

## ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.5;621;658.512

Ю.М. Кротюк, А.Г. Гривачевский

**УНИФИЦИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОД  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА  
ДЛЯ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ**

*Рассматриваются методический подход, модели и метод автоматизированного проектирования инструмента для поперечно-клиновой прокатки, а также методические основы реализации системы автоматизированного проектирования инструмента для изготовления деталей методом горячей плоской поперечно-клиновой прокатки (ПКП).*

**Введение**

Настоящие материалы разработаны применительно к горячей плоской поперечно-клиновой прокатке расходящимся клином осесимметричных изделий из черных и цветных металлов и сплавов.

Конфигурация получаемых деталей может быть многообразной, она включает цилиндрические, конические, сферические и другие поверхности, всевозможные канавки и выступы.

Детали, полученные методом ПКП, приобретают более высокие механические свойства за счет оптимального расположения волокон относительно контактных поверхностей, что повышает в первую очередь их прочность и износостойкость [1].

Предпосылками для выполнения работы явились следующие аспекты:

- высокие точность и производительность созданного прокатного оборудования;
- высокое качество получаемых изделий;
- значительная трудоемкость процесса проектирования инструмента, недостаточное качество проектных решений и, как следствие, дополнительные затраты при наладке инструмента.

**1. Методические основы метода и задачи проектирования**

В методическом плане формализация процесса проектирования инструмента для ПКП базируется на использовании метода декомпозиции, что обусловлено особенностями реализации технологического процесса ПКП и технологии изготовления клинового инструмента, а именно:

- необходимостью разделения на этапы процесса прокатки и задания последовательности этих этапов в зависимости от конфигурации прокатываемой детали;
- ограничениями, возникающими в процессе изготовления клинового инструмента по его синтезированному описанию.

Декомпозиция в предлагаемом подходе заключается в последовательном выделении в составе прокатываемой детали элементов (в общем случае произвольным образом) и дальнейшем проектировании элементов инструмента для выделенных элементов прокатываемой детали.

Процесс проектирования клинового инструмента в рамках предлагаемого подхода может быть разделен на ряд взаимосвязанных задач синтеза геометрии элементов клинового инструмента с последующим решением задачи сборки клинового инструмента из выделенных элементов [2, 3].

Координирующие условия вырабатываются на основе геометрической связанности элементов прокатываемой детали.

Проектирование инструмента для ПКП предполагает решение задач:

- конструирования отдельных элементов клинового инструмента;
- компоновки инструмента из конструктивных элементов.

К первому типу относятся задачи определения геометрических параметров инструмента и элементов инструмента с учетом технологических режимов прокатки. Элементарными гео-

метрическими объектами при этом являются унифицированные модели элементов клинового инструмента.

Ко второму типу относятся задачи компоновки и размещения элементов инструмента на «обойме». При этом компоновка конструктивных элементов является в большинстве случаев достаточно трудоемкой частью конструкторского проектирования.

## 2. Классификация элементов инструмента

Унификация элементов инструмента позволила разработать необходимую для рассматриваемой области классификацию, на основе которой были созданы параметризованные модели основных элементов клинового инструмента (рис. 1).

