

Технология и технологические машины

УДК 621.735.2

Исследование операции гибки при штамповке коленчатых валов с помощью компьютерного моделирования

Ю.В. Майстров

Рассмотрены вопросы формоизменения и распределения волокнистого строения поковки по сечению при заготовительной операции гибки для последующей штамповки коленчатых валов. Проведено компьютерное моделирование процесса гибки и выявлено распределение волокнистого строения в поковке после гибки. Результаты моделирования сопоставлены результатам физического эксперимента, что позволило использовать компьютерное моделирование для дальнейших исследований процесса.

Ключевые слова: коленчатый вал, шатунные шейки, гибка заготовительная, моделирование.

The article deals with the issues of forming and distributing the fibrous structure along the cross section of the billet when preparing bending operations for subsequent forging of crankshafts. Computer simulation of the process of bending was carried out and the distribution of the fibrous structure in the workpiece after bending was revealed. The simulation results were compared with the results of physical experiments, which allowed the use of computer simulations for further study of the process.

Keywords: crankshaft, connecting rod neck, bending, modeling.

Наиболее распространенным способом изготовления поволоков коленчатых валов, например, для автомобильных двигателей, является горячая объемная штамповка на молотах и кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП).



МАЙСТРОВ
Юрий Владимирович
аспирант кафедры
«Технология обработки
металлов давлением»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

В настоящее время технологические процессы штамповки крупных коленчатых валов грузовых автомобилей выполняют на молотах с массой падающих частей 10 т и более и КГШП силой до 125 МН. Существуют также специальные методы штамповки крупных коленчатых валов с использованием специализированного оборудования такие как: секционная штамповка, штамповка отдельных звеньев вала с последующим соединением на одной центральной оси, штамповка в закрытых штампах и др.

Однако исследования по вопросам благоприятного распределения волокон в поковке при штамповке перечисленными выше методами практически не проводились. Вместе с тем, как показано в работе [1], отсутствие выхода волокон макроструктуры под большим углом к поверхности детали, работающей в условиях контактного трения, а также повторение во-

локнами контура коленчатого вала, позволят увеличить срок эксплуатации вала.

Изготовление штампованных коленчатых валов по существующим технологиям приводит к тому, что после обрезки облоя волокна по периметру поковки выходят на поверхности шеек вала под углом 90°, что резко увеличивает износ трением вала в месте расположения шеек. Получить благоприятное распределение макроструктуры в поковке, т. е. повторение волокнами контура детали, возможно, применив гибку на заготовительной операции штамповки.

В работе [2] приведена схема гибки, которая позволяет получать огибание волокнами макроструктуры контура коленчатого вала и исключить дефекты макроструктуры. Особенность данного метода заключается в наличии в штампе зажимных элементов, расположенных в инструментальных вставках. Зажимы представляют собой замкнутые области, которые удерживают наиболее изнашиваемые ша-

