

Компьютерное моделирование процесса горячей объёмной штамповки поковки «ЗАГЛУШКА» и топологическая оптимизация штампа*

Петров М.А., Уржумов П.Н.

Московский политехнический университет

г. Москва, Российская Федерация

m.a.petrov@mospolytech.ru

Аннотация. В работе показан пример исследования процесса горячей объёмной штамповки (ГОШ) поковки «Заглушка» из титанового сплава и топологическая оптимизация штампового инструмента с применением метода конечных элементов, широко применяющегося на практике при разработке новых технологических процессов численным способом. Выявлены места образования дефектов в виде складок поковки. Снижена масса штампового инструмента на ~43% без потери его жёсткости и прочности при помощи алгоритма топологической оптимизации (ТО). На основании полученных результатов ТО по технологии 3D-печати FFF изготовлены полимерные прототипы верхней и нижней штамповых вставок. В процессе деформирования образца из модельного материала свинца установлено локальное изменение гравюры инструмента, без получения чёткого контура поковки, вызванное более высокой плотностью материала образца. При деформировании образца из более пластичного материала (нетехнического пластилина) были получены чёткие контуры поковки и установлено хорошее заполнение гравюры штампа.

Ключевые слова: горячая объёмная штамповка, складки, дефекты объёмной штамповки, МКЭ, топологическая оптимизация штампа, полимерный прототип, FFF/FDM

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование технологических процессов широко используется при разработке новых процессов, так как существенно сокращает прямые материальные расходы, позволяет создать точные условия, гарантирующие реализацию процесса и повышение его стойкости и воспроизводимости. Одновременно с этим требуется наличие программного обеспечения (ПО), специальных знаний и экспериментальной информации о физическом поведении объектов. Можно сказать, что требуется учитывать гораздо больше, чем экономический аспект, а именно время, которое затрачивается на разработку ПО и получение новой информации.

Накопленный большой практический опыт, связанный с изучением свойств материалов, а также широкое внедрение метода конечных элементов (МКЭ), позволяет успешно применять его для решения задач обработки материалов давлением (ОМД) [0-0]. К ним, например, относятся задачи горячей и холодной объёмной штамповки (ГОШ и ХОШ), листовой штамповки (ЛШ), импульсная

штамповка, инкрементальная штамповка и другие виды штамповки. В частности, при моделировании задач определяются технологические параметры (сила деформирования, начальная температура штамповки и т.д.), при которых отсутствует возникновение дефектов поковки, определяется очаг деформации и характер течения материала, влияющие на процесс формообразования (рис. 1, а). Некоторые этапы проектирования, связанные с определением надёжности конструкции, требуют длительного времени, например, определение усталостной прочности. Поэтому, для её надёжности на этапе проектирования повышают коэффициент запаса и конструкция получается громоздкой. Существуют методики по определению прочности конструкций при помощи визуализации силовых синий от действия активных нагрузок и пересчёта задачи с плоской на объёмную по известным уравнениям, связывающим напряжения и деформации материала конструкции. Этот подход может быть реализован также при помощи МКЭ, при этом происходит удаление материала из тех мест, в которых коэффициент запаса (КЗ) достаточно высок или соответствует установленному значению (рис. 1, б). Он относится к практической части раздела науки о топологической оптимизации (ТО). Применение ТО для оптимизации геометрии штампового инструмента рассмотрено в работах [0-0].

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Трёхмерная (3D) модель рассматриваемой поковки «Заглушка» представлена на рис. 2. Для КЭ-анализа процесса и ТО была применена геометрическая (CAD) модель двухпозиционного сплошного штампового блока, состоящего из верхней (пуансон) и нижней (матрица) штамповой вставок, представленного на рис. 2, а и 2, б, спроектированных по чертежу горячей поковки, а также цилиндрической заготовки ($\varnothing 20$ мм, $H=30$ мм), объём которой соответствует объёму поковки с облоем. Процесс моделирования состоял из двух задач. В первой задаче решался вопрос о наличии дефектов и течения материала (в ПО QForm 9), а во второй задаче проводилась ТО штампового инструмента (в ПО Altair solidThinking Inspire). Обе задачи являются связанными, так как входная характеристика по технологической силе штамповке, определённая в первой задаче, передавалась в качестве входной характеристики активной нагрузки во вторую задачу.

