давления приближается к нулю и значения накопленных деформаций меньше, чем в двух указанных зонах.

Сжимающие напряжения и большие накопленные деформации в приконтактной (поверхностной) области заготовки приводят к завариванию микродефектов металла в этой области, что приводит к повышению усталостной прочности и износостойкости всего изделия. Так, усталостная прочность прокатанных шаровых пальцев автомобиля по сравнению со штампованными пальцами увеличилась в 2,5 раза, а износостойкость прокатанных осей транспортера по сравнению с точеными – на 20%.

Развиты теоретические основы процесса разрушения металлов при пластическом течении. В качестве одной из функций, характеризующей пластические свойства металлов, предложен и обоснован параметр третьего инварианта девиатора напряжений $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$, где $J_3(D_\sigma)$ – третий инвариант девиатора напряжений, Па³, K – пластическая постоянная, Па. Установлено, что *пластичность представляет собой поверхность* в пространстве «предельная степень деформации сдвига – среднее напряжение σ/K – параметр третьего инварианта девиатора напряжений $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ ».

Усовершенствован *деформационный критерий* разрушения, который наиболее точно описывает эффект вскрытия полости при ПП и ПКП [15]. Суть данного критерия заключается в том, что разрушение наступает тогда, когда суммарная накопленная деформация при постоянных параметрах процесса достигнет критического уровня, который для одного и того же металла изменяется в зависимости от большого количества факторов, в том числе и от напряжений. Показано, что на ресурс пластичности влияют температура нагрева, напряженное состояние, нелинейность накопления повреждаемости, немонотонность деформации [5].

Разработана методика и определен абсолютный показатель *нелинейности накопления повреждаемости*, который зависит от среднего напряжения, параметра третьего инварианта девиатора напряжений и степени деформации сдвига [5]. Установлено, что данный показатель уменьшается с ростом пластичности металла и соответственно со снижением среднего напряжения, и для него существует пороговое значение, при котором наступает линейное накопление повреждаемости.

Известно, что при немонотонном деформировании металл накапливает до разрушения значительно больше деформации, чем при монотонном, так как изменение направления деформации сопровождается некоторым «залечиванием» дефектов и частичным восстановлением пластичности. Количественно определено влияние *немонотонности деформации* на ресурс пластичности при ПП и ПКП. Доказано влияние напряженного состояния (в частности, среднего напряжения) на показатель увеличения пластичности при немонотонном деформировании.

Технологии ПКП, созданные в Физико-техническом институте НАН Беларуси

Обратная ПКП. Технологию ПКП можно строить таким образом, чтобы на отдельных, ограниченных по длине участках осуществлять увеличение исходного диаметра в 1,2–1,4 раза. Преимущество данного метода заключается в возможности использования заготовки диаметром, меньшим максимального диаметра изделия. Этим обеспечивается снижение обжатия, уменьшение длины инструмента и, как ни странно, снижение расхода металла вследствие уменьшения размеров утяжины на торцах поковки.

Параллельная ПКП. В отличие от традиционной прокатки ПКП осуществляется одновременно не двумя, а четырьмя или шестью клиньями. В результате длина инструмента существенно уменьшается, что наряду со снижением его стоимости увеличивает производительность процесса и позволяет применять более дешевый стан меньшего размера. Отрицательная сторона технологии – потребность привлечения специалиста более высокой квалификации при проектировании инструмента.

ПКП с обжатием $\delta = 2-4$. Традиционная технология ПКП ограничена обжатием $\delta = 2$ за один переход прокатки, т. е. уменьшением диаметра заготовки при прокатке в два раза. При дальнейшем увеличении обжатия происходит разрыв заготовки на две части из-за чрезмерных растягивающих усилий. Специальная конструкция клинового инструмента позволяет снизить их и довести максимальное обжатие до $\delta = 4$. Преимущество данной технологии – уменьшение

длины инструмента и соответственно его стоимости, так как отпадает необходимость осуществлять прокатку в два прохода. Используется данная технология в случаях, когда перепад диаметров в поковках превышает двукратную величину.

