

Проектирование многопереходной закрытой штамповки с оценкой ресурса пластичности деформируемого сплава

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Ключевые слова: многопереходная закрытая штамповка, степень использования ресурса пластичности, поковка, штамп, степень деформации, моделирование формоизменения металла.

Ключові слова: багатоперехідне закриті штампування, ступінь використання ресурсу пластичності, поковка, штамп, ступінь деформації, моделювання формозміни металу.

Key words: multistage closed punching, feet of the plasticity's resource use, forging, stamp, degree of deformation, simulation of metal forming

Введение

Среди видов обработки металлов давлением горячая объёмная штамповка в закрытых штампах в наибольшей мере обеспечивает высокое качество штампованных заготовок благодаря реализации схемы неравномерного сжатия со значительными боковыми напряжениями, расположению волокон эквидистантно контуру штамповки и отсутствию мест с пониженными механическими свойствами, которые обычно располагаются в зонах выхода металла в облой при штамповке в открытых штампах.

Классический подход к проектированию процесса штамповки в закрытом штампе применим лишь для некоторых авиационных деталей, форма которых позволяет получить поковку за один переход. Часто при изготовлении деталей на стадии окончательного заполнения ручья превышает предельная степень деформации металла, что обуславливает необходимость введения нескольких переходов штамповки, каждый из которых пройдет как минимум через две стадии формоизменения.

Правильный выбор переходов штамповки обеспечивает сравнительно легкое заполнение полости ручья и удовлетворительную стойкость штампа при минимальном расходе материала. Особенно важной и одной из наиболее сложных задач решаемых технологом кузнечно-штамповочного производства является установление вида и количества штампов с заготовительными ручьями, в которых получают фасонную заготовку под последующую штамповку, а также формы и размеров заготовок по переходам. В большинстве случаев разработка технологического процесса многопереходной штамповки представляет уникальный в своем роде процесс, результаты которого во многом зависят от квалификации технолога. Это объясняется значительными трудностями осуществления технологических процессов точной штамповки, связанными с недостаточной изученностью картины течения металла, отсутствием общепринятой методики выбора формы и размеров заготовок по переходам, а также рекомендаций по проектированию конструкции штампа.

Задача исследования

В ходе получения поковок «крышка гидроцилиндра» (рис. 1 а) на кузнечно-штамповочном участке авиапредприятия были выявлены регулярные типовые дефекты поковок в виде внутренних растрескиваний в области внедрения пуансона радиусом 25 мм на глубину 41 мм. Для исключения брака получаемых поковок на участке принято решение штамповать поковку пуансоном радиусом 15 мм на глубину 20 мм (рис. 1 б, 1 в). Для получения указанных поковок

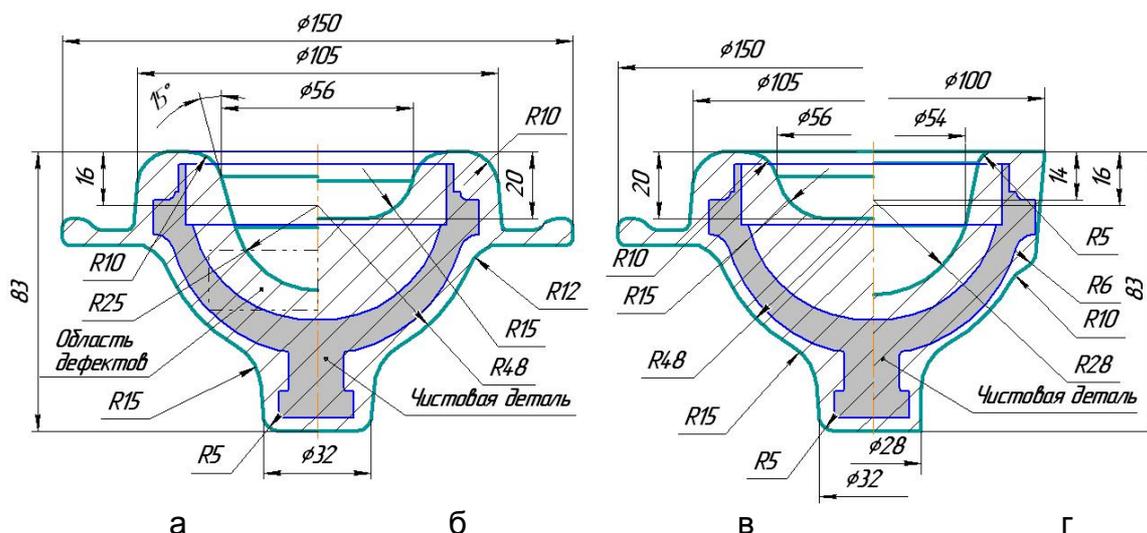


Рис. 1. Крышка гидроцилиндра, полученная в открытом (а, б, в) и закрытом (г) штампе