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

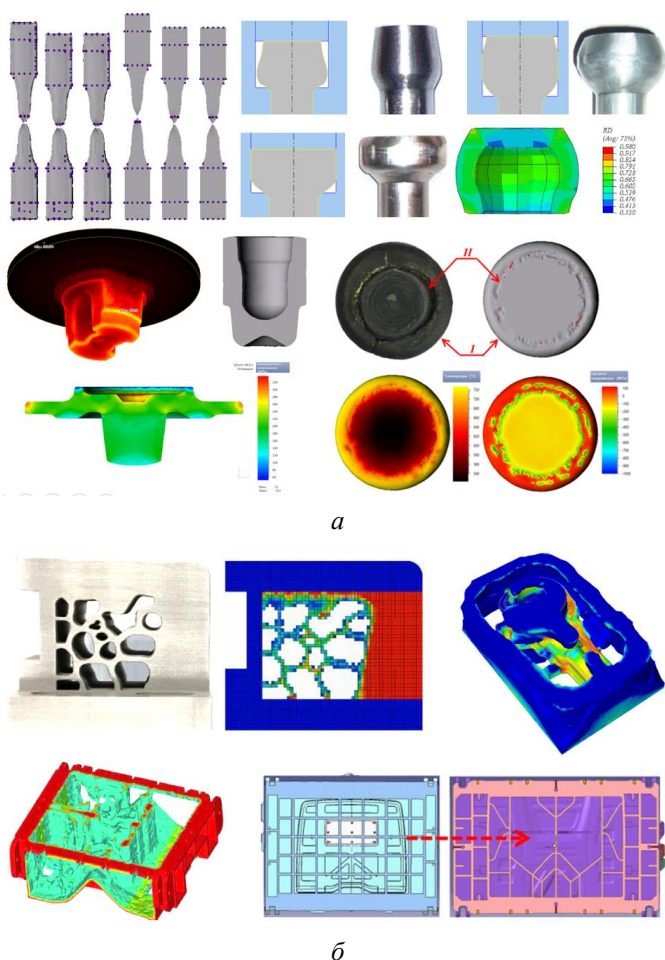


Рис. 1. Примеры КЭ-расчётов задач ОМД:
 а – технологические процессы ГОШ;
 б – прочность штамповой оснастки после ТО

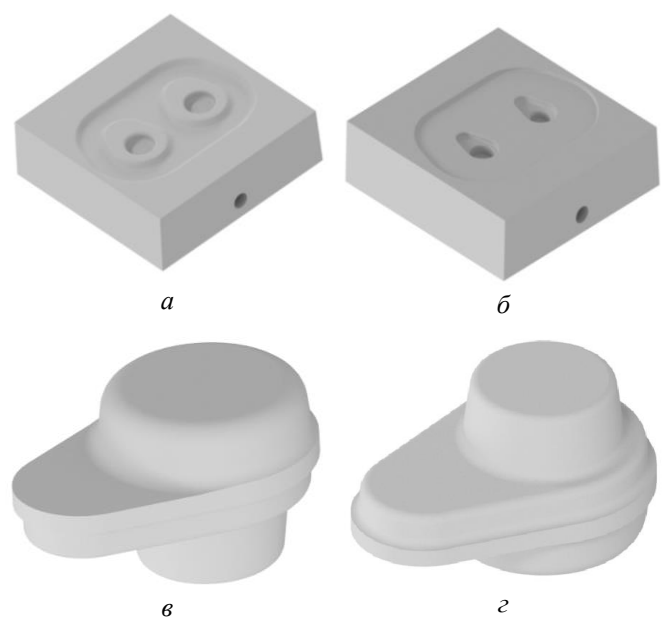


Рис. 2. 3D-модели верхней (а) и нижней (б) вставок для получения поковки «Заглушка» (показан результат второй операции, без облоя, изометрия сверху (в) и снизу (г))

В табл. 1 представлены граничные условия, требующиеся для моделирования технологической задачи. На производстве штамповка осуществляется на винтовом прессе с номинальной силой 4 МН. Моделируемый процесс состоял из трёх операций: предварительная штамповка, окончательная штамповка и обрезка облоя. Основными составляющими напряжённо-деформированного состояния (НДС) материала были сжимающие и растягивающие напряжения, характерные для процессов осадки и радиального выдавливания.

Таблица 1

Граничные условия для первой задачи

Параметр	Значение	Объект
Макс. сила, МН	4	оборудование
Макс. скорость деформирования, мм/с	450	
Макс. энергия, кДж	20	
закон трения по Леванову:		
- фактор трения	0,1	поверхность контакта
- коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К	17 000	
- коэффициент паузы	0,05	
Температура нагрева заготовки, °С	980	заготовка
Предел текучести σ_T , МПа	$\sigma_T = \sigma_T(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$	инструмент
Температура подогрева штампов, °С	250	
Предел текучести σ_T , МПа	1 607	
Модуль упругости E, ГПа	E = E(T)	

Разделительная операция обрезки облоя проводилась условно. В результате неё удалялся лишний материал по контуру поковки, но процесс образования микротрещин и их развитие до хрупкого разрушения материала, с появлением характерных поясков поверхности разделения материала, не проводилось. Материал инструмента – сталь, марки 4X5MФ1С (ЭП 572), модель упругости; материал заготовки – титановый сплав, марки ВТ6, модель пластичности. Модели описания пластичности материалов представлены в табличной форме, в зависимости от степени деформации, температуры и скорости деформации имеются в базе данных материалов программы.

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И 3D-ПЕЧАТЬ

В табл. 2 представлены граничные условия, требующиеся для моделирования задачи ТО. Значение силы соответствует макс. значению силы деформирования для второй операции процесса ГОШ. В пре-процессоре исходная геометрия была сегментирована на проектируемую область (design space, показана коричневым цветом), представлена внутренним материалом штампов, и непроецируемую область (non-design space, показана серым цветом), представлена наружной оболочкой, образованной внешними поверхностями штампов, поковками и гравюрами штампов. Таким образом были определены области, изменение которых происходить не должно. Как правило, к этим областям относят области крепления, соединения, смежные контактные поверхности в сборке и т.д. Результат сегментирования представлен на рис. 3. Коэффициент запаса определялся по пределу текучести. В качестве целевой функции выбрана функция максимальной жёсткости, с условием сохранения до 30% от исходного объёма материала.

