

УДК 004.9; 621.7

А.А. Абрамов<sup>1</sup>, Г.В. Кожевникова<sup>2</sup>

## ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СКВОЗНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ

*Дается общее представление о поперечно-клиновой прокатке, приводятся основные результаты исследований в области численного моделирования данного процесса. Рассматриваются требования к сквозной компьютерной технологии проектирования процесса формообразования осесимметричных ступенчатых деталей методом поперечно-клиновой прокатки, а также особенности ее разработки.*

### Введение

Поперечно-клиновая прокатка (ПКП) – способ обработки металлов и металлических сплавов давлением, состоящий в пластическом формообразовании заготовки вследствие ее вращательного перемещения вдоль клиновых профильных инструментов, которые движутся параллельно относительно друг друга (возможны случаи, когда один из инструментов неподвижный). Оба клиновых инструмента имеют боковые наклонные грани *H*, которые заставляют избытки металла перемещаться по направлению к торцам, удлиняя заготовку, а также калибрующие участки *K*, где происходит калибровка деформируемого металла по мере его выхода с наклонной грани (рис. 1). Таким образом, в процессе пластического качения заготовки между инструментами металл последовательно перераспределяется от места внедрения клина к торцу, формируя прокатанную поковку [1].

ПКП является одним из наиболее экономичных и производительных способов изготовления осесимметричных деталей типа ступенчатых валов с различной конфигурацией ступеней и перепадами диаметров до четырех и более раз. ПКП применяется при изготовлении готовых изделий для различных отраслей (тракторостроения, сельхозмашиностроения, станкостроения, мотовелостроения, автомобилестроения), деталей для горнодобывающей, нефтедобывающей, строительной техники, гидравлики и электротехнических машин, а также точных профильных промежуточных заготовок для последующей малоотходной пластической обработки.

К особенностям технологических процессов ПКП относятся [2, 3]:

- широкая номенклатура прокатываемых деталей (цилиндрические, конические, сферические тела вращения с канавками и выступами различного диаметра);
- возможность обработки различных материалов (практически всех конструкционных сталей, некоторых инструментальных сталей, жаропрочных сплавов циркония, титана, а также сплавов на основе меди, никеля);
- высокий коэффициент использования металла;
- стабильное положение детали на плоском инструменте;
- возможность полной автоматизации процесса;
- максимальное приближение прокатываемой детали к профилю инструмента;
- широкие технологические возможности;
- простота изготовления и высокая точность клинового инструмента;
- высокая стойкость инструмента;
- низкий уровень шума (отсутствие источников виброколебаний).

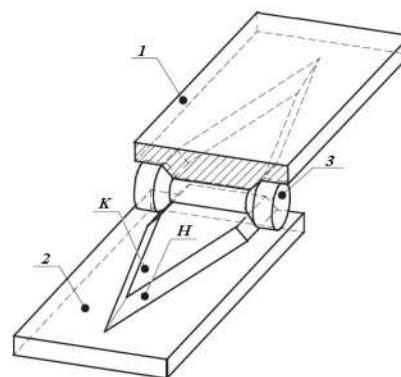


Рис. 1. Схема процесса ПКП:  
1, 2 – клиновые инструменты;  
3 – прокатываемая заготовка

Впервые ПКП была применена в 1949 г. на Горьковском автозаводе при прокатке заготовки под штамповку шатуна [4]. Дальнейшее освоение процесса ПКП продолжилось только в 1970-х гг., когда были разработаны теоретические положения и новые прокатные станы. Первоначально развитием данного направления обработки металлов давлением занимались в СССР (в том числе и в БССР), в Чехословакии, США, Японии и Германии. В дальнейшем за счет импорта прокатного оборудования число стран, использующих метод ПКП, значительно расширилось (Болгария, Венгрия, Китай, Великобритания, Франция, Италия и др.).

В настоящий момент продолжают фундаментальные исследования и прикладные разработки в области ПКП в научных центрах и фирмах соответствующего профиля во многих странах мира [5, 6]:

- Беларуси (ГНУ «ФТИ НАН Беларуси», УО «БНТУ», ЗАО «Белтехнология и М», СП ООО «АМТ Инжиниринг», НИЛ БГПА «Прокатка»);
- России (УО «Московский государственный институт стали и сплавов»; ОАО «ВНИИМЕТМАШ», Москва; ГУП КБП филиал ЦКИБ СОО, Тула; ЭНИКМаш, Воронеж);
- Германии (Хемницкий технический университет; Франхоферский институт инструмента и технологии обработки металлов давлением, Хемниц);
- Чехии (фирма «ШМЕРАЛ»);
- Польши (Люблинский технологический университет);
- США (Питсбургский университет, штат Пенсильвания);
- Индии (Mascot India Tools; Forging Pvt. Ltd., Chaziabad);
- Кореи (Sun Steel Stock Company, Taebaek);
- Бразилии (кафедра материаловедения государственного университета Кампинаса);
- Китая (факультет машиностроения Пекинского университета науки и техники, Исследовательский центр деталепрокатки Пекинского университета науки и техники, Пекинский исследовательский институт машиностроительных электротехнических технологий, Shenyang Ligong University);
- Японии (Mitsubishi Jukoguo Kaisha, Mitsubishi Heavy Industries).

