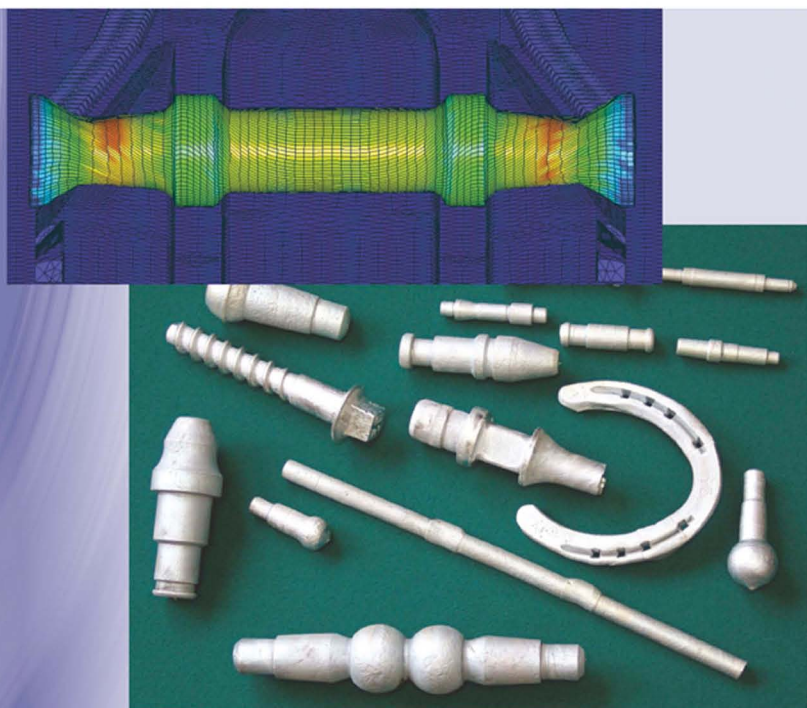




Г. В. Кожевникова

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ



УДК 621.771.013

Кожевникова, Г. В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г. В. Кожевникова. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 291 с. – ISBN 978-985-08-1231-5.

Изложены теоретические основы процесса поперечной прокатки. Предложены математические модели поверхности деформируемости. Рассмотрены критерии устойчивого протекания поперечной и поперечно-клиновой прокатки. Широко рассмотрены вопросы применения информационных технологий при исследовании и разработке процессов поперечной и поперечно-клиновой прокатки. Разработаны рекомендации по усовершенствованию технологии и оборудования поперечно-клиновой прокатки с целью увеличения производительности процесса и повышения коэффициента использования металла.

Рассчитана на специалистов в области обработки металлов давлением, может быть полезна аспирантам и студентам вузов.

Табл. 76. Ил. 178. Библиогр.: 172 назв.

Р е ц е н з е н т ы:

доктор технических наук, профессор К. Е. Белявин;
доктор технических наук А. В. Алифанов

ISBN 978-985-08-1231-5

© Кожевникова Г. В., 2010
© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2010

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении валов и осей в условиях массового и крупносерийного производства в настоящее время используются разнообразные способы обработки металлов давлением (ОМД), так как они придают изделиям повышенные механические свойства, обеспечивают высокую производительность труда и экономное использование металла. Особое место среди них занимает поперечно-клиновая прокатка (ПКП). От других процессов ее выгодно отличает высокий коэффициент использования металла (КИМ), возможность полной автоматизации процесса, максимальное приближение прокатанной детали к профилю изделия, широкие технологические возможности, высокая стойкость инструмента, низкий уровень шума, отсутствие источников виброколебаний. По экономичности горячая ПКП превосходит штамповку на молотах, прессах, ковочных машинах.

Мировые тенденции устойчивого экономического развития в ближайшие десятилетия связаны в первую очередь с решением глобальной проблемы оптимизации ресурсопотребления и ресурсосбережения. Технологии ПКП, обеспечивающие КИМ 0,8–0,98, полностью соответствуют этим требованиям рынка и сводят к минимуму затраты на хранение и утилизацию отходов. В связи с этим ПКП является одним из перспективных направлений ОМД.

Методом ПКП изготавливается широкая номенклатура изделий типа тел вращения с удлиненной осью. Их конфигурация может быть самой разнообразной: цилиндрические, конические и сфероидальные поверхности со всевозможными канавками и выступами. Методом ПКП могут обрабатываться практически все конструкционные стали, ряд инструментальных сталей, а также сплавы на основе меди, титана, никеля, циркония. В процессе

эксплуатации прокатанные изделия отличаются более высокой прочностью и износостойкостью. За один проход инструмента диаметральные размеры могут быть уменьшены в 4–8 раз. При этом обеспечивается изготовление деталей или полуфабрикатов диаметром от 2 до 120 мм, длиной от 40 до 1000 мм, максимально достигаемая точность – 0,01 мм (на диаметре 7 мм), максимально достигаемая шероховатость поверхности – 0,6 Ra.

В металлообрабатывающей промышленности технологии, базирующиеся на использовании метода ПКП, используются для производства промежуточных профилированных заготовок под последующую точную штамповку или иные процессы пластического формообразования, а также под чистовую механическую обработку. Кроме того, существует достаточно обширная группа изделий, например валы и оси в сельхозмашиностроении, для которых данный метод позволяет получать готовую деталь. ПКП используется в автомобильной промышленности, тракторо- и сельхозмашиностроении, станкостроении, горном, дорожном, строительном машиностроении, приборостроении, энергетическом машиностроении, при производстве бытовой техники, в оборонной промышленности, железнодорожном машиностроении, авиастроении и атомной промышленности.