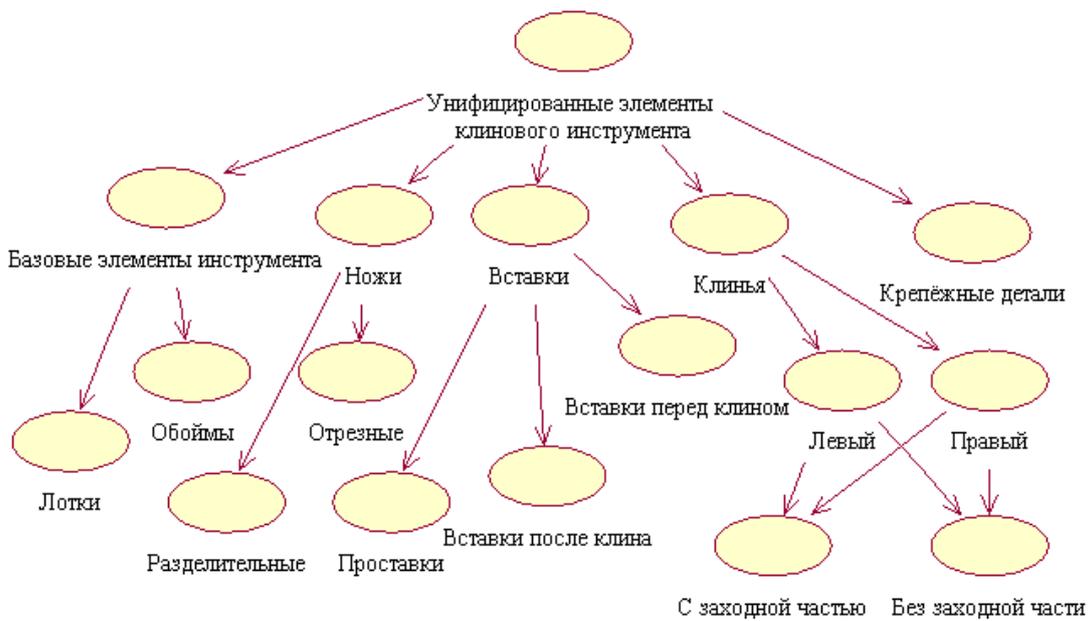


Рис. 1. Классификация элементов клинового инструмента

Расположение элементов инструмента в составе сборочной модели показано на рис. 2.

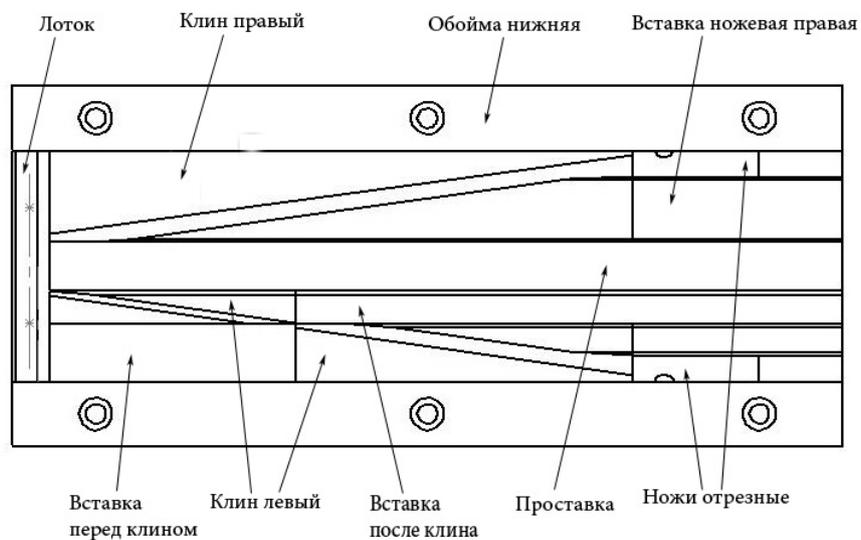


Рис. 2. Схема расположения элементов инструмента в сборочной модели

### 3. Унифицированные параметризованные модели элементов клинового инструмента

В рамках представленной классификации были созданы унифицированные параметризованные модели элементов клинового инструмента и система взаимосвязанных расчетных моделей синтеза элементов инструмента с учетом геометрии прокатываемой детали. Под унифицированной моделью клинового инструмента понимается модель, обеспечивающая прокатку исходной заготовки с диаметром  $D_{исх}$  в цилиндрическую прокатную поковку с минимальным диаметром  $D_{мин}$ , определяемым необходимым технологическим зазором между верхним и нижним инструментами. В общем случае  $D_{мин}$  может быть принят равным 0. Из приведенного определения следует, что высота унифицированного элемента клинового инструмента, обеспечивающего формообразование (клинья, вставки после клиньев), определяется соотношением  $H_{эл} = H_{зв} / 2$ , где  $H_{зв}$  – закрытая высота оборудования по инструменту (параметр прокатного стана).

Основным элементом клинового инструмента является формообразующий клин, который состоит из заходного и формообразующего участков. Заходный участок предназначен для осуществления внедрения клинового инструмента в заготовку и образования на ней кольцеобразной канавки, которая впоследствии расширяется вследствие воздействия боковой грани клина. Заходные участки бывают двух типов.

Заходный участок первого типа образуется автоматически при пересечении друг с другом наклонных деформирующих поверхностей инструмента. Деформирующий бурт имеет в сечении форму остроугольного треугольника, поэтому его называют острым. Клиновой инструмент с заходным участком первого типа используется при степени обжатия заготовки  $\delta = D_{исх} / D_{ст}$ , равной или менее 1,6, где  $D_{ст}$  – конечный диаметр прокатываемой ступени.

При  $\delta > 1,6$  применяют инструмент с заходным участком второго типа. Его отличие от первого заключается в том, что вершина острого бурта дополнительно срезана поверхностью («затылована») таким образом, что в каждом поперечном сечении бурт имеет форму трапеции, боковые стороны которой образованы наклонными деформирующими гранями. Такое выполнение заходного бурта возможно за счет уменьшения угла его подъема и, следовательно, увеличения длины заходного участка. Формообразующий участок предназначен для профилирования заготовки.