## 1. Использование компьютерного моделирования при исследовании процесса ПКП

В последнее время новым в изучении ПКП является внедрение современных подходов компьютерного моделирования при исследовании технологии прокатки, что позволяет определить характеристики напряженно-деформированного состояния, провести анализ упруго-пластических деформаций, выявить наиболее проблемные зоны прокатываемой заготовки и оперативно внести изменения в проект на стадии разработки. В основе данных подходов лежит метод конечных элементов (МКЭ). Данный метод получил широкое распространение при моделировании процессов формообразования (штамповки, выдавливания, отливки,ковки, вальковой прокатки), однако его использование при решении задач ПКП является относительно новым.

Одними из первых работ в данном направлении являются исследования профессора М. Ловелла (кафедра машиностроения, Питсбургский университет, США), в которых был изучен эффект скольжения между формообразующими клиновыми поверхностями и заготовкой в процессе поперечной прокатки [7–9]. Кроме того, были проведены исследования вскрытия осевой полости при ПКП [10]. Для исследования использовалась трехмерная конечно-элементная (КЭ) модель, созданная в пакетах ANSYS\LS-DYNA. Результатами исследований стали качественные оценки влияния угла заострения, угла наклонной грани инструмента и степени обжатия на разрушение материала. Полученные результаты численного анализа были проверены с помощью экспериментальных расчетов. Близкие значения показали возможность использования МКЭ при моделировании процесса ПКП.

Численное моделирование процесса ПКП проводилось также под руководством доктора З. Патера (кафедра компьютерного моделирования и технологии обработки металлов давлением, Люблинский технологический университет, Польша). В его работах рассмотрен вопрос построения трехмерной КЭ-модели для численного анализа в пакете MSC MARC\AutoForge. Проведены численные эксперименты процесса ПКП при различных технологических параметрах в термомеханической постановке, получены картины распределения деформаций и напряжений

на каждой стадии прокатки изделия [11–13]. Одним из качественных показателей работ являются анализ потери устойчивости при прокатке, возникновение проскальзывания и утонения заготовки. Рассматривался также вопрос численного моделирования процесса формообразования методом трехвалковой ПКП, что позволило проанализировать влияние параметров геометрии инструмента на процесс прокатки [14, 15]. Исследования проводились с помощью пакетов инженерного анализа MSC SuperForm 2002 и SuperForm 2004.

В работах Г. Фанга, Л. Лея, П. Зенга (кафедра машиностроения, университет Цинхуа, Пекин, Китай) рассматривался вопрос инженерного анализа трехмерной жестко-пластической модели для двухвалковой прокатки [16]. Для решения данной задачи использовался неявный метод с адаптивным перестроением КЭ-сетки на базе пакета DEFORM-3D. Был проанализирован характер течения металла в различные моменты времени, получены распределения напряжений для сечений прокатываемых заготовок при различных степенях обжатия, проведен анализ возникновения эффекта вскрытия осевой полости.

Исследование температуры прокатываемой заготовки было проведено Ф. Янгом и Дж. Лью (кафедра мехатроники и автоматизации, Шанхайский университет, Китай). В работе [17] изучено влияние параметров прокатки (угла заострения, угла наклона боковой поверхности и степени обжатия) на распределение температур и процесс формообразования заготовки. Было показано, что в процессе прокатки температура в зоне деформации зависит главным образом от контактной теплопроводности и нагрева вследствие пластических деформаций. Дальнейшее изучение и анализ распределения температуры в заготовке при ПКП проведено в работах Ф. Янга, Б. Пана (лаборатория машиностроительного производства и автоматизации, технологический университет Чжэцзяна, Китай) [18].

В России исследования в области численного моделирования процесса ПКП проведены М.А. Шароновым, М.А. Цепиком, А.Г. Кобелевым и Д.А. Шароновым (Московский государственный институт стали и сплавов). В работе [19] рассматривался вопрос математического моделирования процесса плоской поперечно-клиновой вальцовки (ППКВ) сплошной заготовки. Для расчетов характеристик напряженно-деформированного состояния и анализа течения металла в условиях вязкопластической деформации использовалась вычислительная система Qform, разработанная российской фирмой «Квантор». Хотя программа рассчитана в основном на моделирование процесса объемной штамповки, однако с ее помощью был смоделирован процесс ППКВ ступенчатой поковки из стали 45 и получены данные по температурным полям, сопротивлениям деформации, полям скоростей, величинам накопленной деформации. В работе [20] проведены экспериментально-теоретические исследования и сравнительный анализ особенностей формообразования и характеристик напряженно-деформируемого состояния в очаге деформации сплошных и полых круглых заготовок при ППКВ. Расчеты проводились с использованием вычислительной системы SPLEN-K, разработанной в Московском государственном институте электроники и математики совместно с Московским государственным институтом стали и сплавов, программа основана на использовании МКЭ для решения задач упругопластического формоизменения.