применена штамповка в открытом штампе, хотя отраслевые стандарты [1] определяют, что поковки, являющиеся заготовками для деталей ответственного назначения, типа крышек гидроцилиндров, следует изготавливать многоручьевой закрытой штамповкой. Уход от технологии штамповки крышки в закрытом штампе произведен вследствие опасности появления дефектов в виде складок, зажимов и пр. При этом для обеспечения заполнения гравюры штампа приходится использовать избыточные напуски и припуски, в результате чего объем штампованной поковки на 20% и более превышает определяемый соответствующими стандартами [2, 3]. Кроме того, отказ от фасонирования заготовки за несколько переходов не позволяет получить требуемую структуру материала (рис. 1 в – г).

Для установления параметров технологических процессов, не только исключаящих разрушение материалов в процессе пластической деформации, но и обеспечивающих достижение требуемого уровня свойств получаемых поволоков необходимо проведение комплексных исследований, направленных на оценивание технологических пластичностей сплавов в диапазоне силовых и кинематических параметров, а также степени использования их ресурса пластичности.

В теории накопления повреждений при анализе разрушения металлов в условиях немонотонной деформации, В.Л. Колмогоровым получено кинетическое уравнение для поврежденности [4] в виде:

$$d\psi = \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_p(\Pi_\sigma)}, \quad (1)$$

где ψ – степень использования ресурса пластичности; ε_i – интенсивность деформаций; ε_p – предельная пластичность; Π_σ – показатель жесткости схемы напряженного состояния.

Очевидно, что при $\psi < 1$ разрушения не произойдет, а при $\psi > 1$ разрушение неизбежно.

Проведенный анализ методов исследования процессов ОМД указывает на целесообразность численного исследования процесса формоизменения заготовки

в полости штампа посредством моделирования методом конечных элементов, который позволяет с достаточной точностью определять напряженно-деформированное состояние материала заготовки.

Целью работы является усовершенствование технологии получения детали типа крышка гидроцилиндра с учетом степени использования ресурса пластичности.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведен ряд численных и натурных экспериментов, в ходе которых исследовались процессы формообразования крышки из алюминий-магниевого сплава АМг6, нагретого до температуры 390 °С, с использованием одноручьевого открытой штамповки и двухпереходной закрытой штамповки. Изучалось влияние геометрических параметров оснастки на распределение деформаций и структуру металла по степени использования ресурса пластичности штампованных поковок.

Исследование соответствующих деформационных процессов проводилось посредством конечно-элементного моделирования с применением разработанной методики решения задач предельного формоизменения металла [4]. Разработанные конечно-элементные модели имеют следующие особенности.

– Расчетные области, в силу геометрической и силовой симметрии рассматриваемых систем, дискретизированы четырехузловыми изопараметрическими осесимметричными элементами.

– Приложение нагрузки к заготовке осуществляется путем задания перемещений узлам торцевых поверхностей пуансона по вертикальной оси на величину, соответствующую вертикальному смещению верхней части штампа. Скорость движения модели пуансона соответствует скорости движения реального инструмента, и задана начальной скоростью 0,5 м/с.

– Деформации обеих частей штампа, выполненных из стали 5ХНМ, по сравнению с деформациями заготовки пренебрежимо малы, поэтому матрица и пуансон моделируются жесткими телами (табл.1).

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов

Материал	Плотность ρ , кг/мм ³	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона μ	Модуль упрочнения E_{\tan} , МПа	Предел текучести σ_T , МПа
АМг6	2800	$13 \cdot 10^3$	0,38	105	184
Сталь 5ХНМ	7800	$21 \cdot 10^4$	0,33	-	-

– Контактное взаимодействие заготовки с частями штампа моделируется кинематическим условием непроникновения, условием равенства нормальных контактных усилий штампа и заготовки, касательным усилием, обусловленным трением между контактирующими телами, подчиняющимся закону Кулона с $k_{mp}=0,4$.