Таблица 2

Граничные условия для второй задачи

Параметр	Значение	
<i>Схема нагружения</i>		
Сила, МН (верхняя грань верхнего инструмента)	0,55	
Закрепление (нижняя грань нижнего инструмента)	жёсткая заделка (DOF = 0)	
<i>Механические свойства материалов</i>		
<i>Объект:</i>	<i>поковка</i>	<i>штамповый блок</i>
Модуль упругости E, ГПа	116,5	195
Предел текучести σ_T , МПа	827,37	1 607
Коэффициент Пуассона	0,31	0,3

На основании полученного результата ТО были подготовлены stl-модели, пригодные для их 3D-печати по технологии экструзионной печати полимерной проволоки FDM/FFF (Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication). В качестве материала выбран полимерный материал полиэтилентерефталат гликоль (ПЭТГ) со средним значением предела прочности при растяжении $\sigma_B \sim 70$ МПа, $\sigma_T \sim 60$ МПа и плотностью $\rho = 1,3$ г/см³. Прототип обладал 50%-процентным заполнением при толщине слоя печати 0,3 мм. На основании заданных значений параметров 3D-печати ожидалось, что предел прочности материала снизится минимум в два раза. Верхний штамп ориентировался гравюрой к столу 3D-принтера, а нижний штамп – гравюрой к экструдеру. При одном и том же способе построения, а также одинаковом типе поддерживающих структур ожидалось, что гравюра верхнего штампа будет иметь менее точные размерные характеристики и качество рабочей поверхности по плоскости разъёма, чем нижний штамп. Кроме этого, в следствие массивности конструкции предполагалось появление температурного коробления в нижней части прототипа.

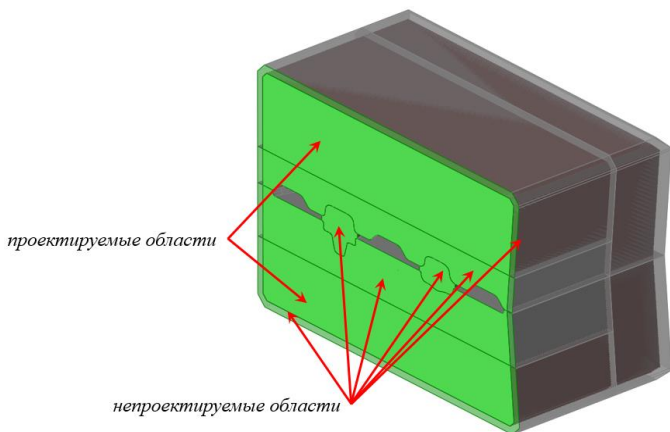


Рис. 3. Сегментирование 3D-модели перед топологической оптимизацией

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

КЭ-моделирование технологического процесса

На рис. 4, а представлена машинная диаграмма изменения силы от перемещения пуансона. Характер изменения сил деформирования на первой и второй операциях монотонный возрастающий. Макс. значение развивается на второй операции, а её величина составляет 0,55 МН. На рис. 4, б показаны графики изменения температур для

точки, лежащей на оси центральной цилиндрической бобышки внутри поковки. Для выбранного сплава интервалковки и штамповки (ИКИШ) составляет от 800°C до 1 200°C.

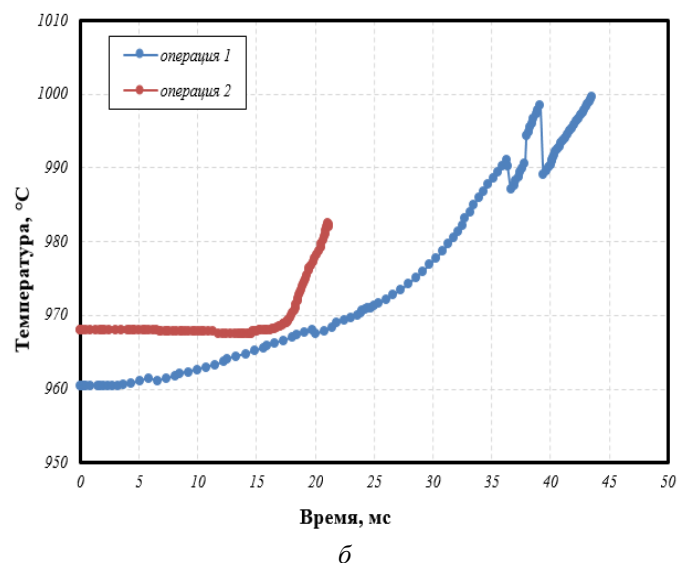
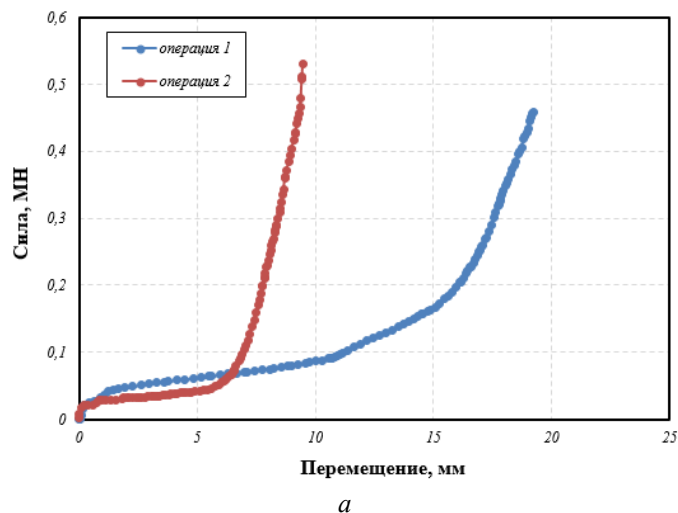


