

УДК 539.375:621.77

А.А. Абрамов, С.В. Медведев

ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ

Рассматриваются вопросы создания сквозной компьютерной технологии проектирования и инженерного анализа пластического формообразования поковок при выполнении технологических операций методом поперечно-клиновой прокатки (ПКП). Описываются разрабатываемые программные средства автоматизации процессов проектирования и численного моделирования ПКП.

Введение

Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства и процессов проектирования, а также создание компьютерной технологии моделирования и оптимизации технологических процессов в настоящее время стали наиболее перспективными направлениями в развитии ПКП. Это прежде всего связано с тем, что средства автоматизации позволяют существенно упростить процесс проектирования инструмента и формирования компьютерных моделей процесса ПКП, тем самым обеспечив возможность быстрого создания и изменения исходных данных, необходимых для подготовки конструкторской документации и проведения моделирования. Кроме того, компьютерные модели данного процесса позволяют углубленно изучать поведение заготовки при ее формообразовании, оптимизировать параметры процесса, а также оперативно вносить изменения в технологический процесс без проведения натуральных экспериментов.

Современные системы проектирования (SolidWorks, Pro-Engineer, КОМПАС и др.) обладают полным набором инструментальных средств, необходимых для разработки трехмерной модели прокатного инструмента и подготовки сопутствующей конструкторско-технологической документации. Однако специальных модулей или инструментов, учитывающих специфику технологического процесса прокатки, в данных системах нет, т. е. нет единой пользовательской среды проектирования инструмента и разработки технологического процесса для ПКП. Проектировщику дается лишь набор стандартных средств формирования трехмерных моделей, на основании которых он осуществляет построение геометрии.

Что касается компьютерного моделирования процессов прокатки, то в практике работы отечественных конструкторских подразделений все еще недостаточно используется инженерный анализ процессов ПКП [1–3]. Это связано с несколькими проблемами.

Во-первых, у конструкторов возникают трудности при работе с универсальными пакетами инженерного анализа (LS-DYNA, ANSYS, DEFORM 3D и др.). Большинство из них имеют достаточно сложный интерфейс и требуют знания численных методов. Поэтому получить корректный результат могут только опытные пользователи.

Во-вторых, отсутствуют специализированные методики для проведения компьютерных инженерных исследований в данной области и необходимые средства проектирования в САД-средах. Как следствие возникают проблемы оперативного обмена данными между средой проектирования прокатного инструмента и средой проведения численного моделирования.

В-третьих, немаловажным является и время выполнения численного моделирования процессов формообразования. Так, время решения даже достаточно простой задачи (например, плоской прокатки) может занять несколько часов. Для более точного получения результатов (полей напряжений, формы прокатываемых ступеней и т. д.) требуется мелкая сетка как на инструменте, так и на заготовке. Это накладывает определенные требования на аппаратное обеспечение: большие объемы вычислительных ресурсов в задачах обработки металлов давлением требуют использования мультипроцессорных вычислительных систем для быстрого проведения анализа [4, 5].

Отсутствие единой среды разработки, включающей как элементы проектирования, так и элементы компьютерного моделирования, приводит к разнообразию методологий проектирования процессов ПКП, увеличению времени на разработку, сложностям, связанным с необходимостью внесения исправлений на любом из этапов проектирования и невозможностью использования типовых решений при разработке новых технологических процессов. Это обусловлено особенностями численного анализа процесса ПКП, а также тем, что комплексный подход должен базироваться на глубокой формализации технологических процессов прокатки, рациональной организации программного обеспечения (ПО) в соответствии со структурой процесса проектирования [6].

К настоящему времени выполнен ряд работ в области разработки систем автоматизированного проектирования прокатного инструмента и создания математических моделей, описывающих процесс пластической обработки изделий при прокатке. Данные работы выполнялись как у нас в стране, так и за рубежом, некоторые из них описаны ниже.

В 1994–1996 гг. на языке AutoLISP было разработано первое ПО для расчета процесса прокатки в системе AutoCAD – ROLLCAD. Разработчики данного приложения К. Фишер и Д. Бердж из университета Охио (США) в своих работах [7, 8] предложили методологию проектирования технологического процесса двухвалковой прокатки на базе аналитических и конечно-элементных (КЭ) моделей с использованием системы проектирования AutoCAD и пакета ANTARES.