Реверсивная ПКП. В этом случае одному из двух клиновых инструментов придают колебательное движение от дополнительного привода [16]. В результате создается более благоприятное напряженное состояние в очаге деформации, что снижает вероятность вскрытия осевой полости и улучшает условия устойчивого протекания процесса без проскальзывания заготовки по инструменту. Также уменьшается усилие на основном приводе стана, что позволяет увеличить скорость прокатки и поднять производительность процесса.

ПКП в камере высокого давления. Компьютерное моделирование процесса ПКП показало, что увеличение внешнего давления многократно снижает вероятность вскрытия осевой полости. Обеспечивается возможность прокатки малопластичных сплавов или традиционно используемых сплавов без их нагрева. Отрицательная сторона технологии – сложность и удорожание оборудования.

Сварка при ПКП. Исследование напряженно-деформированного состояния при ПКП позволило авторам предложить новый способ получения слоистых валов [17]. Высокие значения сжимающих напряжений и накопленных деформаций в поверхностных слоях прокатываемой заготовки позволяют производить деформационную сварку в этой области. Если на заготовку-основу из одного материала поместить тонкую втулку из другого материала, собранную конструкцию нагреть и затем прокатать, то оба материала качественно свариваются между собой. Исследования прочности шва на отрыв и сдвиг частей заготовки показывают его высокую прочность. Новая конструкция слоистых валов может эффективно использоваться с целью повышения прочности, коррозионной стойкости и снижения массы.

Планетарное разделение заготовок. Разработано устройство планетарного разделения заготовки, с помощью которого от прутка, нагретого ТВЧ, отрезается заготовка требуемых размеров с торцами в виде конусов. После чего с этого же нагрева заготовка подается в стан ПКП. Когда торец заготовки выполнен в виде конуса, полость утяжины заполняется металлом из конусной части заготовки, в результате концевые отходы уменьшаются в 3–4 раза.

Штамповка-прокатка. Освоена прокатка винтов с высотой зуба 3–5 мм методом ПКП на плоскоклиновых станах [7]. По сравнению с традиционной накаткой резьбы тремя валками данная технология обеспечивает многократное увеличение стойкости инструмента и точность шага резьбы (рис. 2).

Оборудование ПКП. За последние 50 лет накоплен опыт создания и эксплуатации станов ПКП различных схем, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Станы с плоским клиновым инструментом предназначены для высокоточной прокатки, так как они обеспечивают точное перемещение инструментов, которые могут быть изготовлены в свою очередь с высокими точностью и твердостью. Благодаря высокой твердости стойкость таких инструментов (с ремонтами) позволяет произвести более миллиона прокатанных деталей. Инструмент из-

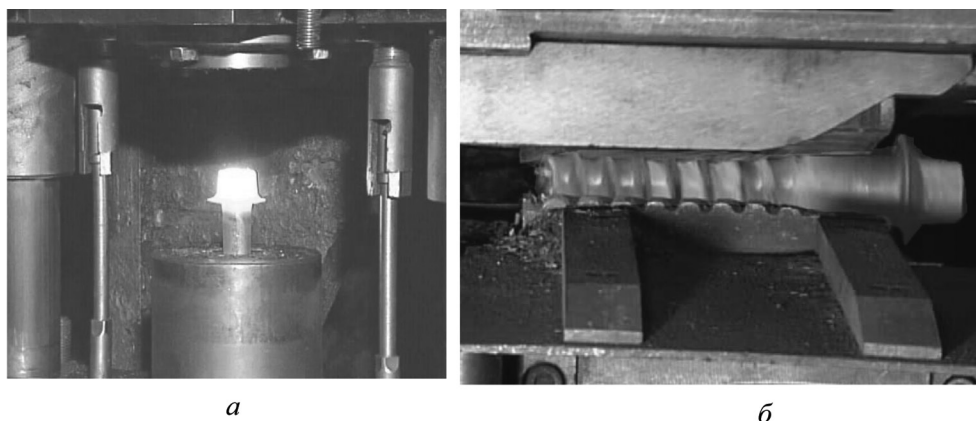


Рис. 2. Технология штамповки (а) и ПКП (б) шурупа путевого

готовавливается на универсальном металлорежущем оборудовании и характеризуется низкой себестоимостью. Быстрая замена инструмента (в том числе автоматическая) позволяет на одном стане производить большое количество различных типоразмеров деталей. Плоскоклинковые станы ПКП вследствие своих конструктивных особенностей априори легче и дешевле валковых.