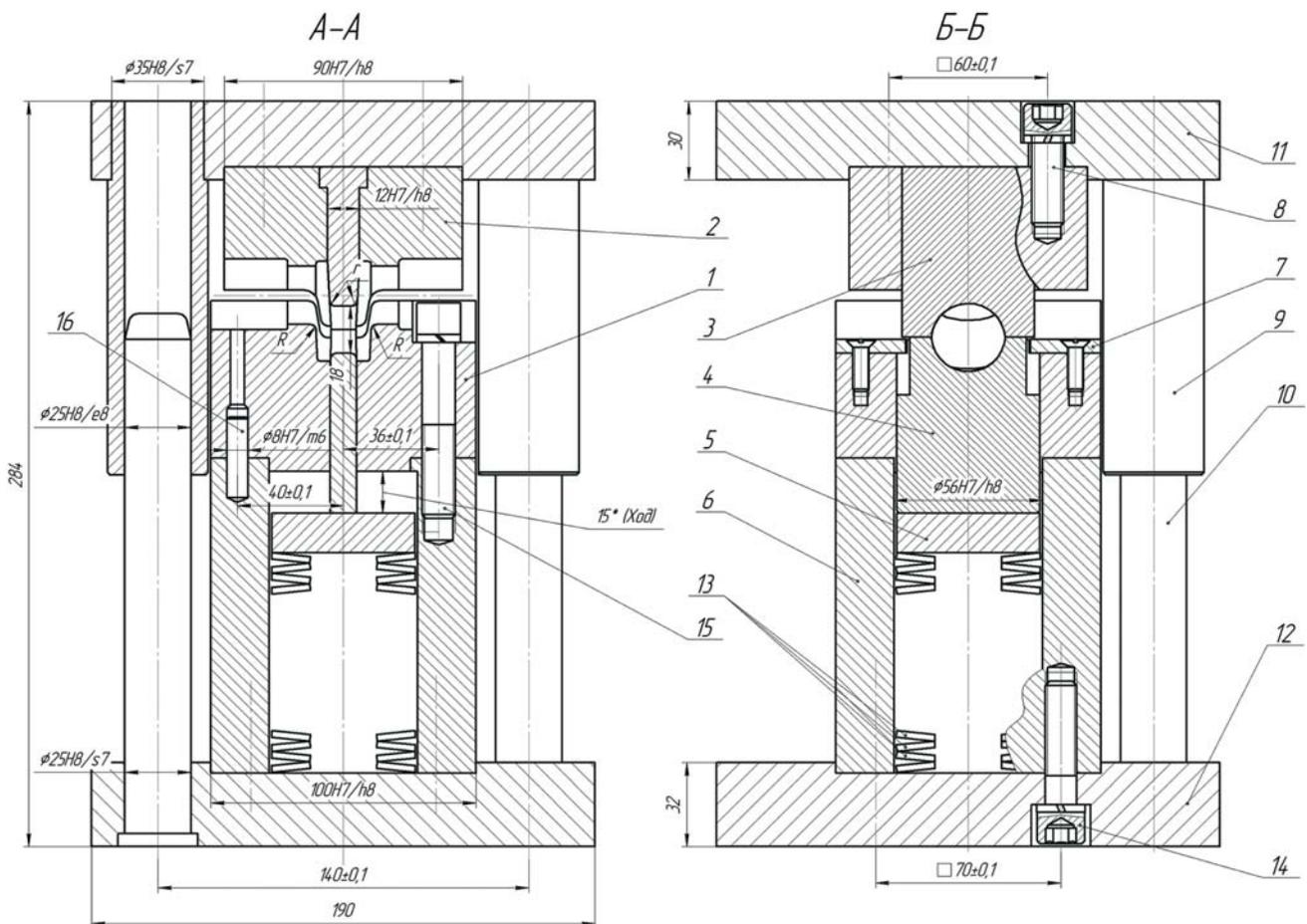


Рис. 1. Чертеж штампа для гибки

тунные шейки вала при формообразовании. Зажимные элементы выполнены разъемными с кольцевым замыканием и установлены на упругих силовых опорах, что обеспечивает отсутствие течения металла в облой в местах шеек.

Реализация данной схемы возможна при осуществлении штамповки многоколенного коленчатого вала с шатунными шейками, расположенными в одной плоскости. При необходимости после штамповки производят выкрутку колен вала в соответствии с требуемым чертежом детали.

Для проведения исследований автором был выбран разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана и на Воронежском заводе тяжелых механических прессов экспериментальный штамп для проведения гибки одного колена кривошипного вала [2]. Чертеж штампа приведен на рис. 1.