Одно из лидирующих мест в области научно-технических разработок метода ПКП занимает белорусская школа ПКП. Здесь разработана классическая теория прокатки, положенная в основу теории и технологии ПКП, разрабатываются и поставляются новые технологии ПКП, инструмент для их реализации. О лидирующем месте белорусской школы говорит и тот факт, что более трети изобретений в мире в области ПКП принадлежит Республике Беларусь и почти 50 % мирового производства оборудования ПКП сконцентрировано в нашей стране. Разработки белорусской школы успешно используются на промышленных предприятиях 15 стран, в том числе США, Германии, Испании, России, Украины, Польши, Болгарии, Чехии, Турции. На 20 заводах Республики Беларусь работает более 40 автоматизированных комплексов ПКП [1, 3, 5].

Удержание лидирующих позиций в указанной области и обеспечение конкурентоспособности продукции на мировом рынке возможны только за счет внедрения высокотехнологических компьютерных технологий. Это связано с тем, что при исследовании процесса ПКП до сих пор используются экспериментально-теоретические методы (графическое построение линий скольжения, математическое планирование эксперимента, метод характеристик, методы муаровых полос и делительных координатных сеток, тензорометрический метод и т. д.), которые не

всегда позволяют провести анализ и исследование технологического процесса с целью выявления оптимальных термомеханических и технологических параметров для заданного процесса формообразования. Совместное использование информационных технологий в области компьютерного моделирования и разработанной теоретико-экспериментальной базы белорусской школы на стадии исследования технологии ПКП позволит не только оптимизировать существующие технологии, сократить финансовые и материальные затраты, но и значительно повысить качество разрабатываемого оборудования.

## 2. Основные требования к технологии моделирования процесса ПКП

Одним из основных требований численного моделирования процесса ПКП является возможность выявления закономерностей возникновения различных дефектов (вскрытие полости, скручивание, проскальзывание заготовки и т. д.) в процессе формообразования заготовки и определения условий устойчивого протекания процесса при различных технологических параметрах без проведения натурных экспериментов. Для осуществления данной задачи необходимо провести серию компьютерных испытаний и проанализировать полученные результаты, что позволит ответить на вопросы, связанные с определением характеристик прокатываемой заготовки при различных параметрах прокатки.

Прежде всего необходимо определиться с ограничениями и особенностями самого процесса ПКП. Это связано с тем, что использование широких и разнообразных возможностей МКЭ, правильная интерпретация полученных результатов требуют не только представления об основных принципах метода, особенностях реализованных в программах КЭ-анализа математических алгоритмов и т. д., но и обширных знаний о физической сущности решаемой задачи. С этой целью уже на начальной стадии моделирования независимо от системы инженерного анализа необходимо разграничить параметры физической и математической модели, правильное задание значений которых позволит адекватно решить поставленную задачу. Таким образом, параметры, описывающие моделируемый процесс, можно разделить на две группы:

- 1) характеристики самой расчетной модели (расчетная модель – структурированный набор исходных данных, на основании которых аналитический пакет выполняет вычисления);
- 2) характеристики технологического процесса, заданные в расчетной модели.

К первой группе относятся параметры, которые связаны с системой инженерного анализа, описывают математические особенности решения задачи и, как правило, не имеют реальных физических аналогов. Выбор параметров данной группы зависит от используемого пакета инженерного анализа и возможностей, которые он предоставляет. Их можно условно разбить на следующие подгруппы:

- временные параметры (шаг времени расчета, интервал времени между записями выходных файлов);
- параметры подавления искажения формы элементов;
- параметры контроля решения (параметры сходимости решения, тип решателя, параметры интегрирования по времени и др.);
- тип контактного взаимодействия;
- модели применяемого материала (определяют математическую модель материала);
- параметры КЭ-разбиения (количество конечных элементов, их тип, параметры формулировки конечного элемента).

Выбор значений параметров осуществляется по принципу подбора, когда известны исходные данные и результат прокатки, т. е. надо подобрать значения так, чтобы результат моделирования наиболее адекватно отвечал результатам реального физического эксперимента. При этом для решения задачи моделирования и исследования процесса ПКП в разных постановках нет необходимости каждый раз подбирать значения данных параметров, так как один и тот же набор значений может использоваться для различных постановок задачи. Это значит, что при решении новых задач можно опираться на базисные решения, которые отражают математическую суть проблемы.

