

УДК 621.98:621.822

Господчикова А. Б.  
Власов А. В.**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ  
СВЕРТНЫХ РАДИАЛЬНО-УПОРНЫХ МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВЫХ  
ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ**

Металлофторопластовые подшипники скольжения обладают высокими антифрикционными свойствами (коэффициент трения 0,03–0,05), а также применимы в широком диапазоне температур (от –200 °С до 300 °С) и нагрузок в условиях сухого трения и в средах, не обладающих смазочными свойствами (в т. ч. в агрессивных средах и в вакууме) [1].

Наибольшее распространение получили «свертные» подшипники, исходной заготовкой для которых является лист с фторопластовым покрытием.

Е. И. Разуваев и М. Д. Кузьмичев изготавливали металлофторопластовые втулки с наружным антифрикционным слоем путём деформирования полой заготовки посредством раздачи изнутри металлической основы втулки в штампе. При этом происходило уплотнение слоя бронзовых гранул покрытия и дополнительное вдавливание фторопласта в поры между гранулами, что приводило к повышению несущей способности и износостойкости втулок подшипников [2].

Известен также способ изготовления вкладыша опорного подшипника скольжения из стальной ленты с металлофторопластовым антифрикционным покрытием, заключающийся в предварительном изгибе заготовки вкладыша и окончательном упругопластическом изгибе на оправке с регулярным микрорельефом на её рабочей поверхности упругодеформирующимся пуансоном. Износ поверхности при этом происходил медленно, слабо влияя на изменение глубины впадин [3].

Приведённые выше публикации были нацелены на улучшение трибологических характеристик металлофторопластовых подшипников.

Данная работа, в отличие от других публикаций на схожие темы, даёт представление о решении технологических проблем изготовления втулки, имеющей внутренний антифрикционный слой, с фланцем, который получают методом радиального выдавливания.

Цель исследования состояла в определении причин утолщения заготовки и разрушений штампа, возникающих при изготовлении втулок, и в устранении этих проблем.

Научная новизна работы состоит в разработке модели взаимодействия деформированной заготовки с упругим составным инструментом, выявлении с ее помощью механизма образования фланца и появления разнотолщинности заготовки в процессе радиального выдавливания, новой форме исходной заготовки, позволившей снизить технологическую силу.

На первом этапе исследования анализировали напряжённо-деформированное состояние штампа при радиальном выдавливании втулки с фланцем. Результаты моделирования выявили наиболее нагруженную область штампа, что подтверждается разрушением штампа на практике. Причиной разрушения штампа является большая сила деформирования, приводящая к радиальному распору в его нижней части, что не было учтено в существующей конструкции.

На втором этапе исследования анализировали механизм формирования фланца при радиальном выдавливании трубчатой фасонной заготовки, без учёта антифрикционного металлофторопластового покрытия.

На основании анализа исследований второго этапа была предложена новая геометрия исходной плоской заготовки, проведен анализ напряженно-деформированного состояния заготовки при штамповке по базовой и предлагаемой технологиям.

Наибольшее распространение получили «свертные» подшипники, исходной заготовкой для которых является лист с фторопластовым покрытием. Технологический процесс предусматривает предварительную холодную гибку (свертку) листовой заготовки

с V-образными пазами в трубчатую заготовку с последующей формовкой фланца методом радиального выдавливания (рис. 1, 2). Пазы в листовой заготовке вырубают для уменьшения растягивающих напряжений во фланце.

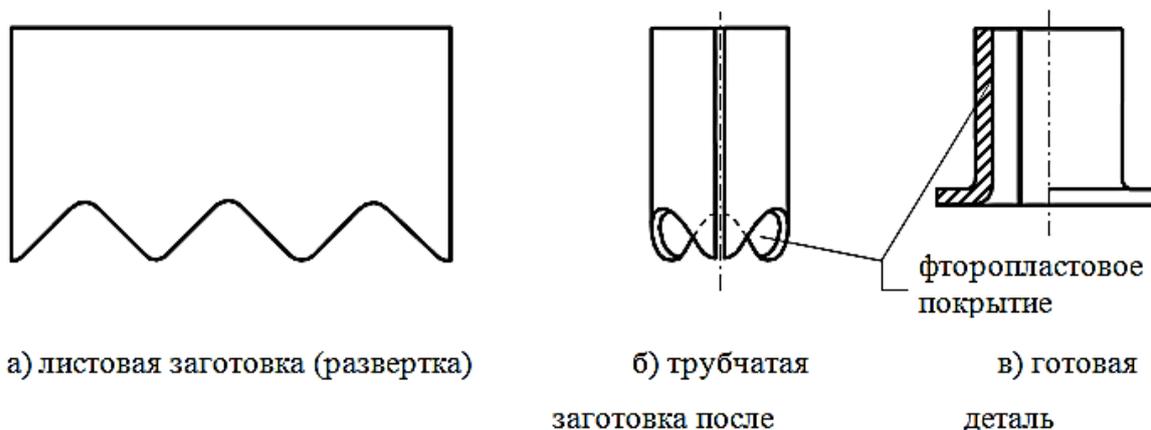


Рис. 1. Изменение формы заготовки в процессе изготовления свертных металлофторопластовых подшипников

Основные проблемы при изготовлении свертных подшипников больших диаметров (от 60 до 120 мм) указанным способом заключаются в появлении разнотолщинности цилиндрической части, резком увеличении требуемой технологической силы, повреждении фторопластового слоя.