Ниже приведены формализованные модели основных элементов клинового инструмента.

Унифицированная параметризованная 3D-модель левого клина с заходным участком второго типа (рис. 3) и чертеж унифицированной модели клина (рис. 4) характеризуются рядом параметров. Особенности расчета параметров унифицированной параметризованной 3D-модели клина с заходным участком первого типа будут отражены в приведенных ниже расчетных соотношениях.

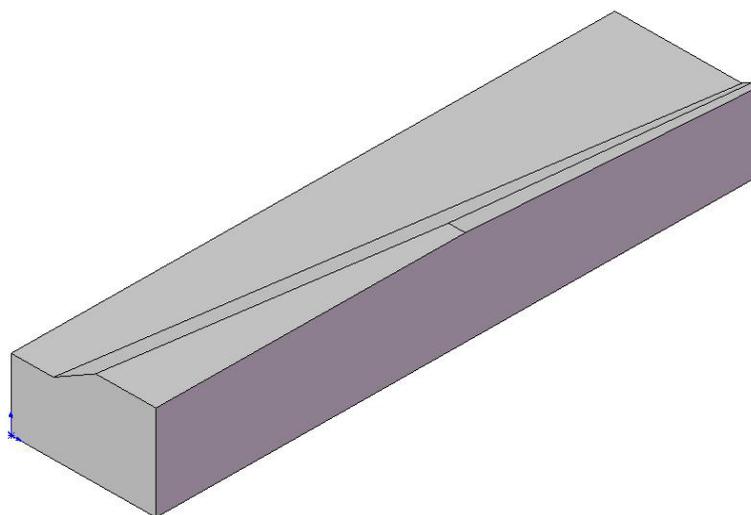


Рис. 3. Параметризованная 3D-модель клина

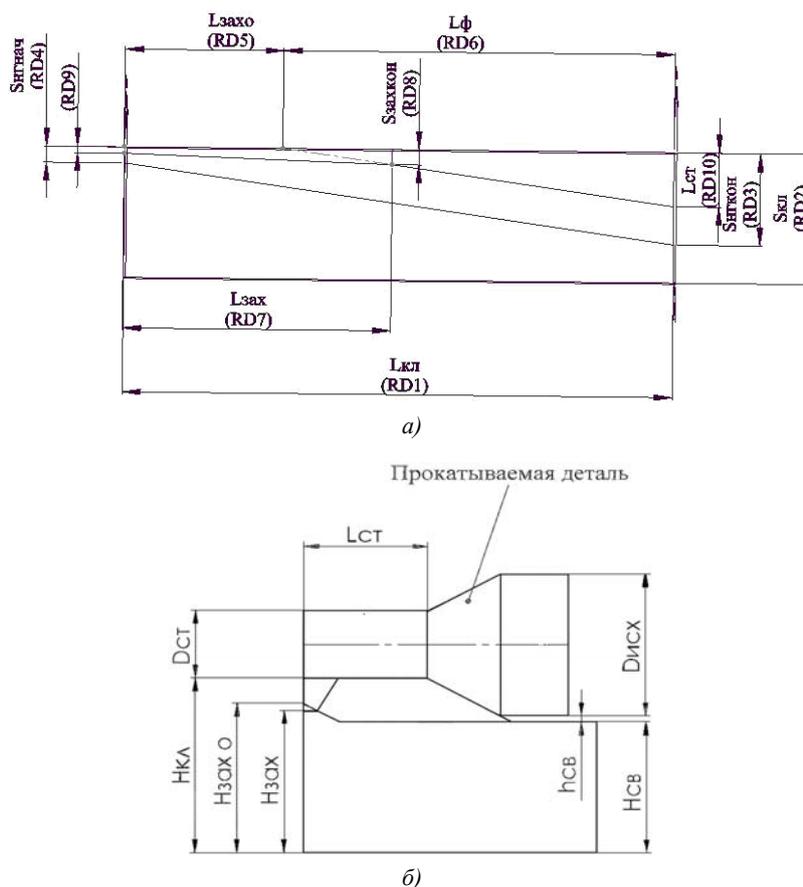


Рис. 4. Чертеж унифицированной параметризованной 3D-модели клина с заходом второго типа: а) вид сверху; б) вид спереди

В моделях, используемых для расчета значений параметров элементов клинового инструмента, применяются следующие обозначения:

$H_{зв}$  – закрытая высота по инструменту, мм (является характеристикой стана, может выбираться);