Рис. 4. Графики сила-перемещение (а) и изменения температур (б) для внутренней точки для двух операций

Достаточно сильно температура снижается на нижнем торце центральной бобышки на контакте с инструментом и выходит за пределы интервала ИКИШ. В центральной части температура остаётся в требуемом диапазоне. Данное обстоятельство не влияет на дальнейшее ухудшение механических свойств поковки, так как в размерах поковки предусмотрены припуски, напуски и допуски под последующую механическую обработку. В гораздо более сильной мере на качество поковки оказывают влияние геометрия второго перехода и неустойчивость поковки после её переноса во второй ручей штампа. На рис. 5 показаны дефекты типа складок или зажимов, уходящие после образования вглубь поковки. Появление дефектов связано с торможением металла в зоне облойного мостика и сжатия материала в верхней (дефект 1) и нижней (дефект 2) частях центральной бобышки на второй операции, а также перекосом поковки под действием силы тяжести после её переноса с первой операции в ручей штампа второй операции (дефект 3).

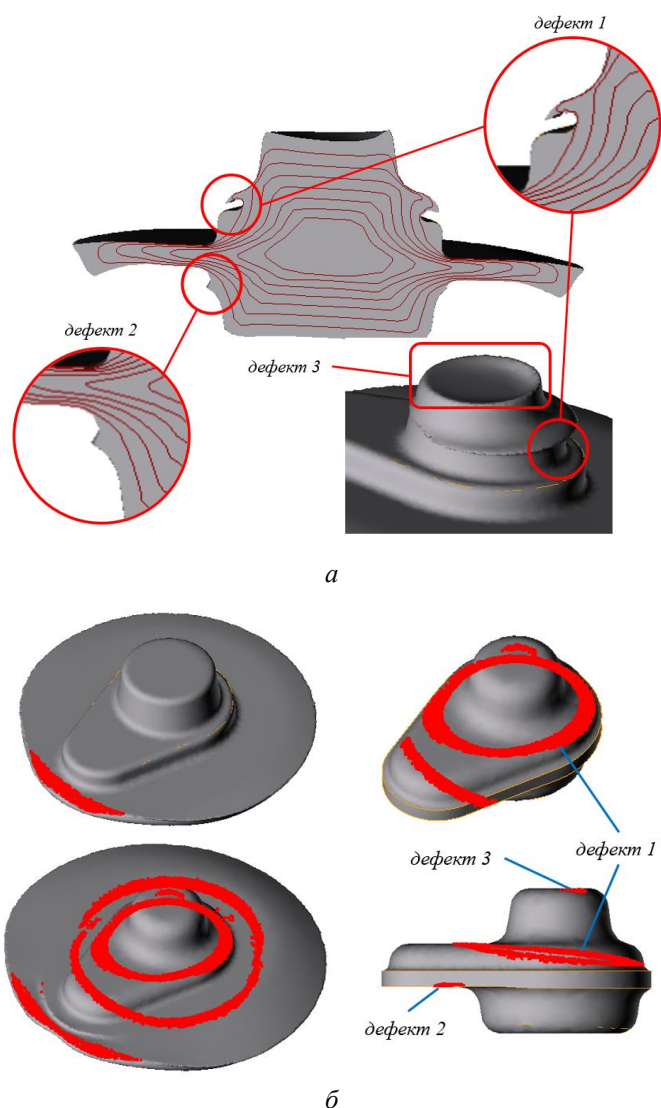


Рис. 5. Выявленные дефекты штамповки: на второй операции (показаны потенциальные места образования дефектов вместе с приповерхностными линиями в сечении) (а) и образование складок в конце каждой операции (б)

Эти дефекты располагаются недалеко от поверхности и могут быть также удалены при помощи механообработки.

Топологическая оптимизация

На рис. 6 показана геометрия внутренней части штампов после ТО. Геометрия для верхнего и нижнего штампов неодинакова. Для компенсации прогиба в центральной части в нижнем инструменте предусмотрен дополнительный объём материала. Для технологических отверстий, предусмотренных для транспортировки штампового блока, имеются поддерживающие структуры. Коэффициент запаса оптимизированного варианта исполнения штампового блока на 20% ниже исходного, что является допустимым, так как штампы работают в области упругой деформации.

Максимальные значения эквивалентных напряжений по Мизесу увеличились на 25%, что также является допустимым, так как это значение на 80% ниже предела текучести материала штампов (табл. 3).