Ресурс таких втулок весьма ограничен. Опыт применения таких втулок в шасси самолётов был весьма неудовлетворительным: ремонтным бригадам приходилось менять их в условиях аэродромов, заменять целиком шасси и отправлять их на досрочный ремонт [4].

Расчёт размеров пазов производят по методике [5].

Процесс формовки на начальном этапе близок к гибке и только после упора лепестков в бурт матрицы начинается радиальное выдавливание. Разрушение штампа происходит в виде отрыва этого бурта матрицы, а иногда в образовании трещин в матрице и пуансоне.

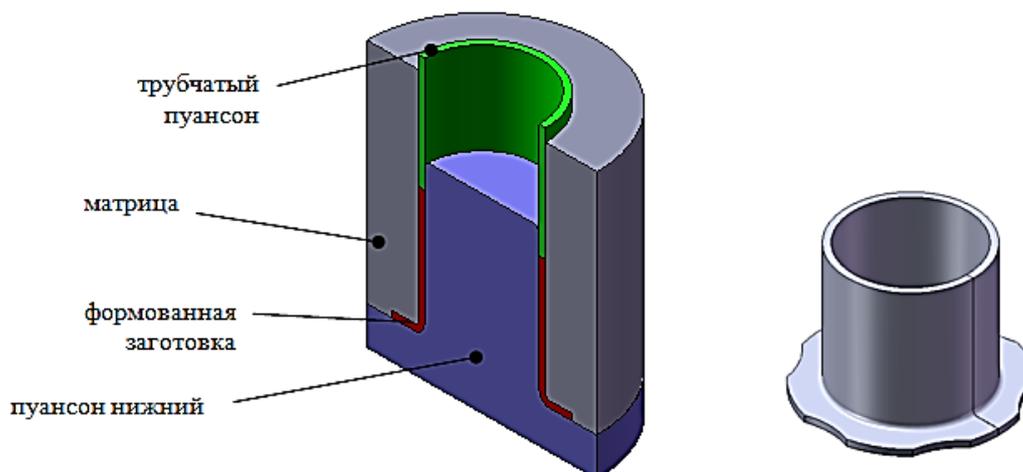


Рис. 2. Схема штампа для формовки фланца радиальным выдавливанием и внешний вид заготовки после формовки

Внешняя поверхность фланца после формовки имеет волнистую форму, количество волн совпадает с количеством лепестков. Цилиндрическую форму фланца в дальнейшем получают механической обработкой.

Исследование напряжённо-деформированного состояния штампа в процессе радиального выдавливания втулки выполняли путем математического моделирования в программном комплексе QForm 7.

Исследование влияния формы заготовки на энергосиловые и кинематические параметры процесса выполняли путем математического моделирования в программном комплексе Deform [6].

Моделирование процесса формовки фланца и расчёт напряженно-деформированного состояния инструмента

Новая версия программного комплекса QForm 7 («Кванторформ», Россия) позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние инструмента под действием реальных нагрузок, возникающих в процессе штамповки с учетом существующих зазоров и посадок. Возможны два варианта постановки задачи. Наиболее простой – нагрузки, полученные в результате моделирования штамповки заготовки абсолютно жестким инструментом, являются исходными данными для расчета составного инструмента. Более сложный подход – совместный расчет заготовки вместе с деформирующимся инструментом. На данном этапе исследования нами использовалась наиболее простая постановка задачи.

Для сокращения времени расчета деформирования заготовки использовали свойства симметрии – моделировали формовку одного лепестка с заданием условий радиальной симметрии по боковым плоскостям. Материал заготовки – сталь С10 по европейским нормам, антифрикционный слой не учитывался. Трение по всем поверхностям отсутствовало.

В конечный момент деформирования заготовки выполнили моделирование инструмента. В результате моделирования выявлено, что радиальные перемещения наружной матрицы увеличиваются от верхнего края заготовки к нижней части, образуя коническую поверхность. Максимальные радиальные перемещения появляются в радиусной части и в бурте матрицы (рис. 3).

Эти результаты качественно соответствуют деформированной форме готовой детали, у которой максимальное утолщение возникает вблизи фланца.

Анализ напряженного состояния показал, что максимальные эквивалентные напряжения, превышающие предел текучести материала инструмента, возникают в буртике матрицы (рис. 4). Концентрация напряжений в буртике матрицы и является причиной отрыва буртика, наблюдающегося на практике (рис. 5).