Билинейная аппроксимация диаграммы деформационного упрочнения для материала производится с помощью выражения:

$$\sigma = \sigma_T + \beta \cdot E_{pl} \cdot \varepsilon_{pl}, \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести; β – параметр упрочнения (здесь $\beta = 1$ – изотропное

упрочнение); $E_{pl} = \frac{E_{\tan} E}{E - E_{\tan}}$ – модуль пластического упрочнения; E, E_{\tan} – модуль

упругости и модуль упрочнения; ε_{pl} – текущее значение пластической деформации.

Начало пластического течения определяется условием пластичности Мизеса:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \geq \sigma_T \quad (3)$$

Для оценки существующей технологии одноручевой штамповки проанализировано напряженно-деформированное состояние алюминиево-магниевого сплава АМгб на всех этапах формоизменения и определены степени использования его ресурса пластичности (рис. 2).

Результаты моделирования свидетельствуют о существенной неравномерности распределения деформаций по объему поковки, так, зона максимальной интенсивности деформаций (рис. 2 а справа) как и другие зоны максимальной деформационной проработки металла (рис. 2 а слева) расположены в зонах контакта металла с оснасткой. Этот факт позволяет говорить о недостатке данного способа получения поковки крышка ввиду несовпадения зон проработанного металла с профилем чистой детали. Однако наиболее весомый аргумент в сторону отказа от существующей технологии штамповки крышки – картина распределения степени использования ресурса пластичности (рис. 2 б), которая наглядно демонстрирует области внутренних растрескиваний, совпадающие с областями дефектов натуральных образцов (рис. 1 а).

Как показали результаты моделирования, реализация благоприятной схемы деформирования металла в полости закрытого штампа позволяет использовать в

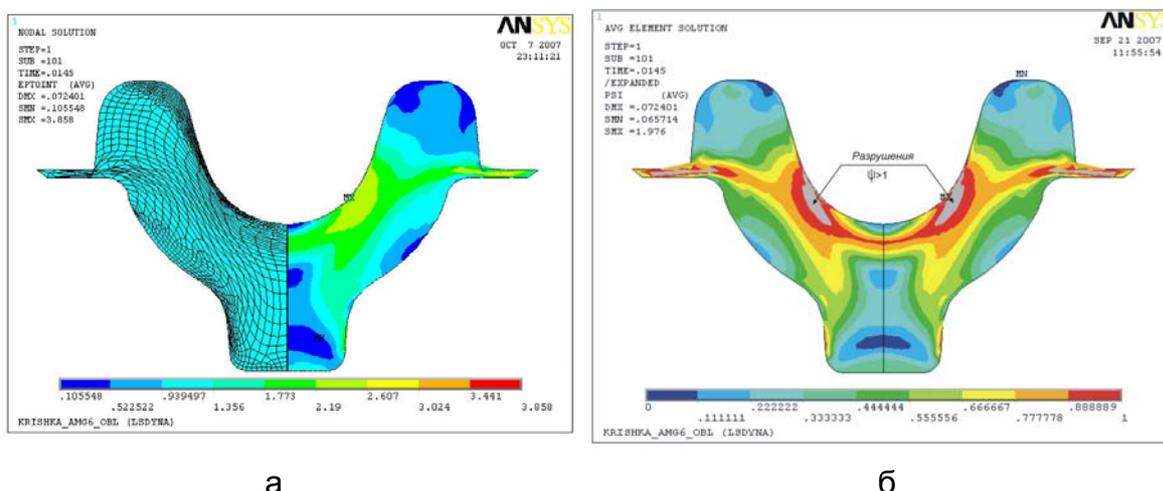
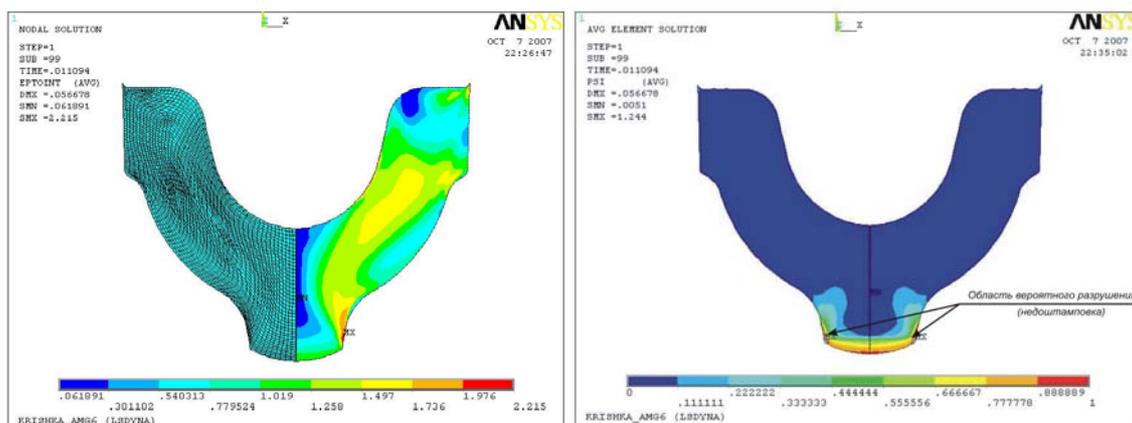