Первая волна освоения ПКП началась с 1970-х годов. Созданием теории процесса и разработкой оборудования занялись в СССР (в том числе в БССР), Чехословакии, Германии и Японии.

Вторая волна развития ПКП происходит в настоящее время. К исследованиям ПКП подключились научные организации США, Китая, Бразилии, Украины, Польши.

Лидирующее место в развитии ПКП занимает Республика Беларусь. Здесь в настоящее время исследованиями, созданием оборудования, разработкой технологии прокатки занимаются четыре организации; завоевана своя ниша на мировом рынке продаж оборудования ПКП. Более трети изобретений в мире в области ПКП принадлежит Республике Беларусь и почти половина мирового производства оборудования ПКП сосредоточена в республике. Удержание лидирующих позиций в мире в указанной области, несомненно, значимо для национальных интересов. Промышленность республики в современных условиях может быть

конкурентоспособна только при условии создания высокопроизводительных и ресурсосберегающих производств изделий высокого качества. Ситуация накладывает требования к достижению более высоких показателей оборудования и технологии ПКП, которые могут быть реализованы на базе дальнейшего развития теории процесса и совершенствования технологии ПКП, чему и посвящена настоящая монография.

Технология ПКП за последние 40 лет достигла высокого уровня, удовлетворяющего требованиям промышленного производства Республики Беларусь. В то же время отдельные аспекты теории и технологии процесса требуют дальнейшего развития и совершенствования, чтобы соответствовать уровню техники ведущих промышленных стран. Для удержания завоеванных позиций и поддержания конкурентоспособности оборудования и технологии прокатки необходимо их дальнейшее совершенствование на базе научно обоснованных рекомендаций. В этой связи развитие теории и технологии ПКП, несомненно, актуально. Значимый эффект принесут новые технологии, обеспечивающие увеличение коэффициента использования металла и повышающие производительность процесса.

В последнее время происходит активное внедрение информационных технологий при исследовании и разработке новых технологических процессов ПКП. Одно из возможных решений внедрения информационных технологий в прокатное производство связано с разработкой и использованием систем автоматизации проектирования, которые позволяют повысить технологичность и гибкость принимаемых проектных решений, снизить трудоемкость работ и повысить их качество. Другое не менее важное решение связано с использованием современных подходов компьютерного моделирования при исследовании технологии ПКП, это позволит избежать проведения натурных экспериментов и связанных с ними затрат, получить характеристики напряженно-деформированного состояния и выявить наиболее проблемные зоны прокатываемых заготовок.

Автор выражает благодарность сотрудникам отдела технологической деформируемости Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Элементы процесса поперечно-клиновой прокатки

Схема осуществления поперечно-клиновой прокатки (ПКП) плоским инструментом [1, 2] показана на рис. 1.1. Заготовка, предварительно нарубленная на прессе, укладывается поперек заходной части неподвижного клинового инструмента. Подвижный клиновой инструмент перемещается параллельно неподвижному, внедряется в заготовку, вызывая ее вращение. Оба клиновых инструмента имеют боковые наклонные грани М, которые заставляют перемещаться избытки металла по направлению к торцам, тем самым удлиняя заготовку. Оставшаяся часть металла профилируется калибрующими поверхностями К инструмента, приобретая их негативный профиль. Так, непрерывно перекатывая заготовку вдоль неподвижного клинового инструмента, последовательно от центральной части к торцам оформляют требуемый профиль детали. На заключительной стадии прокатки специальными ножами Н, установленными по обе стороны инструмента, отрезают избытки металла от окончательно спрофилированной детали. Прокатанную деталь удаляют, а подвижный инструмент возвращают в исходное положение.

Для снижения усилий прокатки и повышения пластических свойств металла заготовку нагревают до 873–1473 К. Нагрев может быть произвольным, однако наиболее часто применяется нагрев токами высокой частоты (ТВЧ), так как он обеспечивает полную автоматизацию нагрева и незначительные потери на угар металла.

Основными параметрами ПКП являются: степень обжатия и геометрия инструмента. Принято степень обжатия определять, как

$$\delta = D/d, \quad (1.1)$$

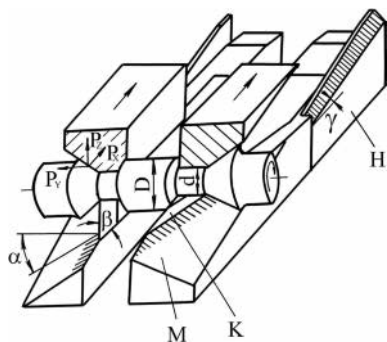


Рис. 1.1. Схема ПКП плоским инструментом

где D – исходный диаметр заготовки; d – диаметр прокатываемого стержня (рис. 1.1).

Геометрия инструмента определяется углом заострения клина β и углом наклона боковой грани α (рис. 1.1). Угол β определяет скорость распространения очага деформации (ОД) вдоль оси заготовки, угол α – размер контакта заготовки с инструментом и соответственно размеры ОД. Заходный участок клина и отрезной нож задаются углом подъема γ .