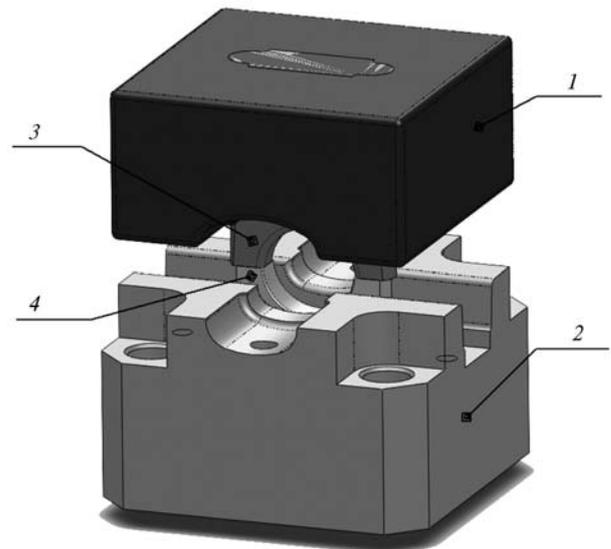
Штамп состоит из верхней 11 и нижней 12 плит, верхней 2 и нижней 1 полуматриц, установленных в них верхней 3 и нижней 4 зажимных вставок, обоймы 6, которая удерживает пакет силовых тарельчатых пружин 13, направляющих колонок 10 и втулок 9 для предотвращения выхода нижней зажимной вставки из нижней полуматрицы предусмотрены упоры 7. Общий вид штампа для гибки представлен на рис. 2.

Заготовку, представляющую собой цилиндрический образец с предварительно накатанной шейкой, устанавливают в штамп, центрируя по ее зажимным вставкам 3, 4. На ходе приближения осуществляют силовое замыкание шейки заготовки зажимными вставками 3, 4 с помощью пакета тарельчатых пружин 13, действующих на нижнюю зажимную вставку 4 через прокладку 5. Тем самым ограничивают те-

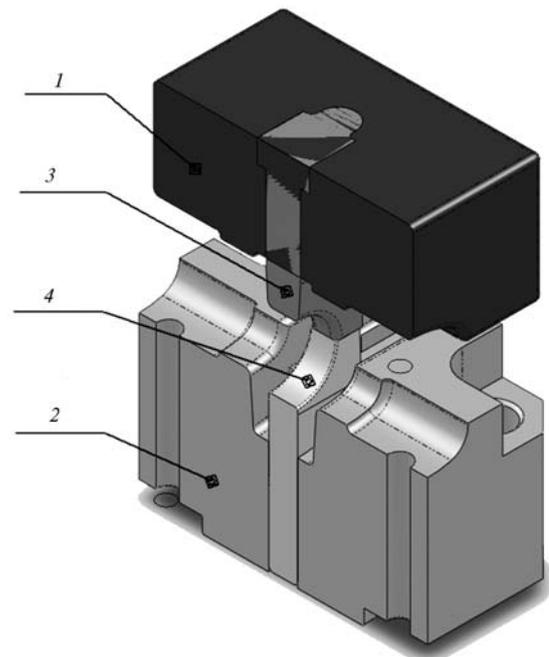


Рис. 2. Экспериментальный штамп для гибки

чение металла заготовки в радиальном направлении в процессе деформации. Пакет силовых тарельчатых пружин рассчитан таким образом, чтобы создаваемой ими силы хватило для деформирования шейки заготовки и препятствия дальнейшего раскрытия зажимных вставок в процессе гибки. После замыкания вставок



а



б

Рис. 3. Твердотельные модели инструмента:

а — общий вид; б — разрез; 1, 2 — верхняя и нижняя полуматрицы; 3, 4 — верхняя и нижняя зажимные вставки

происходит гибка заготовки на радиусах R нижней полуматрицы 2 и r верхней зажимной вставки 3 путем перемещения верхней части штампа на величину хода (эксцентриситет кривошипа коленвала) деформирования.

Для выявления распределения волокон макроструктуры в поковках проводили компьютерное моделирование гибки с использованием программного комплекса QForm3D v.5.1 — программы для моделирования, анализа и проектирования трехмерных процессов объемного формоизменения [3], которая основана на конечно-элементном алгоритме (ядре системы). Задача расчета пластического формоизменения в системе QForm3D v.5.1 решается на основе теории течения. При этом в качестве узловых неизвестных используют скорости узлов конечных элементов.

Для проведения расчетов достаточно задать конфигурацию штампов и начальную форму заготовки, выбрать из базы данных материал заготовки, оборудование и смазку. Твердотельные модели инструмента показаны на рис. 3.