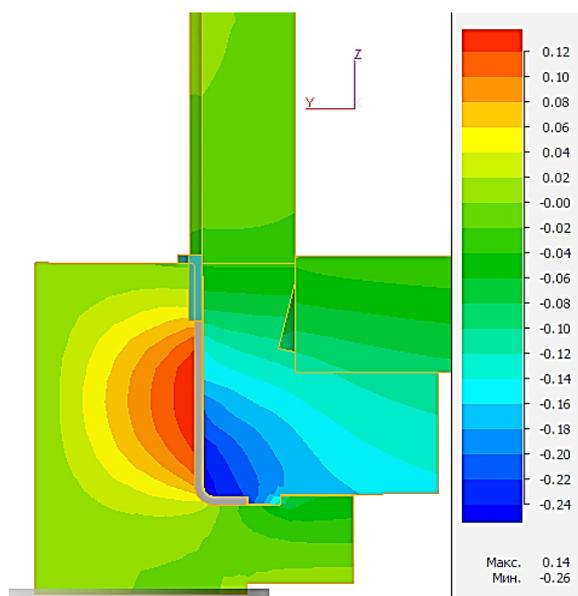


Рис. 3. Радиальные перемещения в инструменте, мм

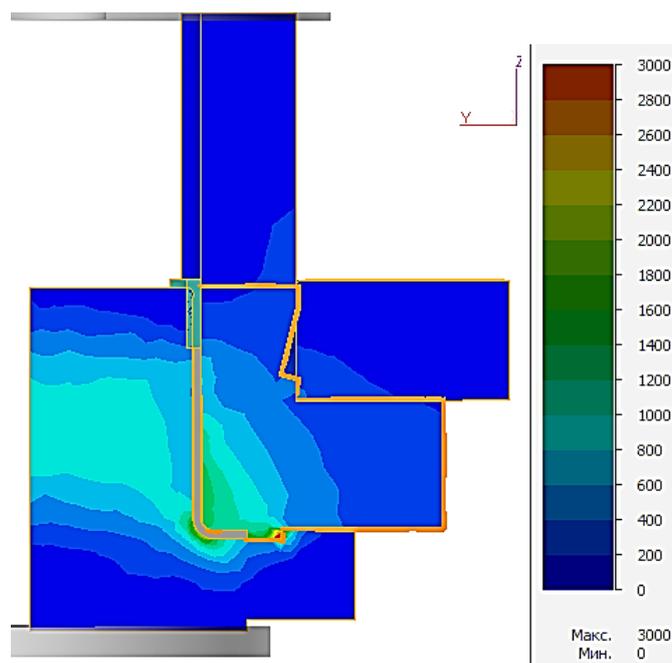


Рис. 4. Эквивалентные напряжения в штампе



Рис. 5. Разрушение матрицы

Исследования напряженно-деформированного состояния инструмента позволили сделать вывод, что основной причиной проблем при изготовлении втулок больших диаметров (разнотолщинность детали и разрушение штампа) является большая сила деформирования, на которую не были рассчитаны рабочие детали штампа. Для повышения качества детали необходимо уменьшать силу деформирования.

Моделирование процесса формовки фланца

Было сделано предположение, что форма лепестков существенным образом сказывается на силе деформирования и накопленных деформациях во фланце, тем самым влияя на качество готовой детали.

На втором этапе исследования анализировали механизм формирования фланца при радиальном выдавливании трубчатой фасонной заготовки без антифрикционного металлофторопластового покрытия. Моделировали процесс формовки втулки с внутренним диаметром 95 мм. Для сокращения времени расчета использовали свойства симметрии – моделировали формовку одного лепестка с заданием условий радиальной симметрии по боковым плоскостям. Материал – сталь 10кп (AISI1010). Фактор трения по всем поверхностям ( $m = 0,12$ ) соответствует холодной штамповке.

В результате моделирования был установлен следующий механизм формирования фланца:

– на первом этапе под действием деформирующей силы лепесток скользит по радиусам и горизонтальной рабочей поверхности инструмента до момента контакта с буртом матрицы. Движение материальных точек происходит в меридиональных плоскостях, проходящих через ось симметрии (рис. 6, 7). Сила деформирования на этом этапе плавно возрастает (рис. 11);