$g$  – коэффициент теплового расширения стали (зависит от температуры нагрева), диапазон изменения  $1,020 > g > 1$  ( $g = 1,015$  opt);

$L_{кл}$  – общая длина клина, мм;

$S_{кл}$  – ширина клина, мм (рассчитывается);

$S_{нклон}$  – ширина наклонной грани в конце клина, мм (рассчитывается, для клина с заходным участком первого типа в модели клина и в расчетах не используется);

$S_{ннач}$  – ширина наклонной грани в начале клина, мм (рассчитывается);

$L_{ф}$  – формующая длина клина, мм (рассчитывается);

$L_{захо}$  – длина острой заходной части клина, мм (рассчитывается);

$L_{зах}$  – длина плоской заходной части клина, мм (рассчитывается, для клина с заходным участком первого типа в модели и расчетах не используется);

$D_{ст}$  – диаметр прокатываемого элемента детали, мм (для цилиндра);

$D_{исх}$  – исходный диаметр прокатываемой детали (заготовки), мм;

$D_{стк}$  – конечный диаметр элемента прокатываемой детали, мм;

$D_{стн}$  – начальный диаметр элемента прокатываемой детали, мм;

$L_{ст}$  – длина прокатываемого элемента детали (для цилиндра), мм;

- $L_{\text{сткон}}$  – конечная длина прокатываемого элемента детали, мм;  
 $H_{\text{кл}}$  – высота формующей плоскости клина (определяется методом композиции унифицированной базовой модели и модели прокатываемой детали (элемента детали));  
 $H_{\text{клин}}$  – высота клина начальная, мм (рассчитывается по исходному диаметру заготовки);  
 $H_{\text{захо}}$  – высота острой заходной части клина, мм (рассчитывается, для клина с заходным участком первого типа в модели не используется);  
 $H_{\text{зах}}$  – высота плоской заходной части клина, мм (рассчитывается, для клина с заходным участком первого типа в модели не используется);  
 $H_{\text{св}}$  – высота свободной части клина, мм (рассчитывается);  
 $S_{\text{захнач}}$  – ширина плоской заходной части в начале клина, мм (выбирается, для клина с заходным участком первого типа в модели не используется);  
 $S_{\text{захкон}}$  – ширина плоской заходной части в конце клина, мм (выбирается, для клина с заходным участком первого типа в модели не используется, в расчетных соотношениях принимается равной 0);  
 $S_{\text{пер}}$  – ширина участка переката, мм (рассчитывается);  
 $\beta^\circ$  – угол заострения клина (выбирается в диапазоне  $0^\circ$ – $15^\circ$ ,  $8^\circ$ opt или рассчитывается при выборе  $L_{\text{кл}}$ );  
 $\alpha^\circ$  – угол наклона боковой грани клина (выбирается в диапазоне  $0^\circ$ – $45^\circ$ ,  $30^\circ$ opt).  
 Основные расчетные соотношения для определения параметров унифицированной модели левого клина с заходом:

$$L_{\text{кл}} = L_{\text{ф}} + L_{\text{захо}};$$

$$L_{\text{ф}} = \frac{L_{\text{ст}}}{\text{tg}\beta} \cdot g,$$

где  $g$  определяется температурой нагрева заготовки ( $g = 1-1,020$ ),  $\beta$  – геометрией прокатываемого участка детали ( $\beta = 0^\circ-15^\circ$ );

$$L_{\text{захо}} = \left( \left( \frac{D_{\text{исх}} \cdot g - D_{\text{стк}} \cdot g}{2} \right) - 0,1 D_{\text{исх}} \cdot g \right) / \text{tg}\alpha \cdot \text{tg}\beta,$$

где  $\alpha$  определяется геометрией прокатываемого участка детали ( $\alpha = 0^\circ-45^\circ$ );

$$H_{\text{захо}} = S_{\text{захнач}} \cdot \text{tg}\alpha \cdot \cos\beta + H_{\text{зах}},$$