В 2003 г. были разработаны математические модели процесса плоской поперечно-клиновой вальцовки под руководством М.А. Шаронова (Московский государственный институт стали и сплавов). В работе [9] проведены расчеты и анализ течения металла при прокатке и определено напряженно-деформированное состояние в заготовке с использованием программы конечно-элементного анализа SPLEN-K, разработанной на кафедре математического моделирования Московского государственного института электроники и математики.

В 2005 г. Н.А. Смирновым (Уральский государственный технический университет) были разработаны математические модели, алгоритмы и программные средства для анализа основных технологических операций при производстве холоднодеформированных труб. В его работе [10] представлены методика и программы для формирования и анализа на ЭВМ альтернативных вариантов технологии изготовления холоднодеформированных труб.

В.С. Солодом, А.Г. Бенецким и А.Н. Мамаевым из НПО «Доникс» (Донецк) была предложена система автоматизированного проектирования технологии сортовой прокатки «Сорт-про», предназначенная для оперативного моделирования, проектирования и анализа основных технологических параметров процесса прокатки. В ее основу были положены математические модели, учитывающие множество геометрических, физических и термомеханических факторов процесса сортовой прокатки. В работе [11] приведено описание программы, рассмотрены примеры оптимизации калибровки валков и выполнен расчет экономичных температурно-скоростных режимов.

В 2007 г. сотрудники Пекинского университета науки и техники Дж. Джинг, Ш. Хуедао и Х. Женгхуан разработали программу расчета параметров процесса валковой прокатки для автомобильных полуосей [12]. Данная программа была написана на языке Visual Basic для системы проектирования Pro-Engineer и позволяла рассчитывать параметры валкового инструмента и формировать геометрию основных и боковых клиньев. Результаты работы программы представлялись в виде готовых трехмерных моделей инструмента.

Анализ вышеперечисленных и многих других работ показал, что существуют три основных направления в развитии компьютерного моделирования и оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением методом прокатки:

– разработка математических моделей процессов прокатки, позволяющих рассчитывать формоизменение металла, энергосиловые параметры, скоростные и температурные режимы прокатки, проверять ограничения режимов деформации и т. д. Данные модели нередко положены в основу специализированных программ по расчету и оптимизации технологических процессов прокатки и используются для расчета различных ее параметров;

– использование универсальных программ инженерного анализа для расчета методом конечных элементов процессов ПКП. Проводимые на базе данных систем компьютерные виртуальные исследования позволяют определить характеристики напряженно-деформированного состояния, провести анализ упругопластических деформаций, выявить проблемные зоны про-

катываемых заготовок и т. д. В этом случае численное моделирование процессов прокатки направлено на решение не только отдельных узких задач конструкторского или технологического проектирования, но и на более широкий класс задач исследовательского характера;

– разработка специальных модулей для систем проектирования, обеспечивающих автоматизацию процесса проектирования инструмента. Основными задачами таких программных модулей являются оперативная разработка трехмерных моделей инструмента для прокатки и подготовка конструкторской документации по этим моделям.

Видно, что до сих пор отсутствует методика единого комплексного подхода к компьютерному моделированию процессов ПКП, которая реализовывала бы все этапы разработки технологического процесса прокатки на уровне одной или нескольких CAD/CAE-систем.

Частично такая методика была предложена в работах [7, 8], однако она позволяла решать только ограниченный спектр задач и широкого распространения не получила. Это связано с тем, что в 1990-е гг. используемые программные средства имели существенные ограничения как в плане создания трехмерных моделей, так и в плане численного анализа.

С точки зрения практического использования идеальным является вариант создания специализированных программно-методических средств, предназначенных для выбора технологического процесса, расчета скоростных и температурных режимов прокатки, расчета энергосиловых параметров процесса и геометрии инструмента, синтеза трехмерных геометрических моделей инструмента, подготовки данных для численного моделирования, проведения виртуальных исследований и анализа результатов моделирования.