Валковые станы ПКП предназначены для массового производства небольшого количества типоразмеров деталей обычной точности. Они более производительные, так как у них отсутствует холостой ход инструмента. Валковый инструмент необходимо изготавливать на специализированных станках с ЧПУ, он массивней плоского инструмента, в связи с чем не может быть закален до высокой твердости, что снижает его стойкость. Длина инструмента на валковых станах ПКП значительно больше чем на плоских станах. Относительно невысокая стойкость валкового инструмента, более низкая точность его изготовления по сравнению с плоским инструментом, трение и вибрация заготовки в направляющих линейках стана снижают точность размеров прокатываемых деталей.

В Беларуси в основном разрабатываются станы ПКП с плоским клиновым инструментом (рис. 3). Такое оборудование позволяет достигать более высокой точности и качества прокатанных деталей, обеспечивать более низкую себестоимость производства деталей. Рынок оборудования для ПКП плоским инструментом практически полностью принадлежит белорусской школе ПКП. Опыт работы авторов по внедрению оборудования ПКП показывает, что окупаемость прокатного оборудования составляет от 0,5 до 1 г. [18].

Оборудование ПКП и научные разработки, созданные специалистами белорусской школы ПКП, экспортированы в США, Мексику, Республику Корея, Индию, Турцию, Вьетнам, Испанию, Австралию, Болгарию, Польшу, Россию, Украину, Казахстан, Молдову, Литву, Китай, Чехию, Италию. Экспортная выручка составила десятки миллионов долларов США:

от Физико-технического института НАН Беларуси в Болгарию – 3 комплекса, в Италию – 1 стан, в Чехию – 1 комплекс, в Южную Корею – 6 контрактов на стан, инструмент и научные исследования, в Индию – 2 контракта на инструмент и документацию, во Вьетнам – 1 стан, в Казахстан – 2 договора на инструмент и комплекс, в Испанию – контракт на научные исследования, в Россию – 14 комплексов, в Китай – контракт на документацию, в Австралию – инструмент и изделия, в Украину – 5 комплексов, в Молдову – 1 комплекс, в Литву – 2 комплекса. Стоимость одного комплекса от 60 тыс. до 500 тыс. долларов США;

от ООО «АМТинжиниринг» – 35 комплексов стоимостью от 500 тыс. до 1 млн долларов США каждый;

от ЗАО «Белтехнология и М» – 31 комплекс стоимостью от 500 тыс. до 1 млн долларов США каждый.

В Физико-техническом институте НАН Беларуси под руководством канд. техн. наук В. Я. Щукина разработана и внедрена в промышленность гамма автоматизированных комплексов ПКП для широкого диапазона прокатываемых заготовок диаметром от 12 до 190 мм. Организовано производство станков ПКП по документации Физико-технического института НАН Беларуси как в Республике Беларусь, так и за рубежом. За последние 10 лет были созданы: стан ПКП ПМ 5.055 для Ханойского университета технологий, Вьетнам, стан ПКП ПМ 5.155 для фирмы Sun Steel Stock Company, Южная Корея (рис. 3); стан ПКП ПМ 5.150 для ОАО «БЕЛКАРД» (Гродненский завод карданных валов); стан ПКП FTI-550 для фирмы Mascot (India) Tools & Forgings Pvt. Ltd., стан реверсивной прокатки, стан



Рис. 3. Стан ПМ5-155 конструкции Физико-технического института НАН Беларуси, разработанный по заказу фирмы Sun Steel Stock Company, Южная Корея

трехвалковой прокатки для фирмы Sun Steel Stock Company, Южная Корея, станы ПКП для Korea Testing Laboratory, Южная Корея, стан ПКП для Shandong Taijin Net Shape Forming Products Co., Ltd., Китай и др.