где  $S_{\text{захнач}}$  определяется геометрией детали;

$$H_{\text{зах}} = H_{\text{зв}} - D_{\text{исх}} + 0,2 \cdot D_{\text{исх}};$$

$$L_{\text{зах}} = L_{\text{захо}} + S_{\text{захкон}} / \text{tg}\beta,$$

где  $S_{\text{захкон}}$  определяется геометрией детали;

$$S_{\text{кл}} = \begin{cases} L_{\text{ст}} + S_{\text{пер}}, & \text{если клин перед отрезным ножом,} \\ L_{\text{ст}} & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$L_{\text{пер}} = \begin{cases} \pi \cdot D_{\text{стк}} \cdot \text{tg}\alpha, & \text{если клин перед отрезным ножом,} \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$H_{св} = \frac{(H_{зв} - g \cdot D_{исх} - 2hcв)}{2}, \quad hcв = 0,1 \cdot D_{исх};$$

$$S_{нгнач} = \frac{(S_{захнач} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta + H_{зах} - (H_{зв} - g \cdot D_{исх} - 2hcв))}{2} / \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta;$$

$$H_{кл} = H_{зв} / 2;$$

$$S_{пер} = D_{стн}.$$

При расчетах параметров правого клина в расчетных соотношениях вместо параметра  $D_{стк}$  используется параметр  $D_{стн}$ .

При проектировании инструмента в составе САПР применяются вставки различных видов (рис. 5).

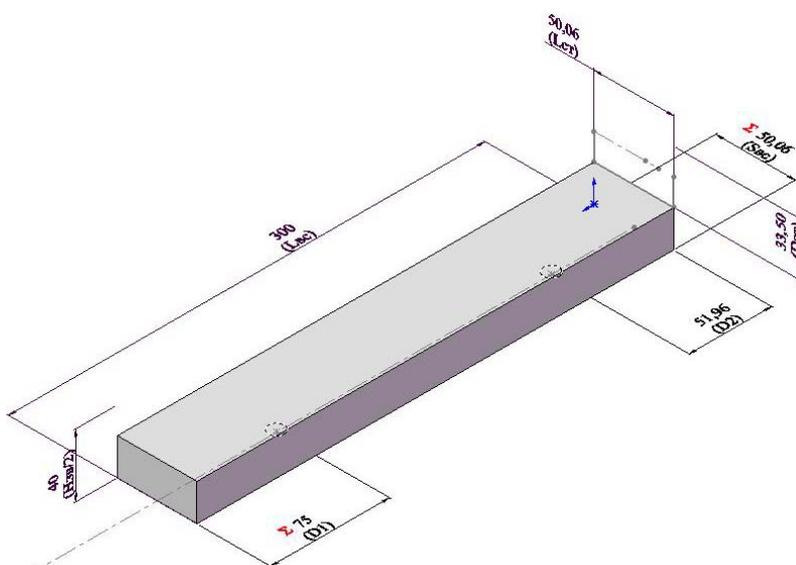


Рис. 5. Унифицированная параметризованная 3D-модель вставки

Основные расчетные соотношения для определения параметров унифицированной модели вставки после клина:

$$Lvsti = Linst(i - 1),$$

где  $Linst(i) = Lkl(i - 1) + Lvst(i - 1)$ , если клин  $i - 1$  левый и клин  $i$  левый;  
 $Linst(i) = Linst(i - 1) - Lkl(i)$ , если клин  $i - 1$  левый, а клин  $i$  правый;  
 $Linst(i) = Lvst(i - 1) - Lkl(i)$ , если клин  $i - 1$  правый и клин  $i$  правый;

$$Svst = Lcm;$$

$$Hvst = Hзв/2.$$

Основные расчетные соотношения для определения параметров унифицированной модели вставки перед клином:

$$Lvsti = Lmax - Linsti,$$

где  $Linsti = Lkl(i - 1) + Lvsti$ ;  
 $Lmaxi = 0$ , если клин  $i - 1$  левый и клин  $i$  левый;  
 $Lmaxi = Linst(i - 1)$ , если клин  $i - 1$  левый, а клин  $i$  правый;  
 $Lmaxi = Lmax(i - 1)$ , если клин  $i - 1$  левый, а клин  $i$  правый;

$$S_{vsti} = S_{kli};$$

$$H_{vst} = (H_{зв} - D_{исх})/2.$$

Основные расчетные соотношения для определения параметров унифицированной модели проставки:

$$L_{prvsti} = L_{max};$$

$$S_{vsti} = S_{kli};$$

$$H_{vst} = (H_{зв} - D_{исх})/2.$$

Параметризованная унифицированная 3D-модель отрезного ножа и чертеж унифицированной модели отрезного ножа показаны на рис. 6 и 7 соответственно.