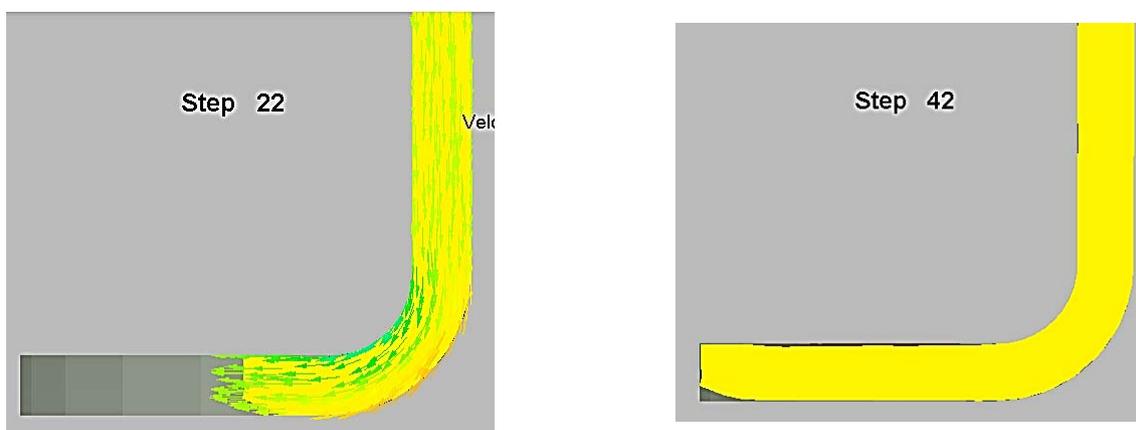


Рис. 6. Меридиональное сечение заготовки через вершину выступа на первом этапе формирования фланца (стрелками указаны скорости материальных точек)

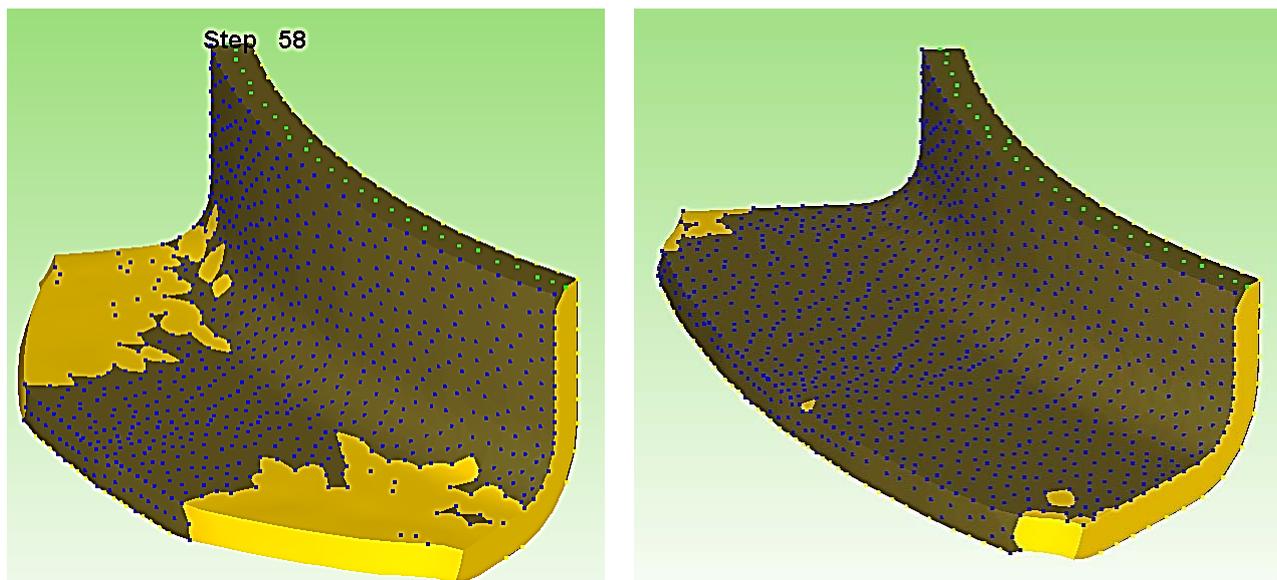


Рис. 7. Поверхности контакта заготовки с инструментом в процессе формирования фланца

– достигнув бурта матрицы, лепесток начинает утолщаться в горизонтальной плоскости. Сила деформирования начинает резко возрастать. Материальные точки, лежащие близко к меридиональной плоскости, проходящей через начальную точку контакта металла с буртом матрицы, получают окружную составляющую скорости, а материальные точки, лежащие вблизи впадины, продолжают двигаться преимущественно в меридиональных плоскостях.

– области отформованной заготовки, соответствующие впадинам в плоской заготовке не достигают бурта матрицы. Выступающие части фланца уходят в отход при последующей механической обработке.

Вид фланца заготовки в конце моделирования соответствует виду фланца заготовки, полученной на практике (рис. 8).



Рис. 8. Фланец заготовки, полученный в результате моделирования и натурального эксперимента

Деформированное состояние заготовки является неоднородным – наибольшим деформациям подвергаются материальные частицы, расположенные в меридиональной плоскости, проходящей через вершины фасонной заготовки. Для снижения неоднородности деформированного состояния предложено изменить форму фасонной заготовки, сделав небольшие впадины вблизи выступов (рис. 9).

Для получения W-образного лепестка из V-образного следует удалить заштрихованную область и, тем самым, создается дополнительная малая впадина (рис. 9). Преобразование происходит таким образом, что  $AC = CB$ ,  $AD = DC = DE$ ,  $AE = EF$ .