Использование таких средств позволит не только охватить существующие задачи выбора наиболее эффективного технологического процесса, проектирования и оптимизации конструкции инструмента, выбора заготовки или прокатного стана, но и обеспечить возможность прогнозирования за счет проведения виртуальных исследований, не требующих проведения натурных экспериментов. Таким образом, проблема разработки математических моделей, алгоритмов решения и создания на их основе сквозной компьютерной технологии проектирования и инженерного анализа процессов ПКП является достаточно актуальной.

1. Программные средства автоматизации проектирования инструмента

Разработанные программные средства (CWR Tool Design) предназначены для функционирования в составе интегрированной системы информационной поддержки процессов проектирования и инженерного анализа ПКП, которая также включает и дополнительные функциональные CAD/CAE-приложения: SolidWorks, ANSYS/LS-DYNA, LS-PREPOST.

Программные средства состоят из нескольких модулей:

- расчета технологической и инструментальной схемы прокатки;
- оптимизации;
- расчета и синтеза геометрической модели клинового инструмента (работает на базе CAD-системы SolidWorks);
- подготовки данных для численного анализа ПКП в системе ANSYS/LS-DYNA.

В предыдущих работах авторов [6, 13–15] была описана методика компьютерного моделирования процесса ПКП, которая включает методы построения численных моделей процесса прокатки, подходы и рекомендации по решению задачи моделирования в различных постановках, правила проведения анализа и верификации результатов моделирования. Эти и другие исследования легли в основу создания модуля подготовки входных данных для выполнения численного анализа процесса ПКП в среде LS-DYNA и не будут рассматриваться в данной статье.

Что касается трех первых модулей, то в их основу положен подход формального описания технологического процесса ПКП, который включает описание исходных информационных структур (состава и структуры входной информации и методов ее представления), способы представления прокатки на схематическом уровне (описание технологической и инструментальной схем прокатки), а также алгоритм синтеза геометрических моделей и сборочных конструкций клиновых инструментов по структурным описаниям конструктивно-технологических элементов поковки.

В основу работы программы положен принцип декомпозиции прокатываемой детали на отдельные части, которые можно прокатать за один проход. Расчет схем прокатки, синтез прокатанной детали и инструмента осуществляются на базе таких отдельных примитивов, называемых конструктивно-технологическими элементами (КТЭ).

Разделение детали на базовые КТЭ выполняется секущими плоскостями, перпендикулярными оси ее вращения, по признаку доминирующей формы элемента (цилиндр, конус, шар и т. д.). Под базовыми КТЭ понимаются библиотечные твердотельные модели, служащие для создания основных формообразующих элементов детали и полученные вращением некоторой образующей вокруг заданной оси симметрии. При этом если между базовыми КТЭ присутствуют торцевые элементы, то они добавляются к КТЭ, образуя группы (рис. 1).



Рис. 1. Разделение поковки на группы КТЭ

Технологическая схема прокатки (ТС) используется для описания технологического процесса ПКП, формируется на базе описания прокатки отдельных элементов детали и описывает переходы и последовательность прокатки. При формировании ТС рассчитывается количество этапов и переходов для прокатки каждой ступени, осуществляется расстановка элементов с учетом перекрытия этапов прокатки, указывается этап, на котором начинается формообразование (рис. 2, а).

Инструментальная схема прокатки (ИС) используется для описания как геометрии каждого отдельного клина и вставки, так и геометрии полностью собранного инструмента (сборочной конструкции). ИС отображает геометрические характеристики клиньев и продольных вставок, их взаимосвязи и взаиморасположение (рис. 2, б).