Ко второй группе относятся параметры, описывающие технологический процесс. Они оказывают существенное влияние на реальный процесс формообразования заготовки во время прокатки. К данной группе можно отнести:

- параметры, учитывающие способ прокатки и геометрию клинового инструмента;
- параметры задания перемещения клиновых инструментов;
- физические свойства материалов;
- параметры температурного взаимодействия (температуру окружающей среды, заготовки и клиньев; теплопередачу; излучение);
- параметры контактного взаимодействия (трение).

Наибольший интерес представляют параметры именно второй группы, так как подбор их значений позволит проводить оптимизацию существующего процесса. Кроме того, правильное задание данных параметров позволит обеспечить устойчивое протекание процесса прокатки, которое может нарушаться по следующим причинам:

- из-за проскальзывания, которое имеет место, когда момент сил вращения заготовки становится меньше момента сил сопротивления вращению;
- из-за обрыва прокатываемого стержня, когда растягивающие напряжения, вызываемые действием осевого усилия, превышают предел прочности материала;
- из-за возникновения наружных дефектов, к которым относятся закаты, следы от инструмента в виде спиралевидных гребешков, искажения формы прокатанных участков (конусность, овальность, бочкообразность), недокат или смятие концевой участка, торцевая утяжина и некоторые другие;
- из-за возникновения внутренних дефектов – образования осевой рыхлости и вскрытия полости (эффект Маннесмана).

В связи с этим существует необходимость выявить закономерности потери устойчивости в зависимости от параметров технологического процесса, которые прямо или косвенно заданы в расчетной модели.

Основными параметрами технологического процесса ПКП являются геометрические параметры (степень обжатия и форма клина). Степень обжатия  $\delta$  определяется как отношение диаметра заготовки к минимальному диаметру прокатанной детали на данном участке. Этот параметр определяет распорное усилие между станиной прокатного стана и контактной поверхностью заготовки. Форма клина определяется углом заострения  $\beta$  и углом наклона боковой грани  $\alpha$  (рис. 2). Угол  $\beta$  определяет скорость распространения очага деформации вдоль оси заготовки, угол  $\alpha$  – размер контакта заготовки с инструментом и соответственно размеры очага деформации [3].

Геометрия клинового инструмента очень сильно влияет на процесс прокатки, неправильно сконструированный инструмент приводит к потере устойчивости и разрыву прокатываемой заготовки. Поэтому основной целью оптимизации процесса ПКП является определение параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$ , которые позволяют достичь максимального качества прокатанных деталей, а также области этих значений, при которых наблюдается устойчивое протекание процесса прокатки.

Экспериментально установлено, что устойчивое протекание процесса прокатки для достаточно широкой группы материалов достигается в диапазоне углов клиньев  $60^\circ > \beta > 20^\circ 45'$ ,  $60^\circ > \alpha > 30^\circ$  и степени обжатия  $1,8 > \delta > 1$ , но даже при использовании значений параметров в этих диапазонах во многих случаях в заготовке возникают проблемные зоны, устранение которых возможно путем подбора геометрических параметров при проведении серии компьютерных экспериментов [1, 21, 22].

К основным ограничениям, налагаемым на геометрические параметры, относится вскрытие осевой полости. Данное явление связано с осевым разрушением металла вследствие огра-

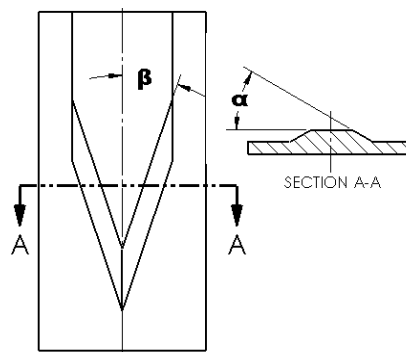


Рис. 2. Угол заострения и угол наклона боковой грани

ниченной пластичности материала и специфичного для процесса ПКП напряженно-деформированного состояния. Как правило, этот дефект является неисправимым браком, так как рваные края являются концентраторами напряжений (что приводит к сокращению долговечности деталей при их эксплуатации). Кроме того, при вскрытии полости резко падает точность получаемых изделий (увеличение площади поперечного сечения образца при потере сплошности приводит к перепополнению калибра) [1, 3, 22].

Основным фактором, влияющим на вскрытие осевой полости, является деформируемость прокатываемого металла. Под деформируемостью металлов понимается их способность подвергаться пластической деформации без разрушения. Обычно выделяют два вида разрушения металлов: хрупкое и вязкое. Хотя они и различаются, однако имеют общие стадии: первая – образование микротрещин в элементарных объемах образца и накопление их количества до определенного предела, вторая стадия процесса начинается после того, как количество микротрещин в элементарном объеме достигнет критической величины. При этом происходит объединение микротрещин в макротрещину и распределение последней по определенной поверхности, причем вторая стадия протекает при незначительном приращении деформации. Если в процессе разрушения преобладает первая стадия, его относят к вязкому разрушению, когда же первая стадия сопровождается незначительными остаточными деформациями, то процесс называют хрупким разрушением. Накопление микротрещин происходит прямо пропорционально накоплению деформации, и разрушение происходит тогда, когда они достигают критической величины.