Усилия, возникающие при прокатке, принято раскладывать на три составляющие: P_X – усилие прокатки (рис. 1.1), P_Y – осевое усилие, P_Z – распорное усилие. Полное усилие деформирования равно векторной сумме усилий P_X , P_Y , P_Z . Усилие прокатки P_X в основном определяет усилие привода стана $P_{пр}$:

$$P_{пр} = P_X + \mu P_Z, \quad (1.2)$$

где μ – коэффициент трения по Амонтону в направляющих подвижной плиты стана.

Осевое усилие P_Y создает растягивающее напряжение в прокатываемом стержне диаметром d (рис. 1.1). За счет этого предотвращается искривление оси обрабатываемой заготовки. Если эти напряжения превосходят предел текучести материала, происходит внеконтактная деформация растяжения прокатываемого стержня с образованием утонения. Если напряжения превосходят предел прочности, происходит обрыв стержня. Обрыв прокатываемого стержня является одним из ограничений устойчивого протекания процесса.

Вторым ограничением устойчивого протекания процесса является потеря сцепления заготовки с инструментом. Это наблюдается в том случае, когда сил трения на контакте (в сумме с проекцией нормального усилия на плоскость YOZ) недостаточно для

создания момента сил, обеспечивающих вращение заготовки. Для увеличения сил трения на боковой наклонной грани инструмента (рис. 1.1), как правило, выполняют технологическую поперечную насечку или электроэрозионной обработкой создают грубую поверхность.

Распорное усилие P_Z замыкается в прокатной клетке стана и определяет упругую деформацию его станины. Чем больше упругая деформация станины, тем ниже точность получаемых изделий. Основными задачами исследования процесса ПКП является определение области α , β , δ , в которой устойчиво протекает прокатка, а также выявление подобласти α' , β' , δ' , в которой достигается максимальное качество прокатанных деталей [3–5].

ПКП относится к объемным задачам обработки металлов давлением (ОМД), трудно поддающимся теоретическому описанию вследствие того, что очаг деформации постоянно вращается вокруг оси заготовки и при этом перемещается вдоль ее оси. Деформации и напряжения при прокатке характеризуются значительной неоднородностью, и их экстремальные сочетания могут сопровождаться существенной деградацией пластических свойств металла. ПКП является частным случаем поперечной прокатки (ПП), поэтому теоретические представления о ней базируются на закономерностях ПП, основы которой созданы советскими учеными: А. И. Целиковым, В. С. Смирновым, В. П. Северденко, П. К. Тетериним, П. И. Полухиним, И. М. Павловым, В. А. Луневым, Д. М. Ломсадзе, Е. М. Макушком, Б. А. Калединым, В. Я. Щукиным и др., а также зарубежными учеными: E. Sfebel, F. Reulaux, J. Torca, F. Koka, W. Johnson, H. Kudo, M. Hayama, T. Awano и др. [3–26].

К основным ограничениям, налагаемым на процесс ПКП, относится вскрытие осевой полости. Это явление, известное как эффект Маннесмана, характерно для большинства разновидностей процесса ПП. В литературе [27–31] описаны различные гипотезы, качественно объясняющие причины разрушения металла в осевой области заготовки. Исследования в области разрушения металла при пластическом деформировании базируются на работах С. И. Губкина, В. Л. Колмогорова, Г. А. Смирнова-

Аляева, Л. Д. Соколова, А. А. Богатова, В. А. Огородникова, А. А. Коставы, Е. М. Макушка, В. Я. Щукина, С. М. Красневского и др. [31–47].

С использованием феноменологической теории вязкого разрушения В. Л. Колмогорова [31] в работах ФТИ НАН Беларуси показано [1, 39], что явление вскрытия осевой полости может быть описано количественно. Это позволяет прогнозировать явление осевого разрушения и за счет изменения технологических параметров процесса достигать необходимого уровня ресурса пластичности материала. Опыт промышленного применения ПКП также свидетельствует, что для достаточно широкой группы материалов возможно устанавливать определенные технологические параметры (геометрию инструмента, степень обжатия, температуру прокатки), которые исключают вскрытие осевой полости.

1.2. Исторический и научный обзор

Первое промышленное применение ПКП отмечено в 1949 г. на Горьковском автозаводе [48]. Здесь под руководством А. Ф. Балина был внедрен стан ПКП с винтовыми калибрами для прокатки заготовки шатуна под штамповку. Переход от винтовой прокатки к валковой ПКП был сделан А. Ф. Балиным в 1961 г.

Широкое развитие процесс получил в 1970-х годах [49–53]. Валковые станы созданы в ГПКТИ (г. Горький) под руководством А. Ф. Балина, во ВНИИМЕТМАШ (г. Москва) под руководством академика АН СССР А. И. Целикова, во ВНИИТМАШ (г. Волгоград) под руководством Ю. Н. Веремеевича, валково-сегментные станы – в ЭНИКМАШ (г. Воронеж) под руководством Л. Н. Никольского, станы с плоским клиновым инструментом – в ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (ФТИ НАН Беларуси).

В это же время разрабатываются станы ПКП за рубежом [54–60]. Валковые станы созданы фирмой «Smeralovy zavody narodni podnik», ЧССР, фирмами «Mitsubishi Jukoguo Kaisha», «Mitsubishi Heavy Industries», Япония, фирмой «General Motors»,

США. Станы с плоским клиновым инструментом разработаны фирмой «VEB Kombinat Umformtechnik», ГДР, сегментный стан – фирмой «Plasomet», ПНР.