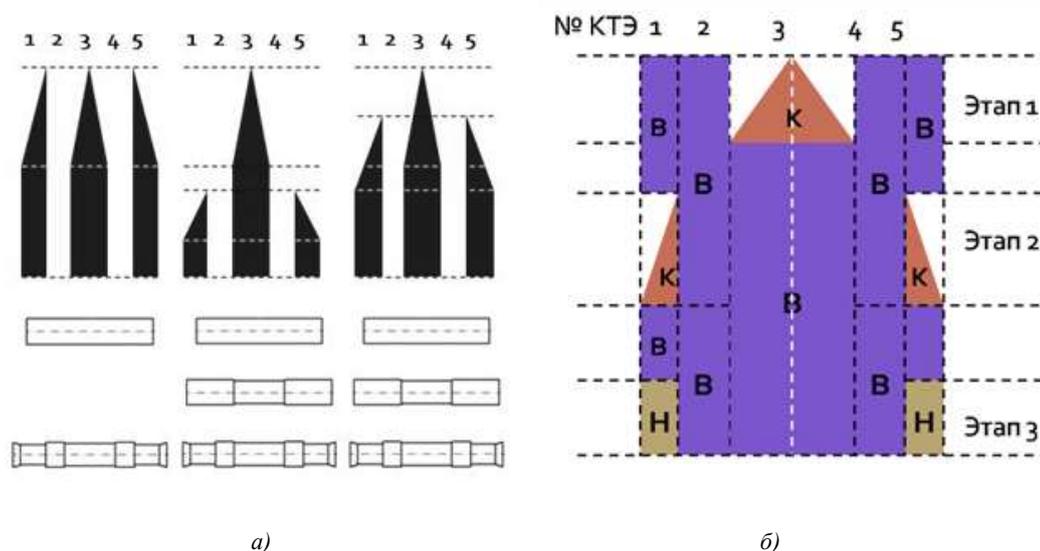


Рис. 2. Схемы ПКП: а) технологическая; б) инструментальная

Схема прокатки представляет собой возможные варианты технологического процесса изготовления заданного изделия. Схем может быть несколько, их количество зависит от

сложности изделия и условий, которые наложены на процесс прокатки. Выбор оптимальной схемы прокатки осуществляется по следующим критериям:

- суммарная длина инструмента не должна быть больше допустимой длины прокатного оборудования;
- величины углов инструмента должны быть в заданном интервале допустимых значений;
- суммарные усилия прокатки не должны быть больше допустимых значений по характеристикам прокатного оборудования;
- растягивающие усилия должны быть примерно равны и направлены в противоположные стороны, при этом эти усилия не должны разорвать прокатываемую деталь в слабом сечении;
- расчетное среднеквадратичное отклонение должно удовлетворять полю допуска прокатываемой ступени;
- запас устойчивости при прокатке должен удовлетворять допустимому значению.

2. Интерфейс программного обеспечения и особенности его функционирования

Программа позволяет выполнить:

- расчет параметров заготовки;
- расчет технологической схемы прокатки;
- расчет параметров прокатки (усилий, запаса пластичности материала, геометрических параметров инструмента);
- выбор оптимальной схемы прокатки;
- расчет инструментальной схемы прокатки;
- построение геометрических моделей инструмента;
- подготовку чертежей, спецификаций и другой документации;
- подготовку данных к инженерному анализу на базе КЭ программы LS-DYNA.

Перед началом работы над проектом необходимо выполнить ввод входных данных:

- общей информации о проекте (названия проекта, обозначения, имени разработчика и т. д.);
- описания оборудования (модели стана и его характеристик: наименования стана, закрытой высоты стана, ширины инструмента, длины инструмента, максимального усилия прокатки, максимальной и минимальной скоростей прокатки и т. д.);
- технологических параметров (материале заготовки, температуры прокатки и др.).

Задание прокатываемой детали и ее разделение на КТЭ осуществляются в главном окне программы, здесь же задаются и размеры каждого элемента (рис. 3)