Рис. 2. Поковка крышка, полученная в открытом штампе:
 а – распределение деформаций в линиях Лагранжа (справа) и распределение интенсивности деформаций (слева);
 б – распределение степени использования ресурса пластичности

качестве инструмента пуансон с большим радиусом (28 мм) по сравнению с открытым штампом, и внедрить его на большую глубину (44 мм), обеспечивая глубокую деформационную проработку металла и повышая коэффициент

использования материала. На основании результатов моделирования и руководствуясь стандартами, спроектирован штамп закрытого действия.



а

б

Рис. 3. Поковка крышка, полученная в закрытом штампе:
 а – распределение деформаций в линиях Лагранжа (справа) и распределение интенсивности деформаций (слева);
 б – распределение степени использования ресурса пластичности

На рис. 3 а приведены результаты моделирования штамповки крышки в полости закрытого штампа, доказывающие глубокую проработку металла по объему поковки, равномерность распределения деформаций металла поковки в местах, соответствующих профилю чистой детали. Кроме того, на всех основных этапах формоизменения металла в полости закрытого штампа, ресурс пластичности деформируемого сплава не был превышен. Однако в области образования бобышки крышки на завершающем этапе деформирования наблюдается недоштамповка металла в углы матрицы и возникает опасность разрушения, о чем свидетельствует картина распределения степени использования ресурса пластичности (рис. 3 б).

Таким образом, для получения поковки крышка в полости закрытого штампа целесообразно применение нескольких переходов штамповки. По разработанной методике [5], определена стадия штамповки крышки из стандартной заготовки в чистовом ручье штампа, при которой в объеме поковки достигаются максимально допустимые значения степени использования ресурса пластичности деформируемого сплава (по абсолютной величине не превышающие значений 0,9 с учетом статистического разброса характеристик материалов в пределах 10%). В соответствие этой стадии определена форма матрицы и пуансона первого

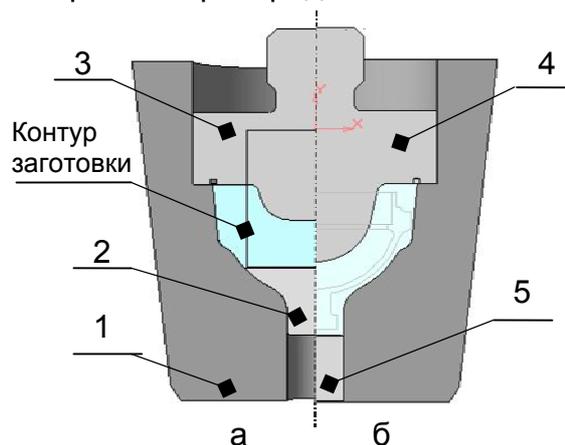


Рис. 4. Штамп для первого (а) и второго (б) перехода штамповки: 1 – матрица; 2 – вставка; 3 – пуансон для первого перехода; 4 – пуансон для второго перехода; 5 – выталкиватель

перехода и форма заготовки для второго перехода штамповки. На основании данных результатов спроектирован штамп первого перехода штамповки крышки (рис. 4 а) и приняты следующие конструктивные решения:

1. геометрию матрицы оставить постоянной, получение дна поковки первого перехода штамповки обеспечить за счет применения ограничительной вставки. Применение ограничительной вставки позволяет кроме указанного, решить вопрос установки и центрирования заготовки в полости матрицы, что особенно актуально при процессах горячей штамповки.