Несколько позже внедрением процесса ПКП начинают заниматься в СССР п/я Г-4086 (г. Ижевск), филиал НИИТОП (г. Ростовна-Дону), РПКТИ тракторостроения (г. Рубцовск), ВПО КПО им. М. И. Калинина (г. Воронеж), ПО «Электростальтяжмаш» (г. Электросталь), СПКТБ «Стройдормаш» (г. Харьков), НПО ВПКТИ «Стройдормаш» (г. Киев), МПКТИ (г. Минск), ПО «Прогресс» (г. Ленинград), БПИ (г. Минск), НПО «Комплекс» (г. Минск), НИИТехноприбор (г. Смоленск), ПТКБС (г. Одесса), НИИТКРИОГЕНМАШ (г. Одесса), НИИ тракторосельхозмаш (г. Москва), ВПТИ Электро (г. Ленинград) и др.

За счет импорта прокатного оборудования расширяется число стран, применяющих в промышленности метод ПКП: Болгария, Венгрия, Великобритания, ФРГ, Франция, Италия и др.

Исследование ПКП в Горьковском проектно-конструкторском технологическом институте (ГПКТИ) проведены А. Ф. Балиным, И. В. Роговым, О. Д. Поздняковым и др. [61–64]. По результатам исследовательских работ защищены кандидатские диссертации И. В. Роговым (1973 г.), О. Д. Поздняковым (1980 г.). Докторская диссертация А. Ф. Балина (1973 г.) посвящена профилированию заготовок перед штамповкой методами продольной и поперечной прокатки.

Первые публикации, касающиеся исследований валковой ПКП, были сделаны в 1962 г. В них рассмотрены усилия, действующие на металл при прокатке; экспериментально определены максимально достижимые обжатия при прокатке инструментом с параметрами: $\beta = 5^\circ 10'$, $\alpha = 45^\circ$, $\delta = 1,6$. Рассмотрены вопросы распределения сил трения на контакте. Показано, что имеются области, в которых трение способствует вращению заготовки, и области, в которых трение препятствует вращению. Сделан ряд допущений в рассмотрении кинематики движения заготовки по инструменту. В итоге определено скольжение заготовки по инструменту, предложены формулы для расчета энергии, затрачиваемой на трение на контакте. Принятые допущения оказались недостаточно строгими.

В диссертационной работе О. Д. Позднякова предложено при расчете усилий ПКП учитывать цикличность нагружения металла и возникающие при этом эффекты его разупрочнения. Была сделана попытка применить метод полей линий скольжения (ЛС) для расчета напряжений в меридиальной плоскости образца. Для снижения вероятности вскрытия осевой полости использовано искусственное искажение ОД для внесения в него элементов асимметричности путем рассогласования вращения валков по фазе.

Таким образом, в ГПКТИ положено начало разработки теории ПКП. Здесь установлены основные закономерности относительного движения инструмента по заготовке, сформулированы условия устойчивого протекания процесса, разработан метод расчета усилий деформирования, мощности и энергии процесса. Эти положения отчасти развивались параллельно в других организациях, отчасти уточнялись новыми исследованиями.

Исследования ПКП в Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина проведены А. К. Григорьевым, Ю. К. Луневой, Б. В. Садовниковым, Р. В. Семибратовым и иностранцами П. Тихауэром и К. Крюгером (ГДР). По результатам работ защищены кандидатские диссертации П. Тихауэром (1963 г.) и К. Крюгером (1981 г.).

Публикации результатов исследований в 1962–1965 гг. свидетельствуют, что работы проводились одновременно с работами ГПКТИ. В этих работах [65, 66] исследован тот же круг вопросов: геометрия контакта, усилия деформирования, условия устойчивого протекания процесса. Экспериментально установлены максимально достигаемые обжатия в широком диапазоне углов клиньев: $6^\circ > \beta > 2^\circ 45'$, $60^\circ > \alpha > 30^\circ$. В отличие от работ ГПКТИ установлено, что диаметр качения меньше исходного диаметра на 14%.

В 1974 г. А. К. Григорьевым, Б. В. Садовниковым и другими выполнена работа по исследованию процесса прошивки полой заготовки и последующей прокатки клиньями валов электродвигателей. Одним из этапов работы была разработка программы расчета на ЭВМ «Наири» энергосиловых параметров ПКП.

Анализ имеющихся формул для расчета контактных поверхностей, предложенных А. Ф. Балиным, Н. Т. Удовиным, М. В. Васильчиковым, показал, что они дают расхождение в результатах расчета и удовлетворительно коррелируются с экспериментальными результатами.

В 1975 г. А. К. Григорьев, Р. В. Семибратов, Ю. К. Лунева и другие провели исследование холодной ПКП. Установлено, что оптимальными углами являются $\beta = 1^\circ 30'$, $\alpha = 18^\circ$. При холодной ПКП наблюдалось разрушение по поверхности металла в виде шелушения, которое устранялось подбором режимов обработки (α , β , δ) и применения смазки. Дальнейшее развитие исследования холодной ПКП (полых деталей) получили в диссертационной работе К. Крюгера.