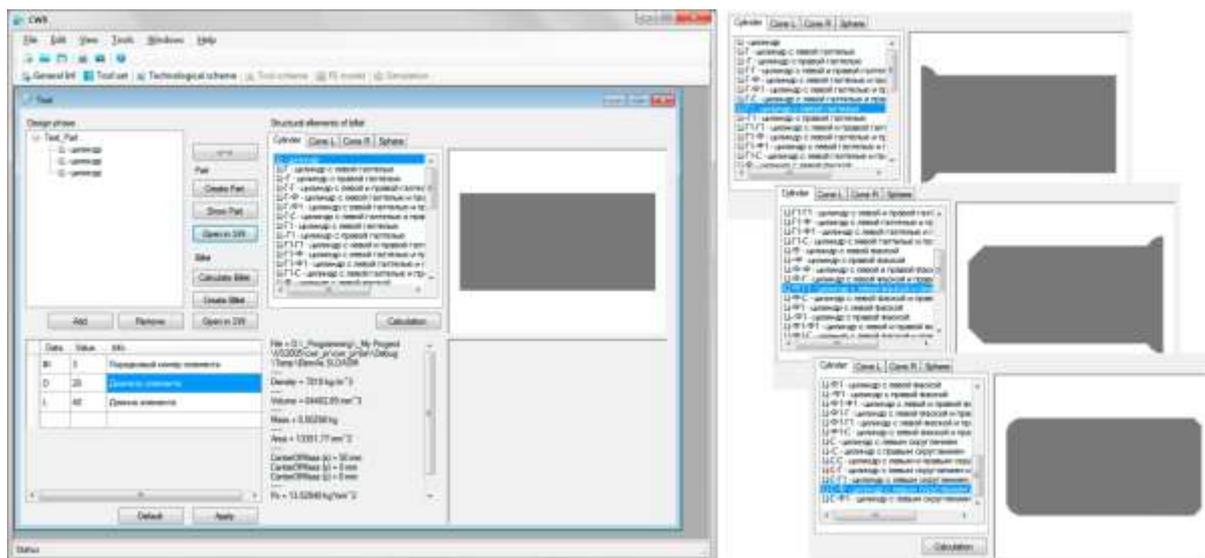


Рис. 3. Разделение детали на КТЭ в окне программы

Используя связь программы с SolidWorks, прямо из данного окна можно построить трехмерную модель детали или просмотреть уже созданную, нажав на кнопку *Create Part* или *Show Part*. Кроме того, нажав на кнопку *Create Billet*, можно рассчитать параметры исходной заготовки, из которой будет прокатываться деталь.

Далее программа автоматически рассчитывает и отображает технологическую схему в зависимости от выбранного типа прокатки (параллельная, последовательная или комбинированная) и наличия переходов между этапами (рис. 4).