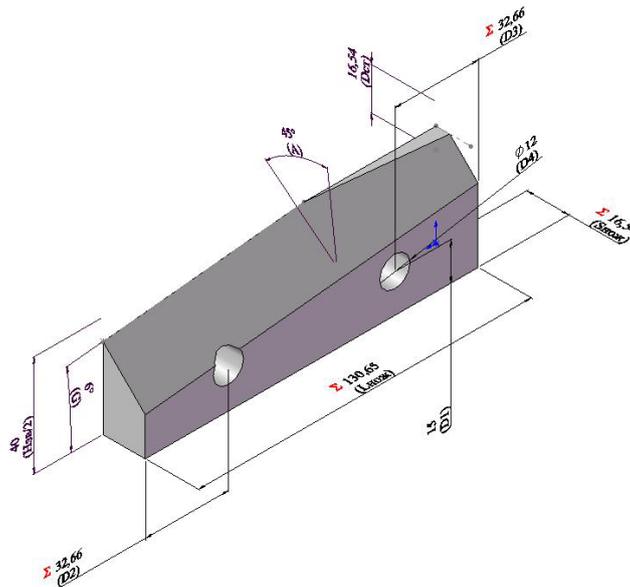


Рис. 6. Параметризованная 3D-модель отрезного ножа

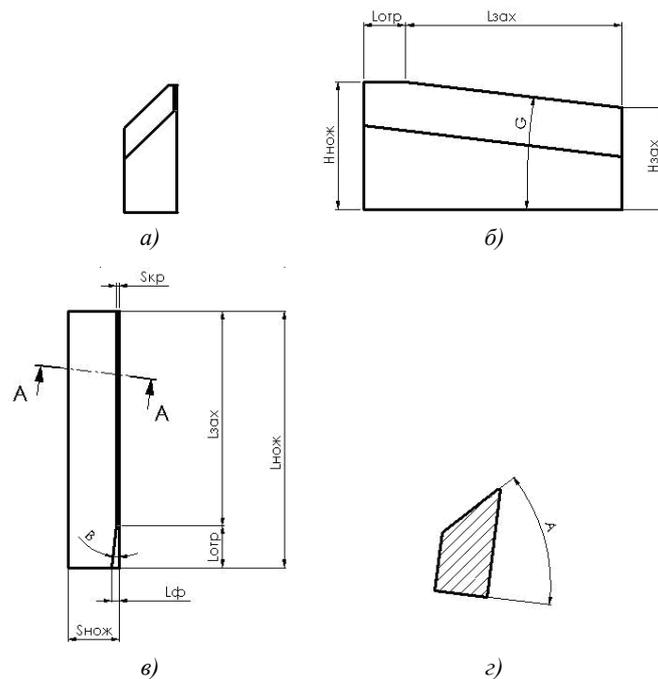


Рис. 7. Чертеж отрезного ножа: а) вид спереди; б) вид слева; в) вид сверху; г) сечение А-А

Основные расчетные соотношения для определения параметров отрезного ножа:

$$L_{\text{нож}} = L_{\text{отр}} + L_{\text{зах}},$$

где  $L_{\text{нож}}$  – расчетная длина ножа;  $L_{\text{отр}}$  – длина отрезной части ножа,  $L_{\text{отр}} \geq D_{\text{отр}}$ ;

$$L_{\text{зах}} = \frac{(H_{\text{нож}} - H_{\text{зах}})}{\text{tg}G},$$

где  $G$  – угол наклона режущей грани ( $G = 0^\circ - 9^\circ$ ,  $G = 6^\circ - \text{opt}$ );

$$H_{\text{нож}} = \frac{H_{\text{зв}}}{2} - 0,01 \cdot D_{\text{отр}},$$

где  $D_{\text{отр}}$  – диаметр отрезаемого элемента;  $0,01 \cdot D_{\text{отр}}$  – зазор ножа.

Высота заходной части ножа определяется по формуле  $H_{\text{зах}} = \frac{(H_{\text{зв}} - D_{\text{отр}})}{2}$ , ширина режущей кромки ножа – по формуле  $S_{\text{кр}} = 0,05 \cdot D_{\text{отр}}$ , ширина формующей части ножа – по формуле  $L_{\text{ф}} = S_{\text{кр}} + L_{\text{отр}} \cdot \text{tg}\beta$ , ширина ножа – по формуле  $S_{\text{нож}} \geq D_{\text{отр}}$ .

Возможна конструкция отрезного ножа без участка отрыва. В этом случае расчетные соотношения сохраняются, а длина отрезной части ножа  $L_{\text{отр}}$  принимается равной 0.

Создание параметризованных моделей элементов клинового инструмента и его синтезированной модели реализуется на основе оригинальной методики, использующей унифицированную базовую модель клинового инструмента (см. рис. 3), с последующей генерацией модели специализированного инструмента (рис. 8) методом композиции унифицированной базовой модели и модели прокатываемой детали (элемента детали).