2. Формообразующую часть геометрии пуансона принять соответствующей гравюре верхней части облойного штампа, вследствие необходимости ограничить суммарные деформации в области внедрения пуансона. Кроме того, уход от деформирования металла по схеме обратного выдавливания и длительной осадки без бокового подпора, позволяет с меньшими усилиями заполнить труднодоступные участки штампа.

Проведено численное исследование процесса штамповки крышки на первом переходе штамповки. Поэтапное изучение распределения деформаций по объему металла свидетельствуют о протекании процесса в основном по комбинированной схеме осадки (на завершающих стадиях с боковым подпором) с неглубокой прошивкой. Благоприятная схема деформирования способствует хорошему заполнению малых радиусов скруглений внешнего контура поковки. Кроме того, картина распределения степени использования ресурса пластичности на окончательной стадии процесса первого перехода штамповки демонстрирует достигнутые максимальные значения степени использования ресурса пластичности, не превышающие 0,25 единицы.

На языке программирования APDL разработана специальная программа, которая позволяет считывать геометрию поковки первого перехода и передавать полученные данные в виде массива координат точек в расчетный модуль следующей задачи (следующего перехода штамповки), и там, в свою очередь автоматически сформировать контур заготовки следующего перехода.

Как показали численные (а в дальнейшем и натурные эксперименты) возможное и достаточное количество переходов штамповки – два перехода. На рис. 4 б представлен штамп для второго перехода штамповки крышки, состоящий из матрицы, пуансона второго перехода и ограничителя по высоте бобышки крышки, выполняющего также функции выталкивателя.

В процессе численного исследования второго перехода штамповки крышки определены параметры напряженно-деформированного состояния и степени использования ресурса пластичности металла на всех этапах деформирования. Максимальная степень использования ресурса пластичности составляет 0,41 единицы.

Для оценки потребного усилия деформирования по переходам получены распределения контактных напряжений на поверхностях поволоков. Расчетное усилие по переходам найдено по формуле (4), и составляет для первого перехода 116,3 т, для второго перехода – 201 т.

$$P = - \int_0^S \sigma_y 2\pi S dS , \quad (4)$$

где S – радиальный размер поверхности контакта на окончательной стадии.

На основании результатов численного моделирования с использованием методики анализа предельного формоизменения для бездефектного получения

поковки крышка из алюминиево-магниевого сплава АМг6 в полости закрытого штампа, как это предписывают отраслевые стандарты, можно рекомендовать применение двух переходов штамповки, в описанных выше штампах. Для подтверждения сделанных выводов проведена экспериментальная проверка на натуральных образцах.

Штамповке подвергались отожженные прессованные прутки диаметром 35 мм длиной 38 мм, нагретые до 390°C. Деформирование производилось с помощью гидравлического пресса модели Д-2443А, развивающего максимальное усилие 250 т. В ходе эксперимента были получены поковки, отштампованные за один переход из начальной заготовки (прутка) в чистовом ручье штампа, и, полученные за два перехода штамповки. Визуальное сравнение формы полученных поковок (рис. 5) позволяет сделать следующие выводы.

1. Технология горячей штамповки крышки за два перехода позволяет получать поковки точные по форме и размерам.

2. Попытка получить поковку за один переход штамповки свидетельствует о таких серьезных дефектах, возникающих при штамповке, как



Рис. 5. Экспериментальные поковки:
 а – после первого перехода штамповки из исходной заготовки;
 б, в (слева) – за два перехода штамповки;
 б, в (справа) – за один переход из исходной заготовки

незаполнение гравюры в углах, ослабление размеров по внешнему диаметру и недоштамповка по высоте.