Исследования ПКП во Всесоюзном ордена Ленина научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте металлургического машиностроения (ВНИИМЕТМАШ) проведены И. И. Казанской, А. С. Сафоновым, А. В. Матвеевым, Б. Ф. Садовским и другими под руководством академика АН СССР А. И. Целикова. По результатам работ защищена кандидатская диссертация А. В. Матвеевым (1982 г.).

Первые публикации об исследованиях были сделаны в 1965 г. [67, 68]. Значительное внимание в исследованиях уделено определению контактных поверхностей. Показано, что при ПКП возможны две разновидности формы контактной поверхности, определен критерий возникновения той или иной формы.

Площадь контакта определена интегрированием уравнения ограничивающей ее линии в заданной области. Уравнения линий получены совместным решением системы уравнений, описывающих поверхности заготовки. В итоге составлены сложные выражения для определения контактных поверхностей.

Усилия деформирования найдены как произведение соответствующих проекций площадок контакта на среднее контактное напряжение с учетом воздействия составляющих сил трения. Среднее контактное напряжение P_{cp} определено по известной методике:

$$P_{cp} = \sigma_0 \cdot k_T \cdot k_\varepsilon \cdot k_u, \quad (1.3)$$

где σ_0 – базисное значение сопротивления деформации в динамической области; k_T и k_u – температурный и скоростной коэффициенты; k_ε – коэффициент, учитывающий степень деформации, внешние зоны, натяжение и коэффициент напряженного состояния.

Устойчивое протекание процесса ограничивается одним условием – обрывом прокатываемого стержня. Вскрытие полости изучали прямым экспериментом: после прокатки разрезали образец и визуально определяли наличие или отсутствие полости. Согласно исследованиям, увеличение угла α снижает вероятность разрушения, увеличение β – повышает ее.

Исследования ПКП в Экспериментальном научно-исследовательском институте кузнечно-прессового машиностроения (ЭНИКМАШ) проведены Л. Н. Никольским, Н. Т. Удовиным, В. С. Малинкиным и др. [69, 70]. Первые публикации по результатам исследований появились в 1971 г. В ЭНИКМАШ изучали традиционный для всех исследователей круг вопросов: условия устойчивого протекания, геометрия контактных поверхностей, усилия прокатки. При определении контактных поверхностей при холодной ПКП учтено упругое сжатие заготовки и инструмента. Изучены технологические возможности комбинированного процесса прямой и обратной прокатки. По результатам исследований издан Руководящий технический материал.

Исследования ПКП в Волгоградском научно-исследовательском институте технологии машиностроения (ВНИИТМАШ) проведены Ю. Н. Веремеевичем, Р. С. Горовым и др. Первые публикации об исследованиях были сделаны в 1972 г. Так же, как и в других организациях, здесь исследован обычный круг вопросов [71, 72]. ВНИИТМАШ одним из первых в стране исследовал возможность прокатки тремя валками с клиновыми инструментами. По этой схеме прокатывали заготовки под штамповку шатуна. Изучение механических свойств шатунов показало, что прокатка не ухудшает свойства металла после штамповки. По результатам исследований издан Руководящий технический материал.

Исследование ПКП в п/я 704086 проведены Г. А. Дуловым и др. По результатам исследований им в 1973 г. защищена кан-

дидатская диссертация. Работа посвящена исследованию холодной ПКП [73]. Г. А. Дулов одним из первых установил, что при ПКП возможны две различные формы контактной поверхности в зависимости от режимов прокатки.

Исследование холодной ПКП в Ростовском-на-Дону ордена Трудового Красного Знамени Институте сельскохозяйственного машиностроения проведено А. З. Журавлевым, В. И. Ураждиным и В. М. Пеевым. В 1983 г. В. М. Пеевым защищена кандидатская диссертация. В работе сделана попытка создать математическую модель холодной ПКП [74]. Объемная задача ПКП заменена плоской задачей вдавливания в цилиндрическую заготовку вращающегося штампа и сжатия ее поступательно движущимися наклонными плоскостями. Решение задачи осуществлено на ЭВМ. Погрешность решения заключается в подмене объемной задачи плоской и в использовании местного поля, не проникающего на ось образца, что не отражает характер течения металла при ПКП.

За рубежом первым исследовать ПКП начал J. Holub (ЧССР) в 1962 г. Исследования проводили в институте «Vizkumny Ustav Tvařecich a Technoloque Tvařent», Brno [75]. Круг исследуемых вопросов: геометрия контактных поверхностей, усилия деформирования, условия устойчивого протекания процесса, вскрытие осевой полости.

При выводе формул для определения контактных поверхностей сделан ряд допущений, понижающих точность решения. Так же, как и отечественные исследователи, чехословацкие ученые установили, что возможны два вида контактных поверхностей. Усилие прокатки рассчитывали как произведение проекции площади контакта на напряжение сопротивления деформированию. Влияние скорости деформации и упрочнения не учитывали.

Показано, что вскрытие полости связано с геометрией инструмента и степенью обжатия. Высказано предположение, что полость вскрывается после определенного количества циклов нагружения. Экспериментально определена область α , β , δ , в которой обеспечивается прокатка без разрушения. С этой целью прокатывали образцы в различных условиях. Вскрытие полости фиксировали визуально после разрезки образца.