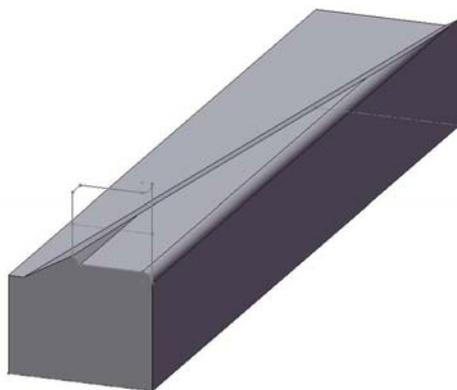


Рис. 8. Получение модели элемента клинового инструмента для элемента детали «цилиндр с гальтелью справа» из унифицированной модели клина

Следует отметить, что предлагаемый метод проектирования инструмента не накладывает ограничений на количество элементов, выделяемых в составе прокатываемой детали, и весь инструмент может быть синтезирован в виде единого клина с добавленными к нему отрезными ножами либо, в случае необходимости, в виде правого и левого клина, например, для парной прокатки деталей. При этом унифицированные модели клиновых инструментов не требуют никаких корректировок.

Использование данного подхода позволило автоматизировать процесс формирования параметризованных моделей клинового инструмента (элементов инструмента) и, как следствие, процесс формирования библиотек параметризованных моделей клиновых инструментов.

В задачах автоматизированного проектирования геометрии инструмента ПКП используются приемы создания библиотечных моделей элементов деталей и инструмента, позволяющих частично изменять топологию. Эта особенность основана на возможностях конкретного графического пакета. Изменение топологии позволяет в значительной степени сократить объемы библиотек параметризованных твердотельных моделей и трудоемкость их разработки.

В алгоритмах геометрического проектирования применяются геометрические объекты элементов деталей, конструкции которых имеют самые разнообразные геометрические характеристики. Через геометрические характеристики деталей определяются исходные геометрические параметры параметризованных моделей элементов инструмента.

#### 4. Основные этапы технологии проектирования инструмента

Перед началом проектирования задаются технологические параметры процесса прокатки, после чего осуществляется формирование структуры проекта. Структура проекта формируется путем последовательного выбора (слева направо при горизонтальном расположении оси детали) элемента детали, для которого указываются набор элементов инструмента (выбор элементов инструмента осуществляется из имеющейся библиотеки унифицированных моделей элементов инструмента) и базовые параметры прокатываемого элемента детали (диаметры начального и конечного элементов). После этого осуществляются расчет параметров элементов инструмента и синтез унифицированных моделей элементов инструмента и инструмента в сборе.

Поэлементный состав проекта, задаваемый конструктором в процессе проектирования нижнего инструмента, представлен ниже.

*Элемент детали 1:*

- вставка перед клином;
- клин левый;
- вставка ножевая левая;
- нож отрезной левый.

*Элемент детали 2:*

- клин с заходом левый;
- вставка после клина.

*Элемент детали 3:*

- проставка;
- нож отрезной.

*Элемент «заготовка»:*

- лоток;
- обойма нижняя.

На рис. 9 и 10 показаны пример детали и результат проектирования в рамках предлагаемых методики и технологии выполнения проектных процедур.