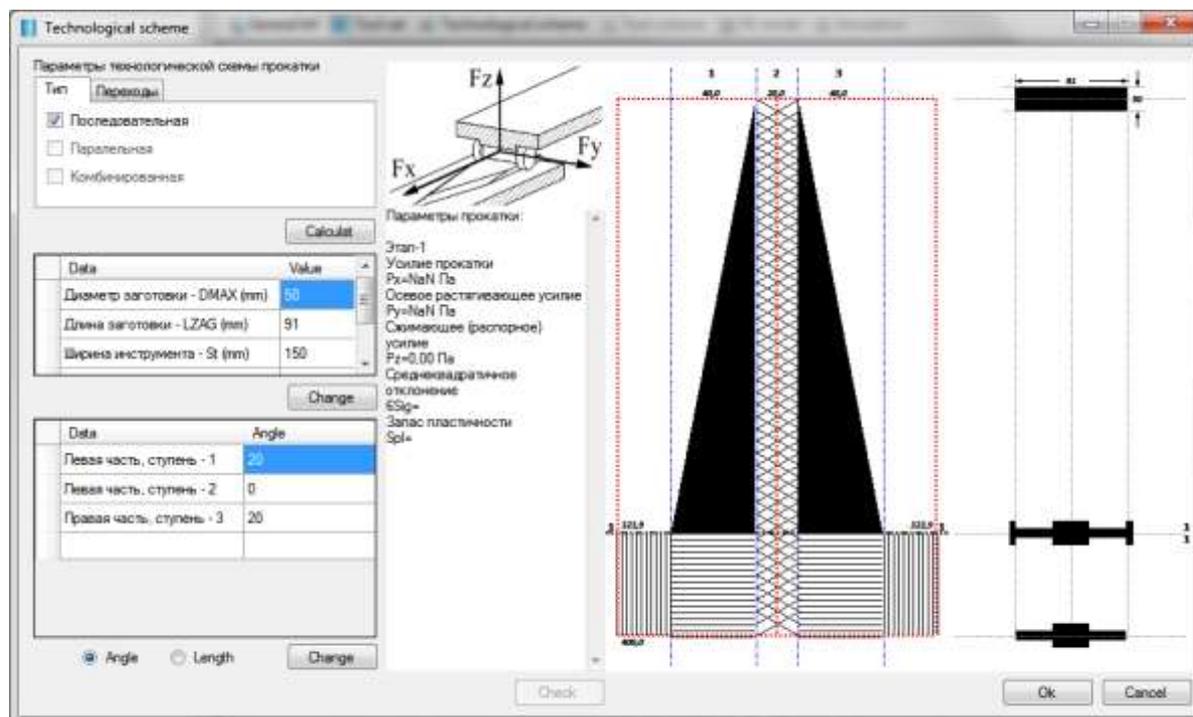


Рис. 4. Расчет технологической схемы прокатки

Управляющими параметрами являются угол прокатки или длина прокатываемого этапа. Программа рассчитывает оптимальные параметры прокатки на каждом этапе путем оценки усилий прокатки и запаса прочности с заданными значениями.

При необходимости имеется возможность ручного ввода значений. Так, в соответствующем поле можно поменять угол или длину и после нажатия кнопки *Change* программа пересчитает технологическую схему. В окне *Параметры прокатки* отображаются рассчитанные значения усилий и запас пластичности, справа от данного окна можно увидеть, как будет прокатываться каждая ступень детали.

Далее для каждого элемента по определенному алгоритму генерируются модели клинового инструмента и модели вставок, осуществляющих прокатку этих элементов. Размеры и тип моделей клиновых инструмента и вставок определяются исходя из формы прокатываемого элемента, расположения элемента относительно центра масс прокатываемой детали, технологической схемы прокатки и размеров прокатного оборудования. Таким образом, на основании ИС осуществляется синтез прокатного инструмента.

В окне *Tool scheme* отображаются все рассчитанные геометрические параметры клиньев и вставок, эти данные можно при необходимости поменять вручную. При нажатии на кнопку *Ok* программа запускает в скрытом режиме пакет SolidWorks и начинается построение каждой отдельной модели и сборочной конструкции инструмента. После завершения операции синтеза моделей можно открыть их в SolidWorks и наглядно увидеть результаты разработки (рис. 5).

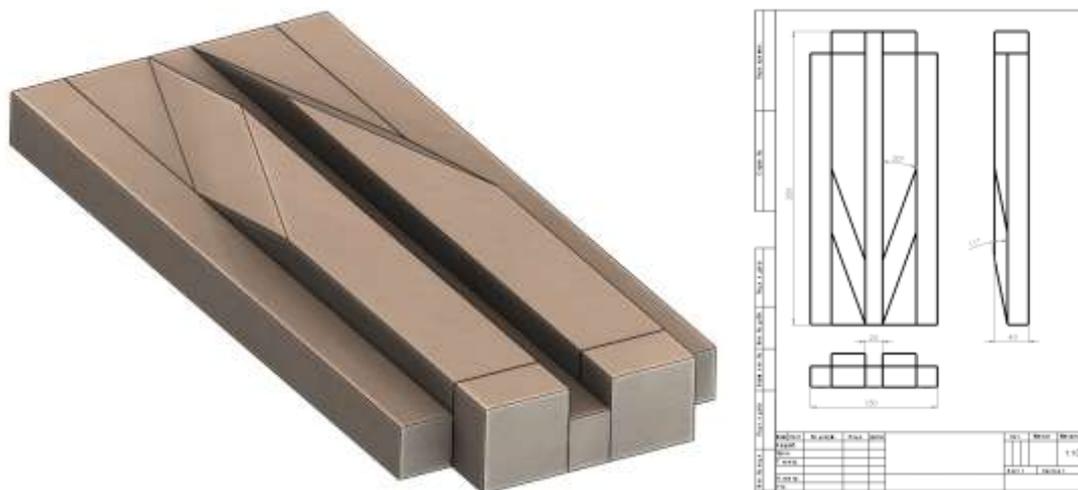


Рис. 5. Модель и чертеж сборочной конструкции инструмента

Заключение

Выполнены работы по созданию общих методологических принципов автоматизированного проектирования клинового инструмента для прокатки в системе SolidWorks, методики компьютерного проектирования, инженерного анализа и оптимизации процессов прокатки. Обоснованы общие принципы построения сквозной компьютерной технологии моделирования процессов поперечно-клиновой прокатки.