В ГДР исследование ПКП проводили в Центральном институте производственной технологии, г. Цвикау. Первые публикации результатов исследования были сделаны в 1967 г. [76]. В отличие от других исследователей было установлено, что неметаллические включения в сталях способствуют образованию осевых полостей. Показано, что режим нагрева заготовок может оказывать влияние на разрушение металла.

Были проведены сравнительные испытания на усталость шапунов, полученных с предварительной ПКП и без нее. В итоге установлено, что в обоих случаях механические свойства остаются практически на одном уровне.

В Японии исследованием ПКП занимаются на технологическом факультете Государственного университета г. Йокохама, технологическом факультете Университета г. Осака, в Центральном научно-исследовательском институте фирмы «Тоета» [77, 78].

Исследованиями установлено, что основное влияние на процесс оказывают параметры α , β , δ . Экспериментально установлена область α , β , δ , в которой возможно с высоким качеством осуществлять прокатку, также определены области, в которых происходит вскрытие осевой полости, образование продольных и поперечных дефектов, утонение прокатываемого стержня.

Степень обжатия в отличие от принятой в Европе определяется как относительное уменьшение площади поперечного сечения:

$$K = \frac{F_{\text{и}} - F_{\text{пр}}}{F_{\text{пр}}} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \cdot 100\% = (1 - \delta^{-2}) \cdot 100\%, \quad (1.4)$$

где $F_{\text{и}}$ – площадь исходного сечения заготовки; $F_{\text{пр}}$ – площадь поперечного сечения заготовки после прокатки.

Исследовано влияние параметров процесса на вскрытие полости. При этом варьировали углы клина α и β , температуру нагрева и марку стали. В качестве количественной величины ресурса пластичности прокатанных изделий служило увеличение диаметра осевого отверстия, предварительно просверленного в заготовке. В итоге определена зависимость прироста внутреннего диаметра от геометрии клина: уменьшение α или β сопровождается увеличением диаметра отверстия.

Исследование прокатанных деталей на электронном микроскопе показало, что неметаллические включения отрицательно сказываются на ресурсе пластичности. Микротрещины зарождаются вблизи неметаллических включений и распространяются по границам зерен металла.

Установлен диапазон параметров, в которых протекает процесс ПКП: $18^\circ < \alpha < 30^\circ$; $5^\circ < \beta < 12^\circ$; $1 < \delta < 1,8$; рассмотрены причины искажения прямолинейных торцов заготовки и образования утяжины.

Исследован процесс трехвалковой прокатки. Эксперименты проводили на стали с нагревом и на пластилине вхолостую. Установлено, что утяжина имеет меньшие размеры при прокатке тремя валками по сравнению с прокаткой двумя валками.

Вскрытие полостей при трехвалковой прокатке не обнаружено. Рекомендовано использовать инструмент с углами $\alpha > 20^\circ$, $\beta < 15^\circ$, достигаемые степени обжатия $1,6 \div 1,8$.

Напряжения рассчитаны по формулам А. Д. Томленова [19] для случая радиальной осадки цилиндра двумя плитами. В работе сделан ряд грубых допущений. Объемная задача ПКП подменена плоскодеформированным состоянием при ПП, приписывается такое же распределение напряжений, что и при осадке.

В настоящее время исследования процесса ПКП интенсивно развиваются в Республике Беларусь [1, 2], США [79–81], Китае [82–84], Германии [85], Польше [86], Бразилии [87], Чехии, Республике Корея [88]. Производством оборудования ПКП в мире занимаются фирмы «Šmeral» (Чехия), «Vêché» (ФРГ), «ВНИИМЕТМАШ» (Россия), «Xianfend machine tool works» (Китай). В Беларуси производством оборудования занимается ФТИ НАН Беларуси, ЗАО «Белтехнология и М» и ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг». Белорусское оборудование успешно работает в России, Украине, США, ФРГ, Испании, Польше, Болгарии, Турции, Южной Корее, Чехии, Индии. По объемам производства станов ПКП Беларусь занимает первое место в мире – здесь производится 50% данного вида оборудования. Беларусь также является самой оснащенной страной по количеству оборудования на душу населения.

На исследования в Лодзинском техническом университете (Польша), проводимые под руководством доктора Z. Pater, существенное влияние оказала белорусская школа. Геометрия контактных поверхностей, решения методом верхнеграничной оценки и полей ЛС, условия устойчивого протекания процесса, технологические основы процесса – все эти аспекты рассмотрены с позиций белорусских исследователей и со ссылкой на их труды. Новым в исследованиях является применение метода конечных элементов на базе универсального пакета компьютерных программ MSC MARC Auto Forge, с помощью которых были определены компоненты усилий прокатки и накопление деформаций по всему объему прокатанных деталей [89, 90]. При этом, однако, было принято достаточно грубое допущение о том, что деформации при ПКП носят монотонный характер.

Аналогичные исследования проведены в Питсбургском университете (США) под руководством профессора M. R. Lovell. В этом случае использованы более совершенные пакеты универсальной программы LS-DYNA [91]. Профессором M. R. Lovell также проведены исследования вскрытия осевой полости при ПКП [80]. Результатом исследования является качественная оценка влияния на разрушение углов α и β инструмента и степени обжатия без учета деформируемости материала и количественных оценок его повреждаемости при прокатке.