Уменьшение угла заострения клина и увеличение угла наклона при прокатке, а также наличие калибрующего мостика на прокатном инструменте уменьшают вероятность появления данного дефекта в прокатанных изделиях, так как уменьшается накопленная деформация за период их формообразования.

Моделирование процесса разрушения металла, в том числе и вскрытия осевой полости, возможно при задании критериев разрушения конечных элементов в расчетной модели. Данные критерии задаются или в модели материала, которая описывает свойства материала заготовки, или при описании связей в узлах КЭ-сетки (при достижении критерия разрушения связь между элементами нарушается).

Как правило, ПКП предусматривает использование двух одинаковых клиновых инструментов для формообразования заготовки. Для правильной прокатки детали необходимо, чтобы данные инструменты были установлены точно друг против друга. Невыполнение этого условия приводит к искажению осевых размеров прокатываемого изделия: выпуклые участки профиля уменьшаются, вогнутые увеличиваются. Кроме того, непараллельность продольной оси инструмента направлению его перемещения вызывает брак – зарезание поверхности и поперечный закат. Взаимное расположение клиновых инструментов тоже влияет на возникновение эффекта конусности, когда при относительном перемещении клиньев расстояние между их калибрующими поверхностями изменяется. Чтобы избежать образования данных дефектов, необходимо тщательно выставить верхний и нижний инструмент относительно друг друга, обеспечить одновременный захват заготовки заходными участками клиньев и обеспечить параллельность калибрующих поверхностей на протяжении всего хода. При компьютерном моделировании данные требования выполняются в процессе построения геометрической модели за счет задания взаимосвязей и сопряжений между компонентами сборки, которые точно задают положение клиновых инструментов в пространстве, а также при ограничении в расчетной модели перемещений по вертикали обойм, в которые вставляются клиновые инструменты.

Помимо геометрических параметров, при моделировании процесса прокатки необходимо учитывать температурные параметры. Это связано с тем, что тепловое состояние заготовки при ПКП так же, как и напряженно-деформированное состояние, влияет на процесс формообразования. Особенность моделирования процесса ПКП в термомеханической постановке заключается не только в задании температурных параметров и зависимости свойств материала заготовки от температуры, но и в использовании специальных контактных алгоритмов, учитывающих перераспределение температур в контактных областях (заготовка – инструмент, воздух – заготовка, воздух – инструмент), а также в специальных методах решения связанных температурных и механических задач.

Устойчивое протекание процесса прокатки может нарушаться и в том случае, когда момент сил, способствующих вращению, становится меньше момента сил, препятствующих вращению, и наступает проскальзывание заготовки. Данный процесс связан с тем, что проскальзывание наблюдается тогда, когда ресурса сил трения становится недостаточно для вращения заготовки. Это является основной причиной потери устойчивости процесса формообразования ступенчатых цилиндрических деталей при прокатке. При проскальзывании происходит сплющивание заготовки, а также потеря устойчивости торцевой поверхности вследствие выхода очага деформации на торец.

На проскальзывание в значительной мере оказывает влияние обжатие, с увеличением обжатия увеличиваются силы трения и вероятность проскальзывания. Максимально возможное трение для жестко-пластического тела, согласно условию пластичности Треска – Сен-Венана, определяется как  $\mu_{max} = K$ , где  $K$  – пластическая постоянная. Эквивалентом значения предельной силы трения при моделировании контактного взаимодействия является величина  $F_{lim} = VC * A_{cont}$ . Здесь  $A_{cont}$  – площадь сегмента, находящегося в контакте с узлом, а  $VC$  – коэффициент вязкостного трения, который связан с пределом текучести материала  $\sigma$  соотношением  $VC = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$ . Для де-

формационно-упрочняемых тел, а также при горячей прокатке (вследствие подстуживания) в поверхностном слое заготовки силы трения могут значительно превышать параметр силы трения в остальном объеме заготовки, поэтому для корректного задания параметра  $F_{lim}$  вместо  $\sigma$  используется значение  $\sigma_0$  (предел текучести материала контактной поверхности).

Таким образом, максимально возможные силы трения на контакте определяют свойства металла в приконтактной области. Условие устойчивого протекания процесса прокатки без проскальзывания может быть представлено как  $\mu_c \leq F_{lim}$ , т. е. коэффициент контактного трения  $\mu_c$  для конкретных условий не может превышать некоторой граничной величины  $F_{lim}$ .

### 3. Построение компьютерной технологии моделирования ПКП

Компьютерная технология моделирования процесса ПКП представляет собой цикл проектных работ [23], предусматривающий выполнение в строго установленной последовательности определенных этапов (рис. 3):

- 1) построение 3D-модели;
- 2) формирование КЭ-модели;
- 3) формирование структуры расчетной модели для численного анализа;
- 4) решение задачи;
- 5) визуальный контроль полученных результатов технологического проектирования.