Твердотельные геометрические модели инструментов и заготовки разработаны в программном комплексе SolidWorks.

Свойства материала задают в виде реологической зависимости сопротивления пластической деформации от деформации, скорости деформации и температуры.

Программа генерирует сетку элементов с учетом особенностей геометрии. Сетка элементов автоматически перестраивается на каждом шаге решения. Для анализа распределения волокон по конфигурации поковки использовали горизонтальные линии Лагранжа, которые отражают волокнистое строение поковки и «деформируются» одновременно с поковкой.

В ходе компьютерного моделирования необходимо было решить три задачи:

1) разработать математическую модель процесса гибки для последующей штамповки поволоков коленчатых валов с направленным волокнистым строением;

2) исследовать распределение волокнистого строения металла поковки после гибки в зависимости от технологических параметров процесса, геометрии инструмента и заготовки;

3) сравнить результаты компьютерного моделирования с результатами физического моделирования и обосновать принятые допущения.

Из-за наличия в конструкции штампа силовых зажимных элементов, обеспечивающих замыкание шейки коленчатого вала, были приняты следующие допущения:

- моделирование проводилось в две операции: 1) замыкание шейки вала верхней и нижней вставками (см. рис. 3, поз. 3 и 4) для получения овального сечения шейки для дальнейшей укладки в ручей окончательной штамповки, нижняя неподвижна, верхняя движется с рабочей скоростью; 2) процесс гибки при неподвижно замкнутых вставках, посредством верхней 1 и нижней 2 матриц;

- остывание заготовки при переходе ко второй операции не учитывалось.

Результатом компьютерного моделирования считали полные картины заполнения гравюры штампа и распределения волокнистого строения в поковках.

Исходными данными для моделирования являлись:

- трехмерная геометрия инструмента (см. рис. 3) и заготовки;

- оборудование: гидравлический пресс, $V_{\text{деф}} = 50$ мм/мин;

- максимальная сила 0,5 МН, номинальная сила 0,4 МН;

- объемная (3D) деформация;

- материал заготовки — сталь 45, ГОСТ 1050—88;

- условия трения — отсутствие смазки,

- смазочный материал no-st-h, фактор трения 0,4;

- начальная температура заготовки и инструмента 1200 °С.

Свойства материала задавали в табличном виде, используя кривые деформационного упрочнения материала заготовки для трех различных значений скоростей деформации: 0,05, 7,5 и 150 с⁻¹ при температурах 900, 1000, 1100, 1200 °С [4].

Используя теорию планирования эксперимента [5], были проведены 16 опытов, при которых варьировались технологические параметры процесса, приведенные в таблице.

Таблица

Варьируемые факторы

<i>i</i>	Фактор	Значение
1	Радиус гибки на матрице <i>R</i> , мм	0,5
		1
		2
2	Радиус гибки на зажимных вставках <i>r</i> , мм	0,5
		1
		2
3	Диаметр шатунной шейки вала <i>d</i> , мм	14
		18
		23
		28
4	Ход деформирования при гибке <i>h</i> , мм	5
		10
		15

Для расширения применимости результатов исследования значения исходных данных переведены в относительные, безразмерные величины. Для этого все факторы поделены на основной диаметр заготовки ($D = 28$ мм). Схема процесса гибки показана на рис. 4.

Результаты моделирования опыта № 3 при значениях технологических параметров $R/D = 0,071$, $r/D = 0,018$, $d/D = 1$, $h/D = 0,536$ приведены на рис. 5. На заготовке в начальном положении и поковке после гибки показана сетка конечных элементов, рис. 5, *а* показано распределение линий Лагранжа в поковке, со-