В Бразилии исследования в области ПКП проведены профессором S. T. Button в университете г. Кампинас. Исследования носят экспериментальный характер и касаются микроструктуры стали 48MnV3, прокатанной на плоскоклиновом стане [92].

В Китае исследования в области ПКП выполняются в Пекинском университете науки и техники под руководством профессора Hu Zhenghuan [93]. Исследования касаются геометрии контактных и свободных поверхностей при валковой горячей ПКП, усилий прокатки и условий устойчивого протекания процесса. Напряжения рассматриваются при плоскодеформированном состоянии с использованием известного решения радиальной осадки цилиндра [19].

1.3. Поперечно-клиновья прокатка в ФТИ НАН Беларуси

ПКП в Беларуси впервые была реализована на Минском тракторном заводе, где в 1965 г. в Базовой лаборатории обработки металлов давлением В. Я. Щукиным и В. И. Махначем была сконструирована установка прокатки и разработана технология прокатки зуба бороны. С поступлением в 1969 г. сотрудников указанной лаборатории Г. В. Андреева и В. Я. Щукина в аспирантуру при Физико-техническом институте Академии наук БССР здесь под руководством Г. М. Макушка и В. М. Сегала начались научные исследования этого нового и абсолютно не исследованного на то время процесса.

Уже более 40 лет ПКП – одно из основных направлений исследований, разрабатываемых в ФТИ НАН Беларуси. Исследования ПКП в ФТИ НАН Беларуси проведены В. Я. Щукиным, Г. В. Андреевым, В. А. Клушиным, А. С. Дубень, С. М. Красневским, В. И. Садко, Е. М. Макушком, В. М. Сегалом и др. По результатам работ защищены кандидатские диссертации Г. В. Андреевым (1972 г.), В. Я. Щукиным (1972 г.), В. А. Клушиным (1977 г.), А. С. Дубень (1980 г.), С. М. Красневским (1982 г.), В. И. Садко (1985 г.), Г. В. Кожевниковой (2006 г.). Результаты исследований опубликованы в работах [1–5, 39, 94–101]. Первая публикация сделана в 1969 г. В работах изучены традиционные вопросы: геометрия контактных поверхностей, кинематика прокатки, усилия деформирования, условия устойчивого протекания. Кроме того, впервые исследован дополнительный широкий круг вопросов, совокупность которых с углубленной разработкой традиционных аспектов можно оценить как основы теории ПКП.

Исследователи всего мира единодушно отмечают лидирующую роль в исследовании ПКП и разработке технологий прокатки белорусской школы: ФТИ НАН Беларуси и фирмы «АМТ-инжиниринг» и «Белтехнология и М», которые возглавляют наши ученики [102, 103]. ФТИ принадлежит 30% изобретений в мире в области ПКП.

В ФТИ НАН Беларуси впервые разработана классическая теория поперечной прокатки [1, 2, 4], теоретически обосновано яв-

ление вскрытия осевой полости, более 200 лет необъяснимое и известное как эффект Маннесмана [1, 39], показано, что деформируемость металлов представляется в виде поверхности с зависимостью от двух инвариантов напряженного состояния [2].

В институте изучено влияние параметров процесса на устойчивость прокатки [4], на точность получаемых изделий [4], разработана программа автоматического проектирования инструмента [101].

Впервые получено корректное решение задачи поперечной прокатки бесконечного цилиндра с расчетом геометрии деформируемых и жестких областей, кинематики течения металла, силовых параметров процесса, напряжений и деформаций в очаге пластического формоизменения [2]. Численным методом получено новое решение для поля линий скольжения, удовлетворяющее как кинематике, так и динамике поперечной прокатки и обеспечивающее минимум энергии формоизменения. Особенность решения заключается в установлении разрывов скорости на границах и внутри пластических областей с отражением их от контактной поверхности.

Установлена закономерность самоустановления сил трения при прокатке, обеспечивающая их рост с увеличением момента сил, препятствующих вращению заготовки, и определены пределы этих сил в зависимости от условий на контакте заготовки с инструментом.

Совместно с Объединенным институтом проблем информатики НАН Беларуси построена компьютерная модель ПКП, позволяющая без проведения натуральных экспериментов изучать и оптимизировать конкретные технологии прокатки [104]. В отличие от зарубежных исследователей, необоснованно доверяющих компьютерным моделям ПКП, мы осуществили ее тестирование путем сравнения с точными аналитическими решениями. В итоге было установлено [105], что метод конечных элементов, на базе которого построены эти компьютерные модели, достаточно точно позволяет прогнозировать напряжения и деформации в очаге пластического течения, однако приводит к суще-

ственным ошибкам при расчете кинематических параметров прокатки и не перестраивает центрированное поле деформаций в местное при обжатиях менее 1,02. В итоге нами установлена доверительная область получаемых решений.

Разработанные в ФТИ НАН Беларуси технологии (рис. 1.2) ПКП обеспечивают [2]: коэффициент использования металла – 0,8–0,98, стойкость плоскопрокатного инструмента до его полного выхода из строя – около 1 млн штук изделий, производительность процесса в зависимости от конфигурации изделия и схемы прокатки – 300–720 шт/час, повышение эксплуатационных характеристик прокатанных изделий на 10–15%.

В области технологий в ФТИ впервые в мире созданы способ теплой прокатки, обеспечивающий экономию энергоресурсов и повышение качества изделий, способ параллельной прокатки, позволяющий многократно сократить длину инструмента и тем самым увеличить производительность, способ обратной прокатки, позволяющий при прокатке не только уменьшать, но и увеличивать диаметр заготовки [106–108].