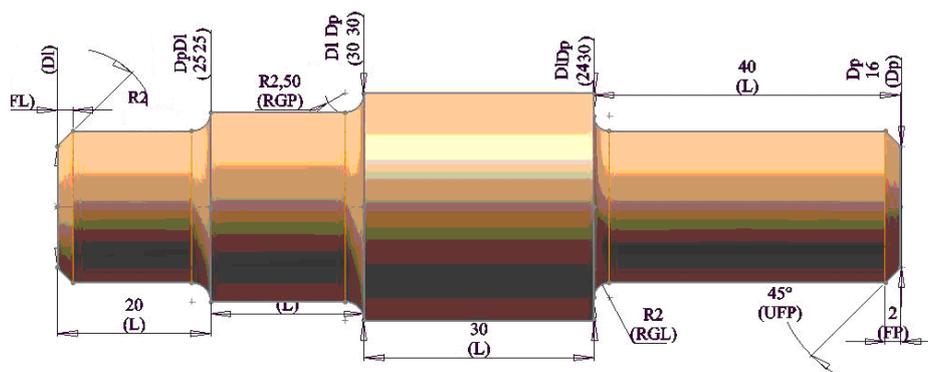


Рис. 9. Модель детали для изготовления методом ПКП

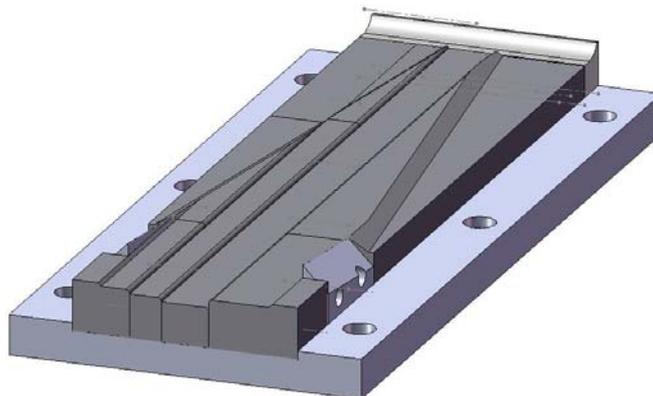


Рис. 10. Параметризованная 3D-модель инструмента, созданная на основе предлагаемых метода и технологии проектирования

Для верхнего инструмента в составе проекта каждому элементу детали дополнительно задаются только вставки конечные (вставки ножевые, проставка и вставка после клина) и обойма верхняя в составе элемента «заготовка», остальные элементы инструмента являются такими же, как и для нижнего инструмента.

### **5. Функциональный состав системы автоматизированного проектирования инструмента для ПКП**

Система автоматизированного проектирования инструмента для поперечно-клиновой прокатки (САПР ПКП) состоит из ряда взаимосвязанных подсистем:

- «Управление программным комплексом», предназначенной для обеспечения взаимодействия между подсистемами САПР ПКП, а также САПР и внешними приложениями;
- «Создание и ведение базы данных», предназначенной для создания и ведения нормативно-справочной информации в составе САПР ПКП, библиотек конструктивных элементов, используемых при проектировании;
- «Проектирование», предназначенной для ввода задания на проектирование инструмента ПКП, ввода параметров проектируемой детали, расчета и редактирования параметров элементов клинового инструмента, формирования данных для экспорта параметров детали и инструмента в графическую среду.

В состав подсистемы «Проектирование» входят библиотеки моделей и программ:

«Изделие» – библиотека параметризованных моделей и программ, предназначенных для реализации трехмерного моделирования прокатываемых деталей в графической среде;

«Технология» – библиотека программ, предназначенных для расчета параметров заготовки и параметров детали;

«Конструирование» – библиотека параметризованных моделей и программ, предназначенных для реализации трехмерного моделирования элементов клинового инструмента в графической среде;

«Документирование» – библиотека моделей типовых чертежей и программ, предназначенных для оформления конструкторской документации.

Под библиотечной моделью элемента инструмента, предназначенной для использования в составе САПР ПКП, понимается модель параметризованного элемента инструмента (в общем случае клинового инструмента в целом), обладающая следующими атрибутами:

- твердотельной моделью с нанесенными локальными (торцевыми) системами координат;
- набором геометрических и технологических параметров (независимых и зависимых), необходимых для определения данной модели в составе среды графического моделирования;
- набором расчетных соотношений, позволяющих осуществлять пересчет геометрических параметров в зависимости от базовых параметров элементов детали.

### Заключение

Полученные унифицированные формализованные модели, метод проектирования элементов клинового инструмента и метод синтеза сборочной модели инструмента позволили формализовать и автоматизировать процесс проектирования инструмента для ПКП.

Использование моделей и методов проектирования в составе САПР ПКП позволило значительно (в десять раз) сократить сроки проектирования инструмента при одновременном повышении качества получаемых проектных решений, сделать процесс проектирования более предсказуемым и гарантирующим получение обоснованного результата.

### Список литературы

1. Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Теория и практика поперечно-клиновой прокатки». – Минск, 2006. – 190 с.
2. Кротюк, Ю.М. Система автоматизированного проектирования инструмента для изготовления изделий методом поперечно-клиновой прокатки / Ю.М. Кротюк, А.Г. Гривачевский // Автоматизация в промышленности : материалы 2-й науч. конф. – М. : ИПУ, 2008. – С. 40–48.
3. Кротюк, Ю.М. Система автоматизированного проектирования инструмента для поперечно-клиновой прокатки / Ю.М. Кротюк, А.Г. Гривачевский // Информационные технологии в промышленности : тез. докл. Пятой Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – С. 53–54.

Поступила 13.01.10

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

**Y.M. Krotiuk, A.G. Grivachevsky**

### **A METHODOICAL APPROACH, UNIFIED FORMALIZED MODELS AND A METHOD OF AUTOMATED TOOL DESIGN FOR CROSS-WEDGE ROLLING**

A generic approach, models and the method of automated designing the tool for the cross-wedge rolling, as well as the methodical basis of implementation the system of automated designing the tool for parts production by the method of hot flat cross-wedge rolling are examined in the article (CWR).