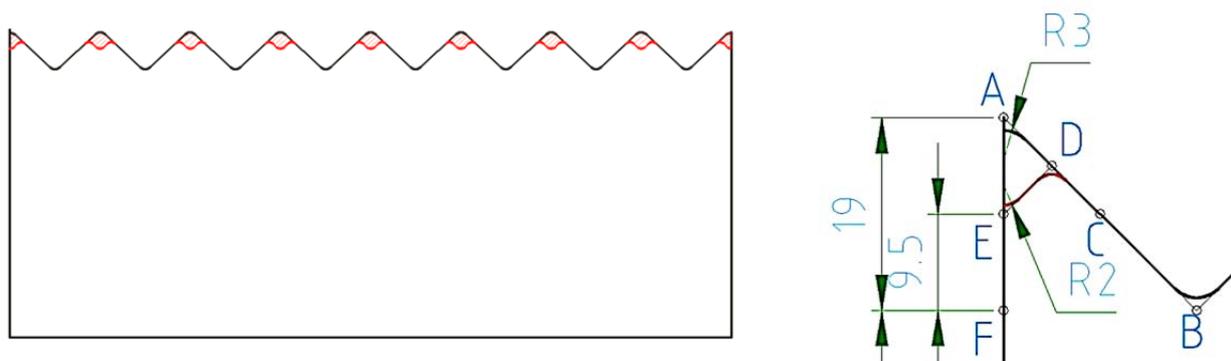


Рис. 9. Измененная форма заготовки и геометрическое построение измененного лепестка

Было произведено сравнение результатов моделирования пластического течения заготовки втулки внутренним диаметром 95 мм при использовании базовой и предложенной геометрии лепестка с одинаковыми допущениями и параметрами моделирования.

Для выяснения момента достижения фланцем требуемого диаметра было произведено координатное отслеживание крайней точки впадин P1 (рис. 10). График на рис. 11 свидетельствует, что заготовка с V-образным лепестком достигает одинаковых значений радиуса фланца при большем перемещении пуансона, чем заготовка с W-образным лепестком.

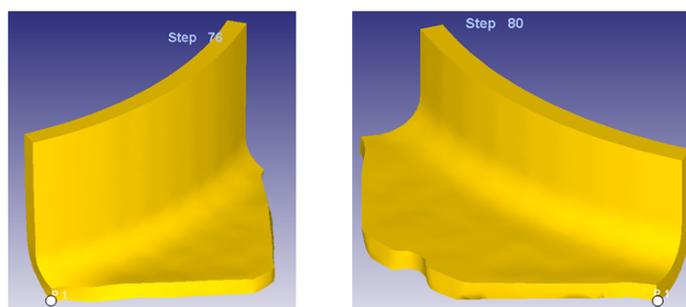


Рис. 10. Отслеживаемая точка, определяющая диаметр фланца после механической обработки при деформировании V- и W-образных заготовок