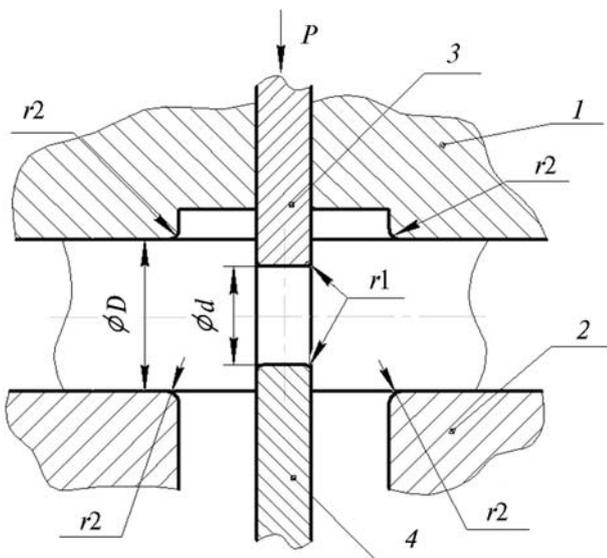


Рис. 4. Схема процесса гибки

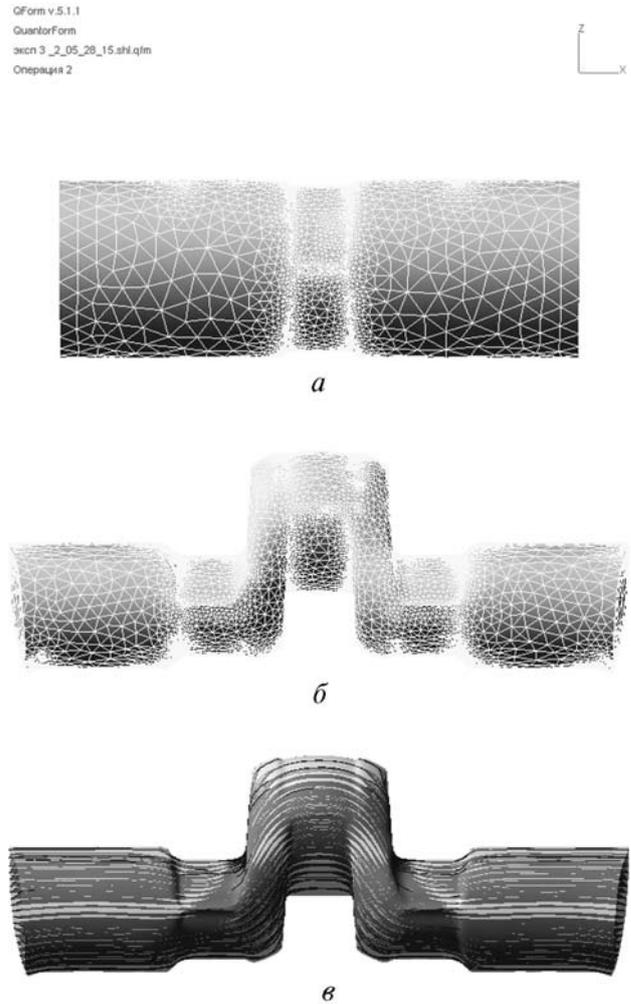


Рис. 5. Моделирование процесса гибки, опыт № 3: *а* — заготовка в начальном положении; *б* — заготовка после гибки; *в* — волокнистое строение в поковке

ответствующее распределению макроволокон в металле.

Программа моделирования в процессе работы на каждом шаге расчета перестраивает сетку конечных элементов автоматически. Размер конечных элементов выбирается исходя из сложности гравюры инструмента. В процессе расчета возможно появление таких мест в моделируемой поковке где возникают штамповочные дефекты типа зажим, складка. В этих местах при переразбиении сетки конечных элементов происходит модификация сетки — слияние различных близко расположенных элементов. В нашем случае, предположительно, это свидетельствует о наличии смятия или среза в месте соединения шейки и шек.