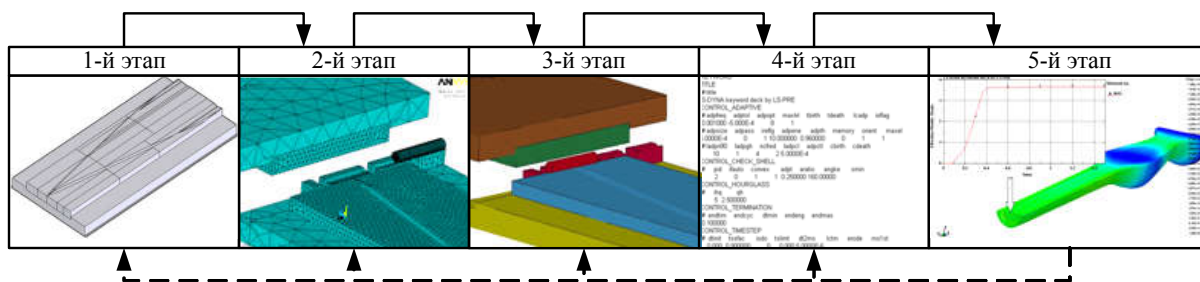


Рис. 3. Этапы моделирования процесса ПКП

При выполнении работ на конкретном этапе могут использоваться результаты предыдущих решений, для этого вводятся обратные связи, которые позволят вносить изменения в проект на каждом шаге проектирования.

На конечном этапе по результатам численного моделирования проводится анализ напряженно-деформированного состояния поковки в любой момент времени протекания процесса прокатки. Если процесс формообразования носит нестабильный характер и качество прокатанной детали не удовлетворяет техническим требованиям заказчика, проводится коррекция геометрической модели или параметров расчетной модели и осуществляется возврат к численному

моделированию (до тех пор, пока результаты не удовлетворят пользователя). Если математическая модель процесса ПКП отвечает всем поставленным требованиям, то оформляется конструкторско-технологическая документация по проекту.

В настоящее время отсутствует методика единого комплексного подхода к компьютерному проектированию процесса ПКП, которая реализовывала бы все эти этапы на уровне одной САД/САЕ-системы, решающей те или иные технологические задачи на основе общей базы данных. Это связано с особенностями процесса моделирования ПКП, а также с тем, что комплексный подход должен базироваться на глубокой формализации технологических процессов прокатки, рациональной организации программного обеспечения в соответствии с многоуровневой структурой процесса проектирования. В связи с этим целесообразно разработать методику, базирующуюся на использовании нескольких программных комплексов, каждый из которых решает конкретную задачу на конкретном этапе.

Схема построения компьютерной технологии моделирования процесса ПКП предусматривает наличие следующих основных элементов программной среды (рис. 4):

- САД-системы, используемой для построения 3D-моделей клиновых инструментов и прокатываемых изделий, сборочных конструкций, подготовки чертежной документации;
- сеточного генератора, применяющегося для восстановления геометрических моделей, доводки твердотельной геометрии до приемлемого для разбиения состояния, для непосредственного разбиения на конечные элементы, а также для проведения модификации КЭ-сетки;
- препроцессора, используемого для подготовки расчетной модели. Его основная задача состоит в выборе требуемых разделов, которые описывают характеристики и технологические параметры моделируемого процесса: модели материалов, температурные условия, нагрузки и начальные условия движения, условия контакта и типы контактного взаимодействия, методы расчета и т. д.;
- решателя, осуществляющего проверку данных анализа и непосредственное вычисление задачи на основе системы уравнений, созданных в ходе подготовки расчетной модели;
- постпроцессора, используемого для просмотра полученных результатов.