Рис. 1.2. Поковки, полученные методом ПКП по технологиям ФТИ НАН Беларуси

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Обозначения и сокращения	6
<i>Глава 1. Состояние вопроса</i>	9
1.1. Элементы процесса поперечно-клиновой прокатки.....	9
1.2. Исторический и научный обзор.....	12
1.3. Поперечно-клиновая прокатка в ФТИ НАН Беларуси	21
1.4. Оборудование поперечно-клиновой прокатки.....	24
1.4.1. Плоскоклиновые станы ПКП.....	26
1.4.2. Валковые станы ПКП.....	35
1.4.3. Станы ПКП оригинальных конструкций	46
1.5. Компьютерное моделирование процесса поперечно-клиновой прокатки.....	50
<i>Глава 2. Теория поперечной прокатки</i>	60
2.1. Плоскодеформированное состояние	60
2.2. Геометрия контактных и свободных поверхностей.....	62
2.3. Кинематика пластического течения.....	69
2.4. Напряжения в очаге деформации	88
2.4.1. Построение полей ЛС с учетом неравномерности трения на контакте инструмент–заготовка и его кривизны	88
2.4.2. Напряжения при местном поле деформаций	93
2.4.3. Построение поля линий скольжения при поперечной прокатке трубы	102
2.4.4. Напряжения при центрированном поле деформаций	109
2.5. Динамика процесса.....	113
2.5.1. Трение в решениях методом ЛС.....	113
2.5.2. Экспериментальное определение напряжений на контактной поверхности.....	114
2.5.3. Исследование контактных напряжений методом ЛС и МКЭ ...	128
2.5.4. Проверка выполнения условий пластичности и плоскодеформированного состояния при компьютерном моделировании с использованием блока программ LS-DYNA	129
	289

2.5.5. Исследование эффекта самоустановления сил трения	131
2.5.6. Исследование условий устойчивого протекания.....	136
2.6. Исследование деформаций	141
2.6.1. Исследование деформаций методом ЛС при центрированном поле напряжений	141
2.6.2. Исследование деформаций МКЭ при центрированном поле нагружений	147
2.6.3. Экспериментальное исследование деформаций методом муара	150
Глава 3. Теория поперечно-клиновой прокатки	155
3.1. Исследование геометрии контактных поверхностей при поперечно-клиновой прокатке	155
3.2. Исследование кинематики при поперечно-клиновой прокатке....	156
3.3. Исследование контактных напряжений при поперечно-клиновой прокатке	157
3.3.1. Определение коэффициента трения на контактной поверхности при ПКП	157
3.3.2. Определение параметра «А» при ПКП	160
3.4. Условия устойчивого протекания поперечно-клиновой прокатки ...	161
3.4.1. Определение условий устойчивого протекания ПКП без потери сцепления заготовки с инструментом.....	161
3.4.1.1. Критерий 1. Коэффициент контактного трения.....	161
3.4.1.2. Критерий 2. Равенство момента сил вращения и момента сил формоизменения	162
3.4.1.3. Критерий 3. Работа деформации.....	162
3.4.2. Определение условия устойчивого протекания ПКП без внеконтактной деформации растяжения	163
3.5. Определение усилия и КПД при поперечно-клиновой прокатке....	165
3.5.1. Разработка инженерного метода расчета усилия ПКП	165
3.6. Компьютерное моделирование процесса поперечно-клиновой прокатки.....	171
Глава 4. Разрушение.....	181
4.1. Деформационный критерий разрушения при пластическом течении.....	181
4.2. Энергетический критерий разрушения при пластическом течении.....	210
Глава 5. Сварка слоистых валов из разнородных металлов и сплавов при поперечной и поперечно-клиновой прокатке	215
Глава 6. Технологии и инструмент поперечно-клиновой прокатки...	222
6.1. Технология и инструмент для изготовления поковок пальца синхронизатора 80С-1701063-Б	223

6.2. Технология шарового пальца № 2141-2904208 автомобиля ВАЗ	225
6.3. Технология шарового пальца рулевой тяги автомобиля ГАЗ № 51-3003032-А	229
6.4. Технология производства детали «Валик» 532.45.005-0	232
6.5. Технология поперечно-клиновой прокатки медных шаров	234
6.6. Технология теплой ПКП пальца МТЗ	242
6.7. Технология поперечно-клиновой прокатки и штамповки вилки кардана	243
6.8. Технология изготовления гаечного ключа	247
6.9. Технология изготовления поковок детали «Хвостовик» № 80-4202019Б	249
6.10. Технология изготовления поковок детали «Держатель инструмента»	251
6.11. Технология штамповки и поперечно-клиновой прокатки шурупа путевого	253
Глава 7. Оборудование поперечно-клиновой прокатки конструкции ФТИ НАН Беларуси	258
7.1. Стан ПМ 5.150	260
7.2. Стан ФТИ-550	261
7.3. Стан ПМ 5.155	263
7.4. Стан реверсивной прокатки	265
7.5. Стан для ветряных мельниц	268
7.6. Трехвалковый стан	271
7.7. Разработка технологии поперечно-клиновой прокатки с планетарным разделением заготовок	273
Литература	276