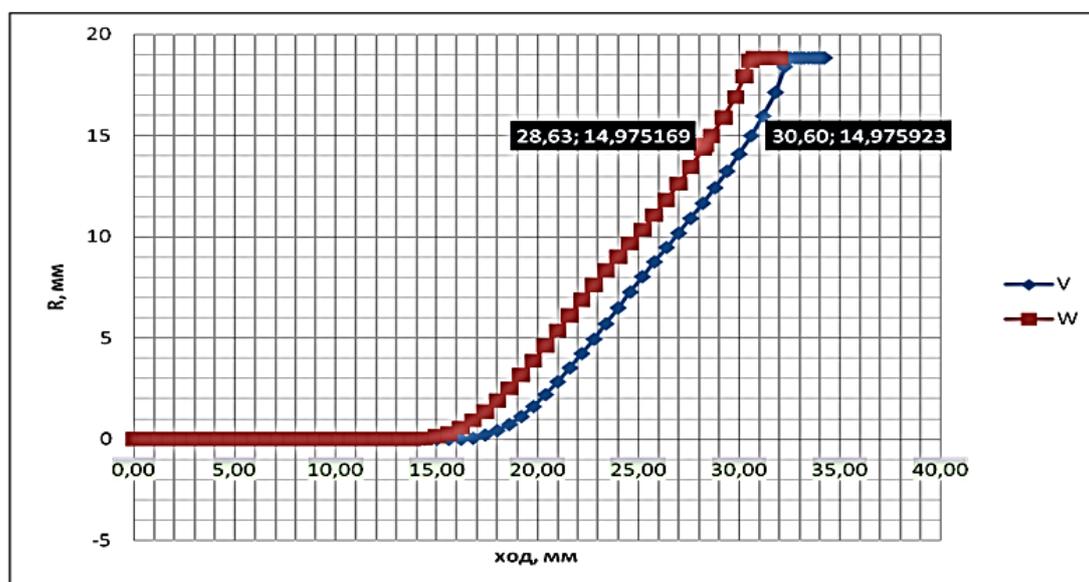


Рис. 11. Радиальное перемещение отслеживаемых точек в процессе моделирования

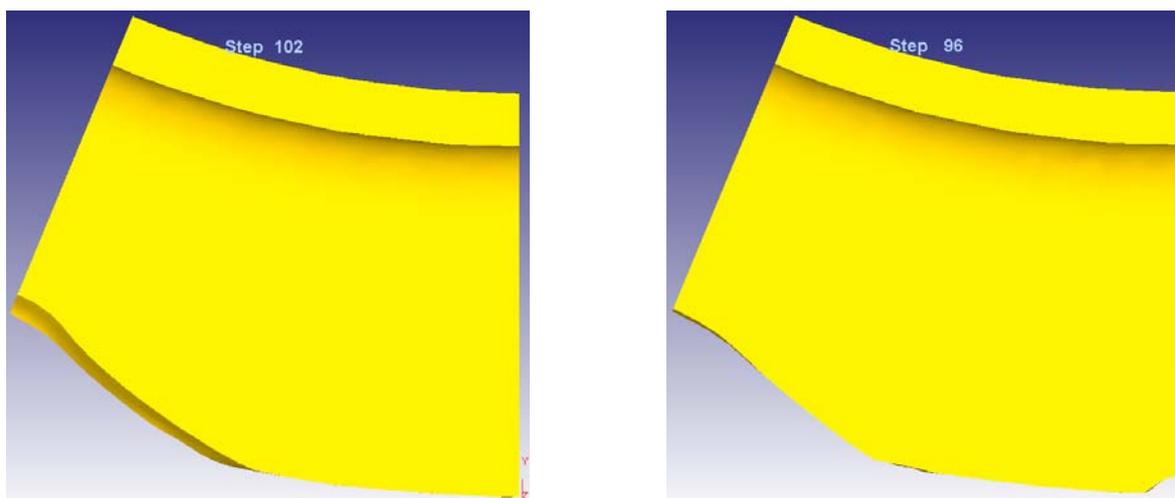


Рис. 12. Вид фланца при достижении минимально необходимого диаметра впадин для разных заготовок

Сравнение графиков сил деформирования по ходу пуансона (рис. 13) показывает, что для W-образной заготовки достижение минимально необходимого диаметра впадин происходит при силе на 7 % меньшей, чем для исходной V образной заготовки. Снижение силы деформирования обеспечивается за счет облегчения течения металла в области малой впадины. Изменилась картина течения металл – в области малой впадины появилась дополнительная зона преимущественно радиального течения (рис. 14)

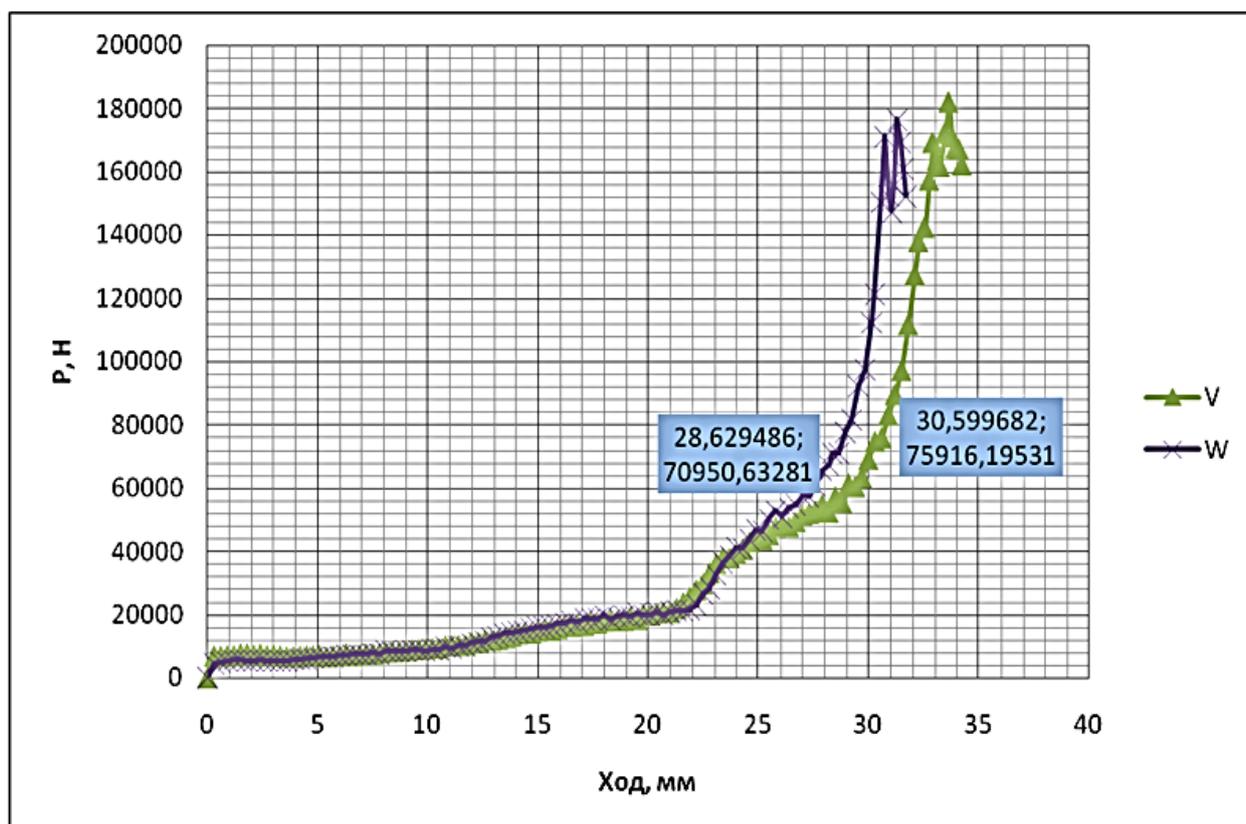


Рис. 13. Сравнение сил деформирования при формировании фланца из различных заготовок