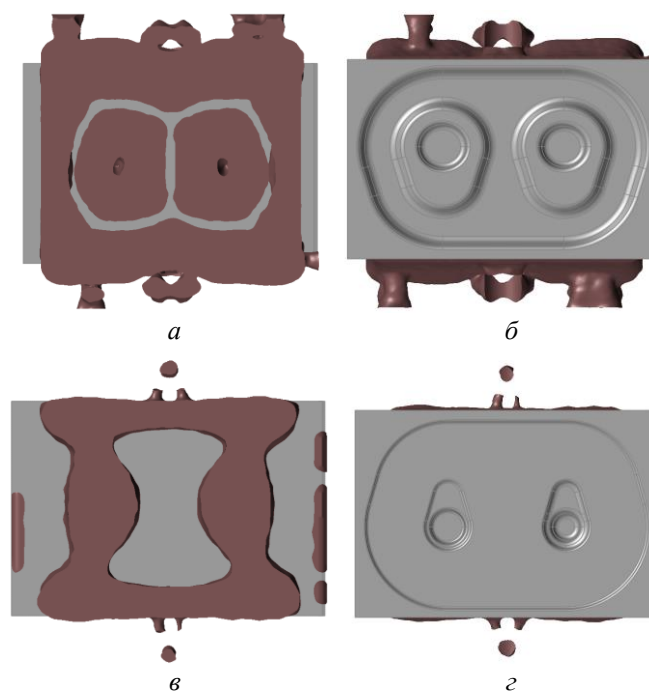


Рис. 6. Результаты топологической оптимизации: для верхнего (а, б) и нижнего (в, з) инструментов (вид снизу (а, в) и вид сверху (б, з))

Таблица 3

Результаты топологической оптимизации

Параметр	Значение			
	до ТО		после ТО	
	мин.	макс.	мин.	макс.
КЗ	3,27	4 114	2,62	94 590
Эффективные напряжения по Мизесу $\sigma_{\text{ф}}$, МПа	0,39	252,8	0,017	316,0

3D-печать прототипа штампа

Полученные прототипы штампов представлены на рис. 8. Общее время печати штамповых вставок составило 56 часов. Видно, что наилучшая поверхность получалась в верхней части прототипов, а нижняя часть, как и ожидалось, приобретала искажение или уменьшение кривизны по сравнению с параллельными плоскостями. При штамповке в штампе с непараллельной, а округлой поверхностью одной из гравюр вектор скорости течения модельного материала при его пластическом деформировании не будет совпадать с вектором направления перемещения инструмента, а будет ориентироваться по нормали к точкам криволинейной поверхности. Это приведёт к несимметричному течению материала, несимметричному распределению напряжения по контактной поверхности заготовки и инструмента, и, следовательно, более интенсивному выдавливанию материала на периферию в направлении от оси штампа, проходящую через геометрический центр описанного вокруг штампа параллелепипеда. На этапе пост-обработки прототипов проводилось ручное шлифование абразивной бумагой с зернистостью P320 и P800.

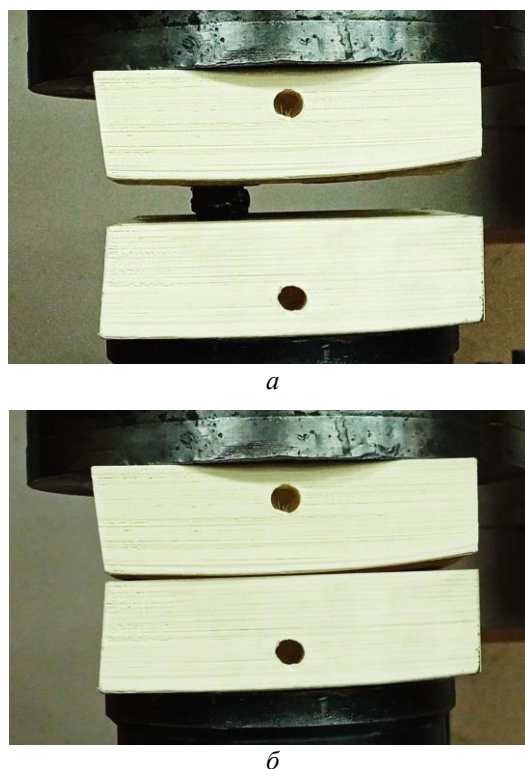
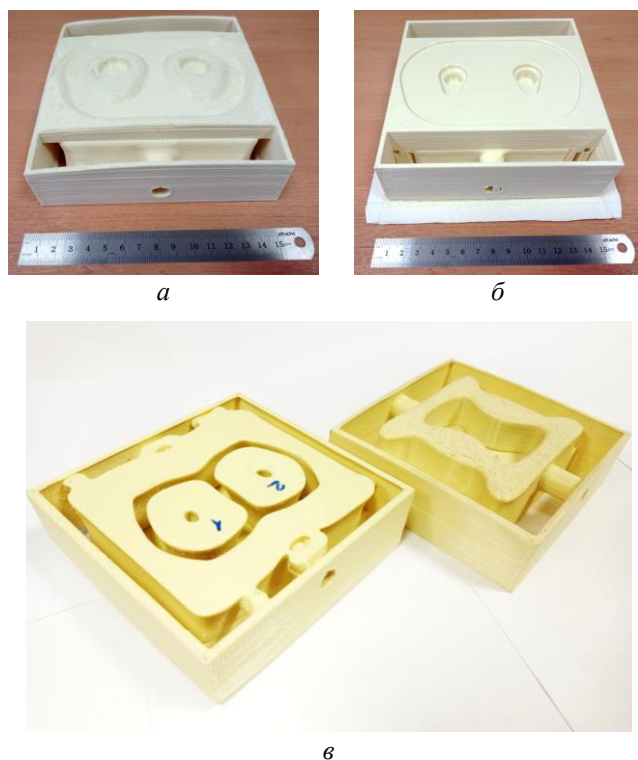