Список использованной литературы

1. *Щукин, В. Я.* Основы поперечно-клиновой прокатки / В. Я. Щукин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 223 с.
2. Поперечно-клиновая прокатка в машиностроении / А. И. Целиков [и др.]; под общ. ред. А. И. Целикова. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.
3. *Кожевникова, Г. В.* Развитие теории и технологии формообразования осесимметричных ступенчатых деталей поперечной прокаткой / Г. В. Кожевникова. – Минск: Белорусская наука, 2005. – 183 с.
4. *Кожевникова, Г. В.* Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г. В. Кожевникова. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 291 с.
5. *Kozhevnikova, G.* Cross-wedge rolling / G. Kozhevnikova. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2012. – 321 с.
6. *Кожевникова, Г. В.* Разработка технологии получения анодных шаров / Г. В. Кожевникова // Литье и металлургия. – 2015. – № 3(80). – С. 118–122.
7. *Кожевникова, Г. В.* Комбинированный процесс поперечно-клиновой прокатки и штамповки / Г. В. Кожевникова // Инновации в машиностроении: сборник трудов VII Международной научно-практической конференции / под ред. В. Ю. Блюменштейна. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – С. 443–446.
8. *Кожевникова, Г. В.* Особенности теплой поперечно-клиновой прокатки / Г. В. Кожевникова // Инновации в машиностроении: сборник трудов VII Междунар. науч.-практ. конф.; под ред. В. Ю. Блюменштейна. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – С. 447–450.
9. 楔横轧理论与成形技术 / 束学道, Valery Ya. Shchukin, G. Kozhevnikova, 孙宝寿, 彭文飞 (Теория и технология формирования поперечно-клиновой прокаткой / Шу Сюэдао, В. Я. Щукин, Г. В. Кожевникова, Сунь Баошоу, Пен Вэньфэй). – 科学出版社 (Академическая библиотека университета Нинбо, Китайская Народная Республика), 2014. – 314 с.
10. *Щукин, В. Я.* Новое в поперечно-клиновой прокатке / В. Я. Щукин, Г. В. Кожевникова, А. О. Рудович // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 3. – С. 35–37.
11. *Кожевникова, Г. В.* Условия устойчивого протекания поперечной и поперечно-клиновой прокаток / Г. В. Кожевникова // Вестн. Белорус.-Российс. ун-та. – 2009. – № 1 (22). – С. 44–53.
12. *Кожевникова, Г. В.* Построение эпюр контактных напряжений на границе инструмент–заготовка при поперечной прокатке / Г. В. Кожевникова // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 1. – С. 94–99.
13. *Абрамов, А. А.* Использование пакета LS-DYNA для компьютерного моделирования процесса поперечно-клиновой прокатки / А. А. Абрамов, Г. В. Кожевникова // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 2. – С. 41–50.
14. *Астапчик, С. А.* Исследование пластичности металла заготовок поперечно-клиновой прокатки / С. А. Астапчик, Г. В. Кожевникова // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 3. – С. 31–36.
15. *Кожевникова, Г. В.* Деформационный критерий разрушения при пластическом течении / Г. В. Кожевникова // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 2. – С. 61–68.
16. Способ изготовления изделий типа ступенчатых валов поперечно-клиновой прокаткой: пат. 2368448 РФ: МПК В21 Н 1/18 / Г. В. Кожевникова; заявитель ФТИ НАН Беларусі. – № 2008106994; заявл. 22.02.2008; опубл. 27.09.2009 // Официальный бюллетень изобретения. Полезные модели [Электронный ресурс] / Федеральн. служба по интеллект. собственности, патентам и товарным знакам. – 2009. – № 27.
17. Способ изготовления осесимметричной слоистой ступенчатой детали: пат. 13417 Респ. Беларусь: МПК В21 Н 1/00. / В. Я. Щукин, Г. В. Кожевникова; заявитель ФТИ НАН Беларусі. – № а20081431; заявл. 13.11.2008; опубл. 30.08.2010 // Афіцыйны бюлетэнь / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 4. – С. 74, 75.
18. *Shchukin, V. Y.* Cross-wedge rolling at PTI NAS Belarus / V. Y. Shchukin, G. V. Kozhevnikova, V. V. Petrenko // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 201–202. – P. 1198–1202.

Поступила в редакцию 10.12.2015