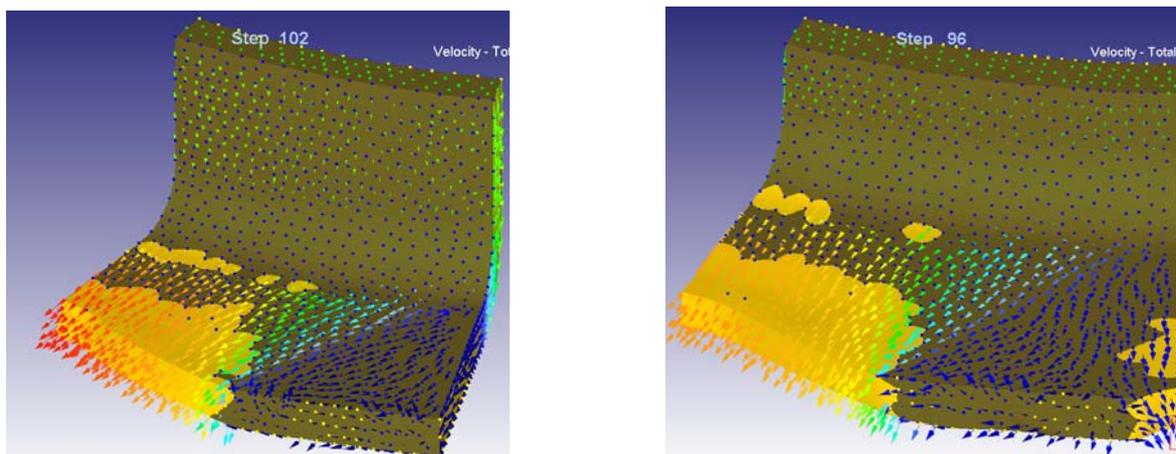


Рис. 14. Зоны контакта и направление скоростей течения материальных частиц в момент достижения минимально необходимого диаметра впадин для различных заготовок

Применение W-образной формы лепестка позволило уменьшить неоднородность деформированного состояния во фланце заготовки по сравнению с базовым вариантом. Об этом свидетельствует картина распределения накопленных деформаций для обоих случаев (рис. 15).

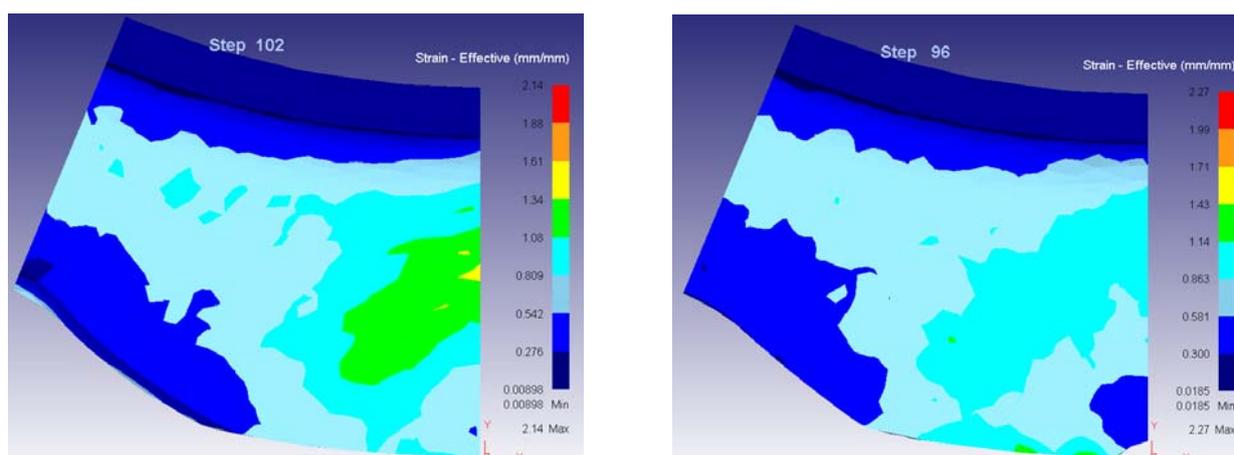


Рис. 15. Сравнение накопленных деформаций во фланце для разных заготовок

Качественное сравнение вероятности нарушения покрытия во фланце можно выполнить с использованием критерия разрушения Кокрофта-Лэзема, который рассчитывается по формуле (1):

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\bar{\varepsilon}$  – накопленная пластическая деформация;  
 $d\bar{\varepsilon}$  – приращение накопленной деформации;  
 $\sigma^*$  – максимальное главное растягивающее напряжение;  
 $\bar{\sigma}$  – интенсивность напряжений.