Рис. 8. Прототипы инструментов: верхняя (а) и нижняя (б) штамповые вставки со стороны гравюр и вид снизу, после полной пост-обработки прототипов (в)

Экспериментальная проверка жёсткости инструмента

Прочность инструмента оценивалась по локальному и объёмному формоизменению прототипа штампового блока на основании холодной объёмной штамповки цилиндрических образцов с аналогичными оригинальным образцам размерами и выполненными из двух модельных материалов, свинца ($\sigma_{\text{в}} \sim 18$ МПа, $\sigma_{\text{т}} \sim 5$ МПа и $\rho = 11,3$ г/см³) и нетехнического пластилина ($\sigma_{\text{т}} < 1$ МПа и $\rho = 1,2$ г/см³). Деформация выполнялась на гидравлической испытательной машине со скоростью деформирования 1 мм/с до полного смыкания штамповых вставок.

На рис. 9 представлены этапы штамповки и изменение размеров гравюры штампов после деформирования свинцового образца. Кривизна гравюры (1/R) верхнего штампа на второй позиции (рис. 9а и 9б) значительно больше, чем на первой, и поэтому почти параллельна гравюре нижнего инструмента.

Окончательное получение геометрии было возможно лишь на пластилиновых образцах. В табл. 4 показано отношение значений механических свойств материала штампов по сравнению с механическими свойствами модельных материалов образцов. Не смотря на более высокие механические характеристики ПЭТГ при растяжении (табл. 4), высокая плотность свинцового образца и низкая плотность конструкции штамповых вставок приводят к деформации материала в области гравюр. На рис. 9в и 9г показано, что гравюры на обеих позициях получили деформацию, однако, правые гравюры, соответствовавшие первой операции, получили большую деформацию, так как кривизна рабочих поверхностей была ниже.

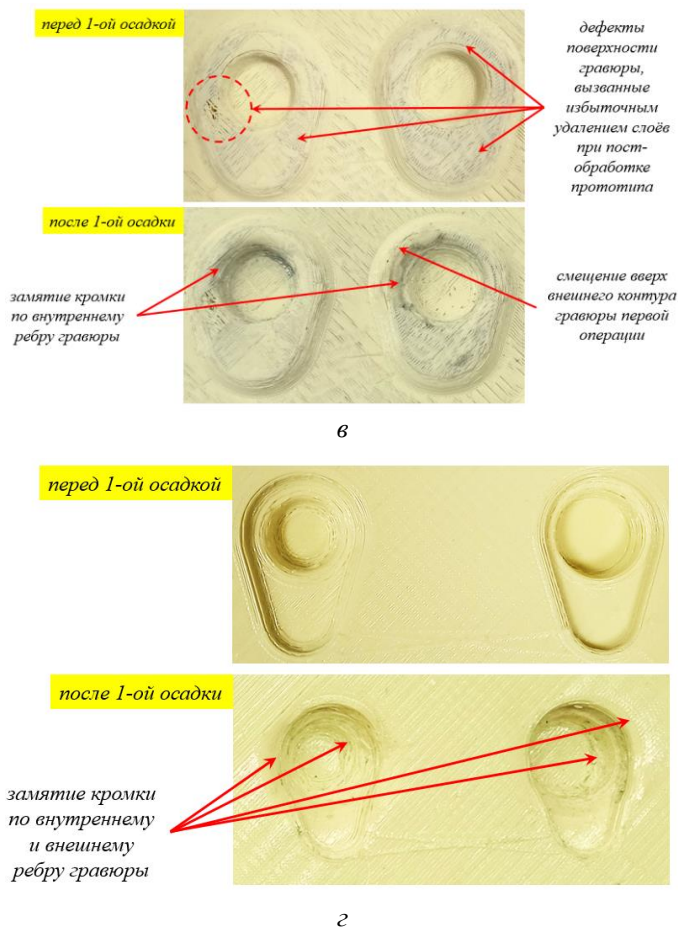


Рис. 9. Расположение инструментов и заготовки в начальный (а) и конечный (б) моменты операции штамповки (свинцовая заготовка располагается на второй позиции), наличие дефектов на гравюрах верхнего (в) и нижнего (г) инструментов

Таблица 4

Соотношение значений механических свойств ПЭТГ с модельными материалами образцов

Отношение свойств	Модельный материал	
	свинец	пластилин
σ_B	~ 4	н/д
σ_T	12	60
ρ	0,12	1,08

Поэтому поковки из свинца не могли быть полностью отштампованы до чертёжных размеров (рис. 10, а). Поковки из нетехнического пластилина достаточно хорошо оформлялись инструментом.