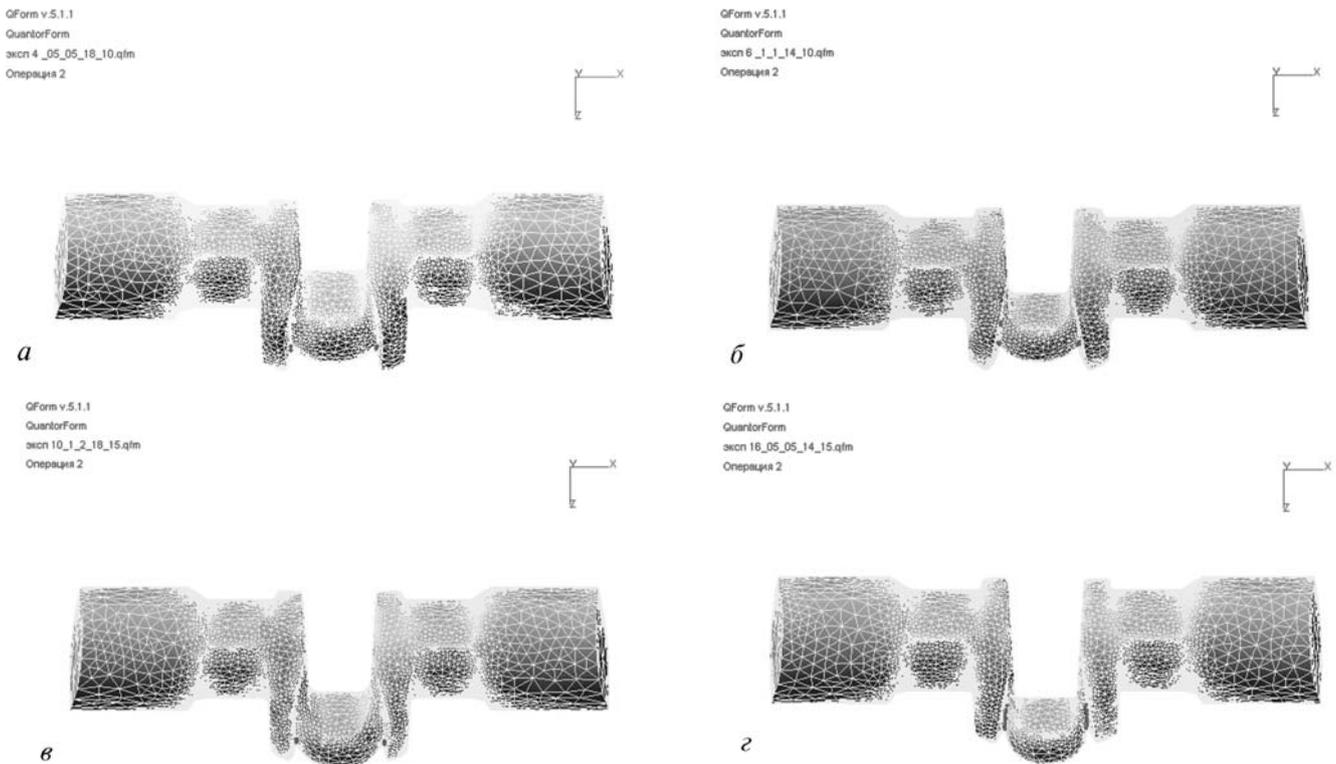


Рис. 6. Результаты моделирования:

a — опыт № 4: $R = 0,5$ мм, $r = 0,5$ мм, $d = 18$ мм, $h = 10$; *б* — опыт № 6: $R = 1,0$ мм, $r = 1,0$ мм, $d = 14$ мм, $h = 5$; *в* — опыт № 10: $R = 1,0$ мм, $r = 2,0$ мм, $d = 18$ мм, $h = 15$; *г* — опыт № 16: $R = 0,5$ мм, $r = 0,5$ мм, $d = 14$ мм, $h = 15$

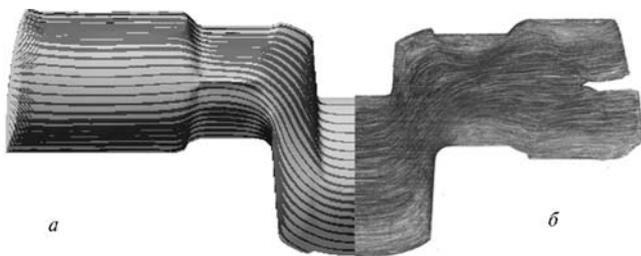


Рис. 7. Опыт № 3:

a — результат моделирования; *б* — макрошлиф;
 $R/D = 0,071$; $r/D = 0,018$; $d/D = 1$; $h/D = 0,536$