Чем больше поврежденность материала, тем большая вероятность появления нарушения покрытия. Анализ распределения поврежденности по Кокрофту-Лэзему (рис. 16) показывает, что для предлагаемой геометрии заготовки накопление повреждений во фланце уменьшается.

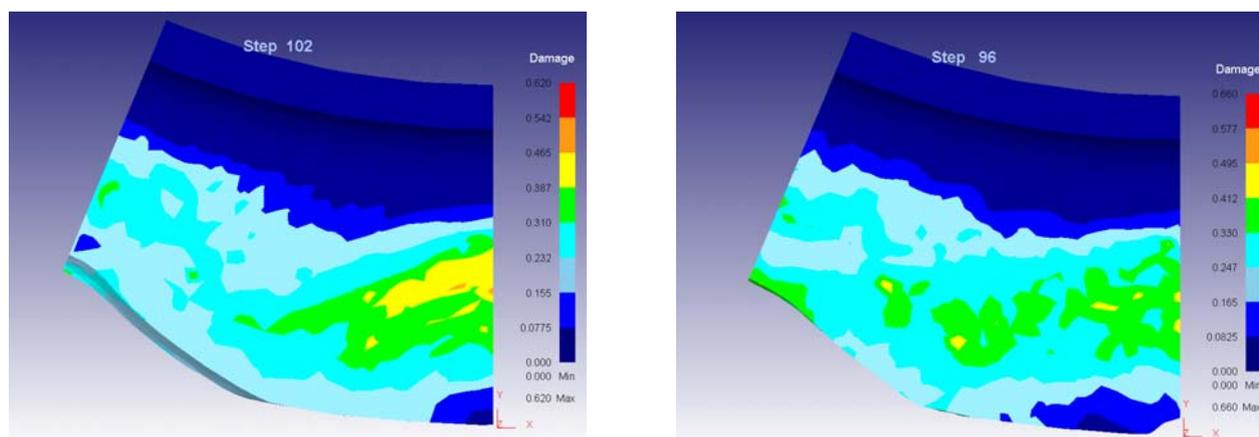


Рис. 16. Распределение критерия разрушения Кокрофта-Лэзема во фланце

## ВЫВОДЫ

Причиной проблем при изготовлении втулок больших диаметров является большая сила деформирования, на которую не были рассчитаны рабочие детали штампа. Для повышения качества детали необходимо уменьшать силу деформирования.

При образовании фланца втулки в базовой технологии деформированное состояние заготовки является неоднородным – наибольшим деформациям подвергаются материальные частицы, расположенные в меридиональной плоскости, проходящей через вершины фасонной заготовки.

Применение W-образной формы выступов фасонной заготовки снижает силу деформирования при формировании фланца свертного подшипника методом радиального выдавливания, уменьшает неравномерность деформированного состояния и, следовательно, позволит улучшить качество детали.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семёнов А. П. *Металлофторопластовые подшипники* / А. П. Семёнов, Ю. Э. Савинский. – М. : Машиностроение, 1978. – 192 с.
2. А. с. № 622548 СССР, В 21 D 53/10, В 21 K 21/00, В 29 D 31/02. *Способ изготовления втулок подшипников скольжения* / Е. И. Разуваев, М. Д. Кузьмичев (СССР). – № 1911198 ; заявл. 27.04.1973 ; опубл. 5.09.1978.
3. А. с. № 1739102 А1 СССР, F 16 C 33/04. *Способ изготовления вкладыша опорного подшипника скольжения из стальной ленты с металлопластмассовым антифрикционным слоем* / П. А. Воронцов, А. А. Кацура, Х. И. Муратов, А. П. Семенов (СССР). – № 4737246 ; заявл. 24.07.1989 ; опубл. 07.06.1992.
4. Титов В. В. *Экспериментальное определение потерь на трение на цилиндрической и торцевой поверхностях металлофторопластового подшипника скольжения* / В. В. Титов (ОАО «ОКБ Сухого»). – Москва : Вестник машиностроения, 2008 г. – Т. 9. – С. 23–25.
5. ТИЗ6-17-85. *Изготовление свертных втулок из металлофторопласта*. – 1985. – 36 с.
6. *Deform<sup>tm</sup> 3D. Version 6.1 User's Manual* Scientific Forming Technologies Corporation, 2008j. – 420 s.

Господчикова А. Б. – аспирант МГТУ им. Н. Э. Баумана;

Власов А. В. – д-р техн. наук, проф. МГТУ им. Н. Э. Баумана.

МГТУ им. Н. Э. Баумана – Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия.

E-mail: Greenwitch37@rambler.ru; anvvasov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 04.03.2013 г.