Общая жёсткость инструмента достаточно высока, не смотря на большой процент удалённого материала. Наличие трещин, пластических деформаций и мест разрушений по объёму штамповых вставок вне областей расположения гравюр обнаружено не было.

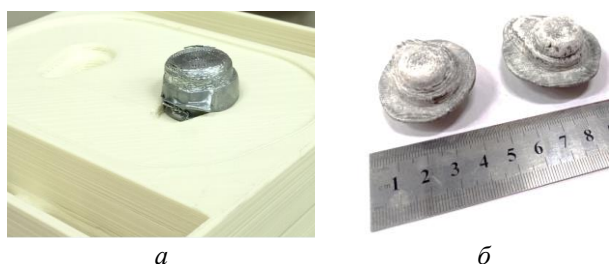


Рис. 10. Поковки: из свинцового образца (а) и из пластилинового образца (б)

Выводы

Полученные данные о процессе ГОШ поковки «Заглушка» позволяют сделать следующие выводы:

1. Выбранное оборудование подходит для реализации операции ГОШ, так как макс. сила деформирования не превышает 4 МН.

2. Геометрия ручьёв штампов не оптимальна, так как образуются зажимы в результате сильного торможения металла в области облойного мостика и перекоса поковки на второй операции. Возможно, что появление дефектов может быть устранено изменением ориентации исходной заготовки на первой позиции.

3. Изменение температуры в центральной части поковки происходит в границах допустимого ИКИШ.

4. В результате ТО геометрии штамповых вставок получена их новая геометрия, удовлетворяющая начальным прочностным требованиям, т.е. $K_3 \geq 1 \dots 1,5$ и $\sigma_T \leq \sigma_{эф}$.

5. В ходе проведения испытаний с напечатанными штамповыми вставками мест разрушения вне области гравюр выявлено не было. Для повышения жёсткости областей, включающих гравюры рабочих позиций, необходимо повысить процент заполнения материалом этих областей. При этом, для окрестных областей также следует предусмотреть повышение процента заполнения, но на меньшее значение, так как в противном случае области гравюры окажутся более прочными и могут деформировать нижележащие слои инструмента.

6. Пример методики по топологической оптимизации штампового инструмента позволяет изготавливать рабочие образцы прототипов штамповой оснастки. Выбор режимов и параметров 3D-печати будет оказывать влияние на усталостное разрушение инструмента, а значит и на количество снимаемых поковок требуемого качества.

В процессе ХОШ материал разогревается, теплота передаётся инструменту, что приводит к понижению механических свойств полимерного материала в области гравюры штампов. Вопрос о соразмерной с металлической оснасткой стойкости штампового инструмента непроверен, так как полимер является менее прочным материалом и обладает меньшей теплоёмкостью. В связи с этим требуется замена простых материалов на более сложные, специализированные функциональные, например, на полиэфиримид (ПЭИ, PEI, $\sigma_T \sim 250$ МПа) или полиэфирэфиркетон (ПЭЭК, PEEK, $\sigma_T \sim 120$ МПа), не теряющие своих высоких значений механических свойств при повышенных температурах. Существующие примеры изготовления по технологии FDM/FFF штампового инструмента показывают правомерность применения полимерной штамповой оснастки для операций листовой штамповки в условиях единичного и/или мелкосерийного опытного производства [0–0]. Применение полимерной оснастки для реализации ХОШ изучено в меньшей степени и имеет исследовательский потенциал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением: учебное пособие. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
2. Chenot J.-L. Numerical Simulation and Optimization of the Forging Process / J.-L. Chenot, P.-O. Bouchard, L. Fourment, P. Lasne // International Cold Forging Congress – 12th ICFC 2011 (Stuttgart, Germany, 2011). – Stuttgart, 2011. – URL: <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00677694/document> (дата обращения 05.02.2022).
3. Petrov M.A. Experimental investigations on the relation of the lubricant's flash point and quality of the piston made from aluminium alloy for its application in internal combustion engines / M.A. Petrov, T.S. Basyuk, A.N. Petrov, P.A. Petrov // Key Engineering Materials. – 2015. – vol. 651-653. – P. 297-304.
4. Petrov M.A. Experimental and Numerical Investigations of Mechanical Properties of 3D-Printed Polymeric Samples with Ideal and Roughed Surfaces / M.A. Petrov, I.S.A. El-Deeb // AIP Conference Proceedings. – 2019. – vol. 2113. – 150021.
5. Петров М.А. Численное исследование трения комбинированного процесса высадки и радиального выдавливания из алюминиевого сплава АД1 / М.А. Петров, П.А. Петров, Ю.Г. Калпин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – Т. 13. – №1. – С. 200-211.
6. Петров М.А. Численное исследование инновационного процесса штамповки с кручением / М.А. Петров, В.Н. Субич, П.А. Петров // ПРОМ-ИНЖИНИРИНГ: труды II международной научно-технической конф. – Челябинск, 2017. – С. 338-342.
7. Петров М.А. Винтовой пресс для штамповки с кручением / М.А. Петров, Б.А. Степанов // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки. – 2017. – Вып.11, ч.1. – С. 271-277.