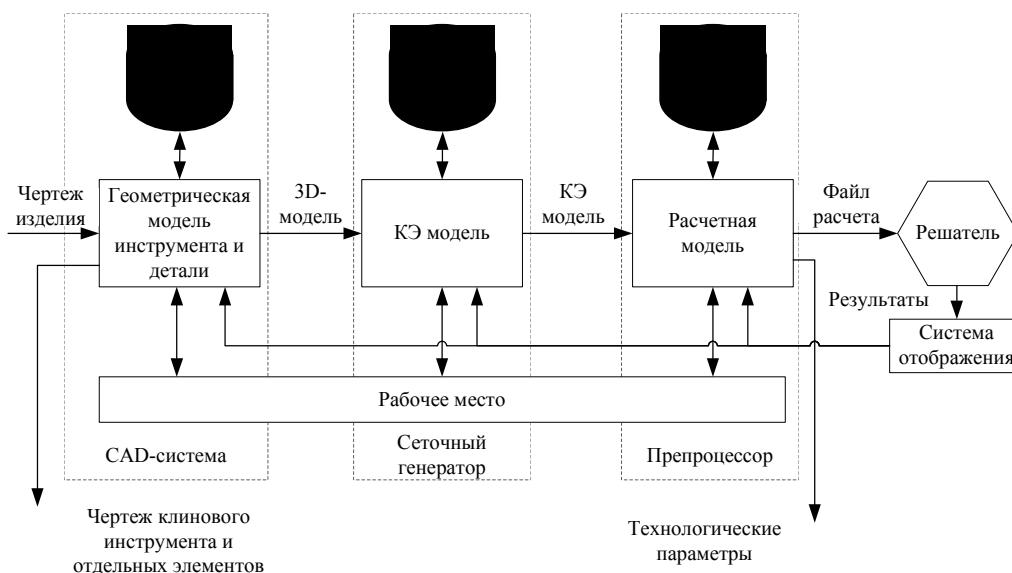


Рис. 4. Схема построения компьютерной технологии моделирования процесса ПКП

Повышение гибкости и автоматизации процесса проектирования и снижение профессиональных требований в области моделирования к технологю-проектировщику могут быть достигнуты за счет разработки собственных программных модулей для обработки информации и выработки набора возможных решений (модуля автоматизации проектирования геометрической модели клинового инструмента на базе выбранной САД-системы, модуля подготовки данных для численного анализа задачи ПКП).



Задачу моделирования процесса прокатки в данном случае можно сформулировать в следующей постановке. Задан чертеж изделия, подлежащего прокатке, необходимо получить на выходе чертеж клинового инструмента и отдельных его элементов, а также технологические параметры, которые оптимально подходят для прокатки заданной детали. Выбор оптимальных параметров представляет собой творческую работу, которая заключается в принятии проектных решений, отражающих основные факторы, которые определяют ход процесса, состав операций и переходов, их взаимосвязи и результаты технологии с учетом налагаемых ограничений.

В процессе проектирования имеется возможность скорректировать геометрическую модель, внести изменения в параметры расчетной модели, просчитать и проанализировать несколько вариантов технологического процесса и выбрать оптимальный. Эффективность и качество принятых проектных решений при формировании технологии ПКП в значительной степени будут зависеть от квалификации и опыта технолога-проектировщика.

В качестве критериев оптимальности могут быть использованы условия устойчивого протекания процесса, а также различные характеристики готового изделия. Наиболее универсальными характеристиками могут быть ресурс пластичности и себестоимость изделия, которая отражает трудозатраты, вложенные в конкретную деталь.

### **Заключение**

Особенность ПКП заключается в том, что существуют различные способы и чередования последовательностей прокатки различных элементов одной и той же детали. Это порождает большое количество возможностей построения технологии ее обработки. Кроме того, при решении задачи оптимизации технологии ПКП необходимо провести проверку многих параметров процесса: геометрических параметров инструмента (степени обжатия  $\delta$ , угла заострения  $\beta$ , угла наклона боковой грани  $\alpha$ ), температуры нагрева, скорости прокатки и т. д., что значительно усложняет выбор наилучшего варианта.

Разработка сквозной компьютерной технологии проектирования процесса ПКП позволит решить проблемы оптимизации технологического процесса и быстрого поиска оптимальных параметров оборудования и инструмента, при которых прокатка имеет устойчивый характер. Требования к такой технологии можно сформулировать следующим образом:

1. На сегодняшний день не существует единой технологии, которая бы обеспечивала комплексный подход решения задачи моделирования ПКП с возможностью полной автоматизации процесса проектирования на базе одной системы, поэтому необходимо определиться с элементами тех программных средств, на основе которых будет реализована сквозная компьютерная технология проектирования процесса ПКП.

2. На стадии автоматизированного проектирования необходимо выполнить работы по автоматизации расчета геометрических параметров инструмента, базируясь на критериях устойчивости процесса прокатки и размерах детали, которую необходимо прокатать.

3. Поскольку данная технология должна обеспечить оптимизацию процесса прокатки на основании математической модели (расчетной модели ПКП), то в ней должны быть отражены все основные параметры, определяющие процесс формообразования. Для этого необходимо выделить математические параметры, которые описывают математические особенности решения задачи, и параметры технологического процесса, которые заданы в расчетной модели и существенно влияют на реальный процесс прокатки заготовки.

4. Необходимо наличие обратных связей между элементами программной среды для возможности внесения изменений на любом шаге проектирования.

Более детальное описание отдельных элементов сквозной компьютерной технологии проектирования процесса ПКП, приведенных в данной статье, будет представлено в следующих публикациях.

### **Список литературы**

1. Шукин, В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Шукин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 223 с.

2. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков [и др.] – М.: Металлургия, 1982.
3. Кожевникова, Г.В. Развитие теории и технологии формообразования осесимметричных ступенчатых деталей поперечно-клиновой прокаткой / Г.В. Кожевникова. – Минск: Бел. наука, 2005. – 183 с.
4. Балин, А.Ф. Поперечно-клиновая прокатка кузнечных заготовок / А.Ф. Балин. – М.: Машгиз, 1959. – 76 с.
5. Шукин, В.Я. Основы теории поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Шукин, Г.В. Кожевникова // Прогрессивные технологии поперечно-клиновой прокатки: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 4–6 июня 2002 г. – Минск: Технопринт, 2002. – С. 11–27.
6. Астапчик, С.А. Перспективы применения поперечно-клиновой прокатки в машиностроении / С.А. Астапчик, В.С. Ивашко // Теория и практика поперечно-клиновой прокатки: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–29 сентября 2006 г. – Минск: Экоперспектива, 2006. – С. 3–7.
7. Dong, Y. Analysis of slip in cross wedge rolling: an experimentally verified finite element model / Y. Dong, K. Tagavi, M. Lovell // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – Vol. 80–81. – P. 273–281.
8. Lovell, M.R. Analysis of friction and interfacial slip in cross wedge rolling using explicit dynamic FEM / M.R. Lovell, K.A. Tagavi, Y. Dong // ANSYS Conference: materials of the International scientific and technical conference. – Canonsburg, 1998. – P. 324–331.
9. Lovell, M.R. Evaluation of critical interfacial friction in cross wedge rolling / M.R. Lovell // Journal of Tribology. – 2001. – Vol. 123, Issue 2. – P. 424–429.
10. Dong, Y. Analysis of stress in cross wedge rolling with application to failure / Y. Dong, K. Tagavi, M. Lovell, Z. Deng // International Journal of Mechanical Sciences. – 2000. – Vol. 42, Issue 7. – P. 1233–1253.
11. Pater, Z. Numerical simulation of the cross wedge rolling process including upsetting / Z. Pater // Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – Vol. 92–93. – P. 468–473.
12. Pater, Z. Finite element analysis of cross wedge rolling / Z. Pater // The Arabian Journal for Science and Engineering. – 2005. – Vol. 30, № 1C. – P. 27–37.
13. Pater, Z. Finite element analysis of cross wedge rolling / Z. Pater // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 173, Issue 2. – P. 201–208.
14. Bartnicki, J. The aspects of stability in cross-wedge rolling processes of hollowed shafts / J. Bartnicki, Z. Pater // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 155–156. – P. 1867–1873.
15. Bartnicki, J. Numerical simulation of three-rolls cross-wedge rolling of hollowed shaft / J. Bartnicki, Z. Pater // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 164–165. – P. 1154–1159.
16. Fang, G. Three-dimensional rigid-plastic finite element simulation for the two-roll cross-wedge rolling process / G. Fang, L. Lei, P. Zeng // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 129, Issues 1–3. – P. 245–249.
17. Ying, F. FE Numerical Simulation of Temperature Distribution in CWR Process / F. Ying, J. Liu // Current Trends in High Performance Computing and Its Applications. – 2005. – Vol. 86. – P. 575–580.
18. Ying, F. Analysis on temperature distribution in cross wedge rolling process with finite element method / F. Ying, B. Pan // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 254–255. – P. 365–376.
19. Шаронов, М.А. Математическое моделирование процесса плоской поперечно-клиновой вальцовки сплошной заготовки / М.А. Шаронов, А.Г. Кобелев, М.А. Цепин // Прогрессивные технологии поперечно-клиновой прокатки: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 мая 2004 г. – Минск: Экоперспектива, 2004. – С. 101–107.
20. Шаронов, М.А. Анализ напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении сплошных и полых заготовок при плоской поперечно-клиновой вальцовке / М.А. Шаронов, М.А. Цепин, Д.А. Шаронов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2003. – № 5. – С. 12–17.

21. Клушин, В.А. Совершенствование поперечно-клиновой прокатки / В.А. Клушин, Е.М. Макушок, В.Я. Щукин. – Минск: Наука и техника, 1980. – 280 с.

22. Андреев, Г.В. Поперечно-клиновая прокатка / Г.В. Андреев. – Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с.

23. Абрамов, А.А. Численное моделирование в аспекте создания систем автоматизации проектирования технологии / А.А. Абрамов, В.Я. Ляттэ // Теория и практика поперечно-клиновой прокатки: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–29 сентября 2006 г. – Минск: Экоперспектива, 2006. – С. 117–123.

Поступила 07.06.07

<sup>1</sup>Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: abramov@newman.bas-net.by

<sup>2</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси,  
Минск, Купревича, 10  
e-mail: fti@tut.by

**A.A. Abramov, G.V. Kozhevnikova**

#### **THE BASIC REQUIREMENTS TO THROUGH COMPUTER TECHNOLOGY OF DESIGNING THE CROSS-WEDGE ROLLING PROCESS**

The general representation of cross-wedge rolling is given, the basic results of the research in the field of numerical modelling of given process are presented, the basic requirements to through computer technology of designing the process of plastic forming axisymmetric multidiameter products by method CWR, and the features of its development are considered.