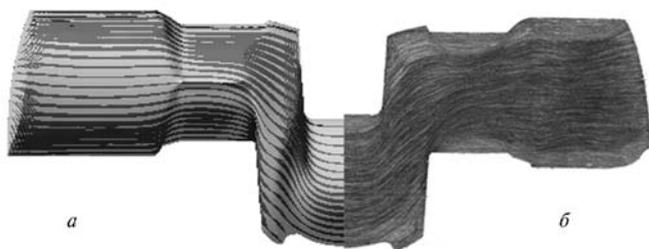


Рис. 8. Опыт № 5:

a — результат моделирования; *б* — макрошлиф;
 $R/D = 0,018$; $r/D = 0,036$; $d/D = 0,821$; $h/D = 0,536$

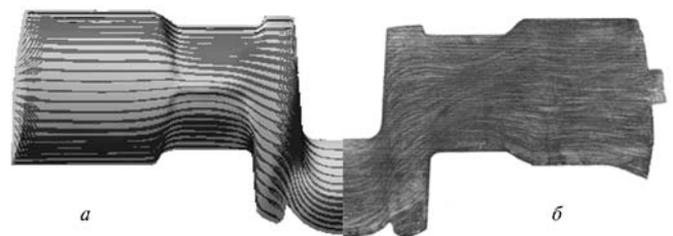


Рис. 9. Опыт № 10:

a — результат моделирования; *б* — макрошлиф;
 $R/D = 0,036$; $r/D = 0,071$; $d/D = 0,643$; $h/D = 0,536$

По результатам моделирования процесса гибки можно выделить опыты № 4, 6, 10 и 16 (рис. 6). В данных опытах присутствуют описанные выше дефекты, при окончательной штамповке произойдет внедрение этих дефектов в тело поковки и как следствие выход из строя детали в процессе эксплуатации.

Для сравнения результатов моделирования и физических экспериментов взяли опыты № 3, 5, 10, 16.

Для выявления макроструктуры в поковках после гибки использовали заготовки из алюми-

ния марки АД0 с последующим травлением продольного сечения образца.

Во время проведения опыта № 16 образец разрушился, произошел срез шейки, макрошлиф не изготавливался. Сопоставление результатов представлено на рис. 7—9, на которых изображены половинки фотографий шлифов (справа) и половинки изображений моделирования (слева) в одном масштабе.

Сравнив распределения линий Лагранжа в поковках при моделировании гибки и макрошлифов образцов алюминиевых поковок, можно установить однообразность макроструктуры в поковке при моделировании и физическом эксперименте.

Выводы

Установлена адекватность физического эксперимента и компьютерного моделирования. В дальнейшем моделирование можно использовать для прогнозирования распределения макроструктуры в поковках, получаемых аналогичными техпроцессами.

Установлено что, значения угла наклона волокон макроструктуры относительно образующей поверхности шейки вала в поковках, получаемых гибкой с предварительно определенными, допускаемыми технологическими

параметрами процесса (относительный радиус гибки, относительный радиус кривошипа вала, относительный диаметр шейки вала), укладываются в интервале углов от 0 до 10 градусов. Полученные численные значения угла выхода волокон на контактную поверхность находятся в допустимых пределах.

Литература

1. Штамповка поковок с направленным волокнистым строением / О.А. Банных, В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов и др. // Вестник машиностроения. 2000. № 10. 200 с.
2. Патент на изобретение № 2241567 «Штамп для горячей штамповки коленчатого вала», Е.И. Семенов, А.Т. Крук, В.И. Соков, Ю.А. Дибнер, В.Я. Мороз. 2004.
3. QForm 2D/3D: Руководство пользователя. Версия 5.1. ООО КванторФорм. М., 2010. 65 с.
4. Соппротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
5. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М. София: Машиностроение. Техника, 1980. 304 с.

Статья поступила в редакцию 01.09.2011 г.