8. Tekkaya A.E. A guide for validation of FE-simulations in bulk metal forming // The Arabian Journal for Science and Engineering. – 2005. – vol. 30, № 1C. – P. 113-136.
9. Birath F., Nilsson A. Topology optimization of a stamping die: Master's dissertation. – Lund (Sweden). – 2006. – 86 p.
10. Asnafi N. Design and Validation of 3D-Printed Tools for Stamping of DP600 / N. Asnafi, J. Rajalampi, D. Aspenberg // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – vol. 651. – 012010.
11. Петров М.А. Топологическая оптимизация в solid-Thinking Inspire. Часть 1: Задачи топологической оптимизации. Теоретические основы. Описание программы: учебное пособие. – М.: Московский Политех, 2019. – 153 с.
12. Петров М.А. Определение степени износа и усталостной прочности инструмента для холодной объёмной штамповки при помощи численного моделирования / М.А. Петров, Д.А. Елесин, В.В. Исаков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2020. – №7. – С. 36-42.
13. Arinbjarnar U. The Performance of 3D Printed Polymer Tools in Sheet Metal Forming / U. Arinbjarnar, C.V. Nielsen // Metals. – 2021. – vol. 11. – 1256.
14. Durgun I. Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool // Rapid Prototyping Journal. – 2015. – vol. 21, is. 4. – P. 412-422.
15. Geueke M. Structural optimization of additively manufactured polymer tools for flexible sheet metal forming / M. Geueke, P. Frohn-Sörensen, J. Reuter, N. Padavu, T. Reinicke, B. Engel // Procedia CIRP. – 2021. – vol. 104. – P. 1345-1350.
16. Schuh G. Sheet Metal Forming Using Additively Manufactured Polymer Tools / G. Schuh, G. Bergweiler, P. Bickendorf, F. Fiedler, C. Colag // Procedia CIRP. – 2020. – vol. 93. – P. 20-25.
17. Chua C.K. Rapid Tooling in Manufacturing / C.K. Chua, K.F. Leong, Z.H. Liu // In: Nee A. (eds) Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. – London: Springer, 2015. – P. 2525-2549.
18. Langstädtler L. Rapid Tooling for Impulse Forming / L. Langstädtler, A.P. Intemann, M. Herrmann, Ch. Schenck, H. Pegel, B. Kuhfuss. – URL: <https://popups.uliege.be/esaform21/pdf.php?id=2483>, 10.25518/esaform21.2483 (дата обращения 05.02.2022).
19. <https://i3d.ru/blog/stati/kak-kawasaki-optimizirovali-proizvodstvo-s-pomoshchyu-3d-pechatnoy-osnastki/> (дата обращения 05.02.2022).
20. Tondini F. 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production / F. Tondini, U. Arinbjarnar, A. Basso, C.V. Nielsen // Procedia CIRP. – 2021. – vol. 103. – P. 91-96.
21. Tondini F. The Performance of 3D Printed Polymer Tools in Sheet Metal Forming / F. Tondini, A. Basso, U. Arinbjarnar, C.V. Nielsen // Metals. – 2021. – vol. 11, is. 8. – 1256.
22. Петров П.А. Пластик или металл для инструментов обработки металлов давлением? / П.А. Петров, Б.Ю. Сапрыкин, М.А. Петров, Д.А. Гневашев // Аддитивные технологии. – 2021. – №3. – С. 35-44.

DOI: 10.24892/RIJIE/20220201

Numerical Simulation of the Hot Bulk Forming Process of the “CAP” Like Forming with Topology Optimization of the Tool Set

Petrov M.A., Urzhumov P.N.
Moscow Polytechnic University,
Moscow, Russian Federation
m.a.petrov@mospolytech.ru

Abstract. There is an example of the investigation methodology for hot bulk forming of the “Cap”-like forging made from titanium alloy and topological optimization of the forging tool inserts with the help of finite element method, which is widely used in process development for blank production industry. The laps formation was detected. The mass reduction of approx. ~43% was achieved for the forging tool inserts, without losing in their stiffness and strength. Using the extrusion type technology of 3D-printing (FFF) the inserts were manufactured and approved on the cylindrical

workpieces made from lead and non-technical plasticine materials. Due to the high density the lead specimen could be deformed without localized plastic deformation of the gravure of the tools and giving pure shaping result. Using more yielding material provides the recognizable contour of the gravures and their gut filling.

Keywords: hot bulk forming, laps, defects of bulk forming, FEM, topology optimization of forging tool, polymer prototype, FFF/FDM.

Библиографическое описание статьи

Петров М.А. Компьютерное моделирование процесса горячей объёмной штамповки поковки «ЗАГЛУШКА» и топологическая оптимизация штампа / М.А. Петров, П.Н. Уржумов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2022. – Т.9, №2. – С. 3-9. DOI: 10.24892/RIJIE/20220201

Reference to article

Petrov M.A., Urzhumov P.N. Numerical simulation of the hot bulk forming process of the “CAP” like forming with topology optimization of the tool set, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2022, vol.9, no.2, pp. 3-9. DOI: 10.24892/RIJIE/20220201