На базе разработанных методик, моделей и программных средств компьютерная технология проектирования процесса прокатки прошла успешное внедрение: проведено проектирование инструмента и компьютерное моделирование процессов ПКП для ряда реальных изделий (вала R290LC-7, пальца синхронизатора 80С-1701063-Б, заготовки для гаечного ключа, шарового пальца и др.). Это позволило оптимизировать параметры инструмента, дало представление об изменении геометрии заготовки в процессе прокатки, показало общую картину зон напряжений и деформаций, а также позволило оценить эффективность выбранных технологических решений и провести их оптимизацию.

Список литературы

1. Influence of tool parameters on tool wear in two-roll cross-wedge rolling / Jie Zhou [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – № 65, iss. 5–8. – P. 745–753.
2. Hai, Dinh Van. Finite Element Analysis of Cross-Wedge Rolling Process / Dinh Van Hai, Dao Minh Ngung, Nguyen Trong Giang // NUMIFORM 2010 : Proc. of the 10th Intern. Conf. on Numerical Methods in Industrial Forming Processes Dedicated to Professor O.C. Zienkiewicz (1921–2009). – Pohang, Republic of Korea, 2010. – P. 747–752.
3. Pater, Z. Experimental and theoretical analysis of the cross-wedge rolling process in cold forming conditions / Z. Pater, A. Tofil // Archives of metallurgy and materials. – 2007. – № 52, iss. 2. – P. 289–297.
4. Медведев, С.В. Использование суперкомпьютерных технологий в машиностроении / С.В. Медведев, А.М. Криштофик // Труды Междунар. суперкомпьютерной конф. «Научный сервис в сети Интернет: экзафлопсное будущее», 19–24 сентября 2011 г., Новороссийск. – М. : МГУ, 2011. – С. 98–103.
5. Кункевич, Д.П. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций дорожной техники в суперкомпьютерной среде СКИФ / Д.П. Кункевич, С.В. Медведев // Информационные технологии программы Союзного государства «Триада». Основные результаты и перспективы : сб. науч. тр. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2010. – С. 29–35.

6. Абрамов, А.А. Основные требования к сквозной компьютерной технологии проектирования процессов поперечно-клиновой прокатки / А.А. Абрамов, Г.В. Кожевникова // Информатика. – 2007. – № 4 (16). – С. 77–87.
7. Fischer, Ch. Development of a practical software tool for the design of rolls for near net shape profile rolling // A Thesis of Master of Science. – USA : Ohio University, 1994. – 139 p.
8. Burge, D. Experimental validation of roll force and profile fill for a profile ring rolling computer model // A Thesis of Master of Science. – USA : Ohio University, 1996. – 105 p.
9. 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.
10. Смирнов, Н.А. Математическое моделирование и автоматизированное проектирование технологических процессов производства холоднодеформированных труб : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / Н.А. Смирнов; Уральский гос. техн. ун-т. – Екатеринбург, 2004. – 17 с.
11. Солод, В.С. Программный комплекс для проектирования и анализа технологии сортовой прокатки / В.С. Солод, А.Г. Бенецкий, А.Н. Мамаев // Сб. трудов конф. «Металлургия и литейное производство 2007». – Жлобин, 2007. – С. 41–43.
12. Jing, Zh. Computer aided design for cross wedge rolling tools of automobile semi-axes / Zh. Jing, Sh. Xuedaao, Hu. Zhenghuana // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – № 187. – P. 41–45.
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. 24–35.
14. Абрамов, А.А. Использование метода конечных элементов при исследовании процесса поперечно-клиновой прокатки / А.А. Абрамов // Сб. материалов IV Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Кн. 4. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2009. – С. 38–44.
15. Shchukin, V.Y. LS-DYNA software pack testing at solving tasks of cross rolling / V.Y. Shchukin, G.V. Kozhevnikova, A.A. Abramov // XIII Intern. Forging Conf. – Brazil, 2009. – P. 177–184.

Поступила 06.08.2013

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: abramov@newman.bas-net.by,
medv@newman.bas-net.by*

A.A. Abramov, S.V. Medvedev

SOFTWARE FOR COMPUTER-AIDED DESIGN OF CROSS-WEDGE ROLLING

The issues of computer technology creation of 3D-design and engineering analysis of metal forming processes using cross wedge rolling methods (CWR) are considered. The developed software for computer-aided design and simulation of cross-wedge rolling is described.