Анализ полученных в ходе натуральных экспериментов результатов, а также с помощью результатов численного моделирования, свидетельствует о необходимости предварительного фасонирования первичных заготовок. Эта необходимость в первую очередь обусловлена невозможностью получения качественной поковки за один переход штамповки. Существенное значение процесс фасонирования заготовок приобретает и на этапах решения вопросов установки и центрирования заготовок в полостях штамповой оснастки, приближая заготовки по форме и размерам к готовой детали. Кроме того, сравнение усилий деформирования свидетельствует о преимуществах применения технологии двух переходной штамповки перед штамповкой за один переход в виду снижения максимального усилия деформирования на 19%.

Но наиболее весомый вклад промежуточные переходы штамповки вносят в схему деформирования металла в полости штампа, и как следствие на однородность его деформационной проработки в требуемых местах (в данном случае в сечении поковки, соответствующем профилю чистовой детали). Данный факт подтверждают проведенные металлографические исследования структуры и свойства поковок, полученных по предложенной технологии двух переходной штамповки.

Анализ макроструктуры проводился с помощью фотомикроскопа отраженного света НЕОРНОТ 30 и электронного растрового микроскопа с камерой

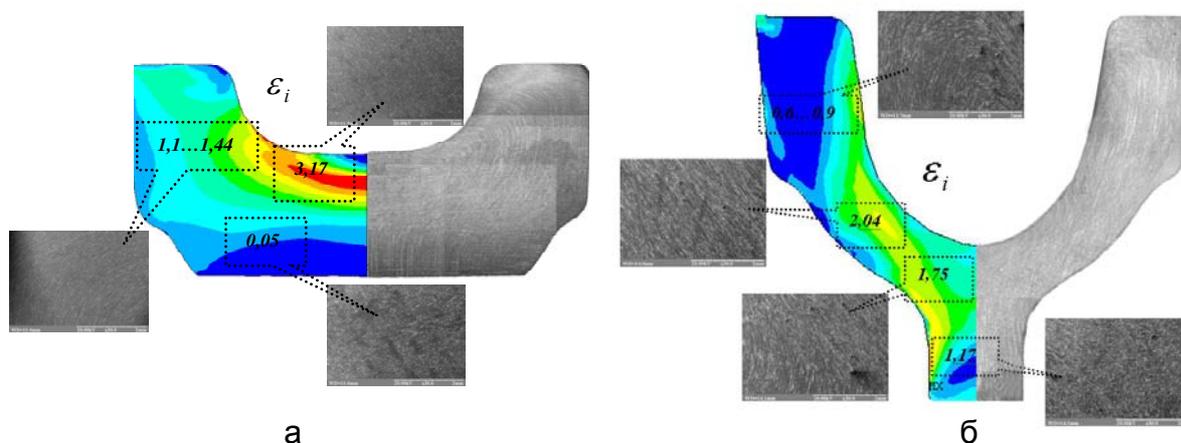


Рис. 6. Макроструктура (справа) и распределение интенсивностей деформаций (слева) поковки крышка: а - после первого перехода; б - после второго перехода штамповки

низкого вакуума РЭМ-106. Фотоснимки макроструктуры изучаемых поковок и соответствующие им картины распределения интенсивностей деформаций представлены на рисунке 6.

При анализе макроструктуры поковок выявлено:

- практически во всем объеме поковки после первого перехода деформация металла равномерна, и только в области, граничащей с ограничительной вставкой, наблюдается большая зона затрудненной деформации. Так, вдоль оси симметрии глубина деформационной проработки металла достигает около двух третей высоты поковки. Однако данный факт благоприятно сказывается на картине деформирования поковки на следующем переходе, в силу отсутствия предварительно растянутых волокон.

- При получении поковки на втором переходе штамповки реализуется схема выдавливания с эффектом вытяжки, характеризующаяся незначительной неравномерностью деформаций по объему поковки, однако расположение волокон максимально проработанного металла соответствует профилю чистовой детали.

- Сравнение полученной макроструктуры металла с картиной распределения деформаций по объему поковки, полученной за один переход штамповки из прутка, где деформированию происходит по схеме обратного выдавливания и характеризуется значительной неравномерностью проработки металла, говорит о целесообразности принятого технологического решения.

Проведено измерение твердости по Бринеллю исходной заготовки и поковок после первого и второго переходов. Результаты измерений показывают повышение твердости в среднем на 9 единиц в областях, соответствующих профилю чистовой детали, что подтверждает достаточный уровень деформационной проработки металла.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования по проверке технологии многопереходной штамповки крышки из алюминиевого сплава АМгб, разработанной на основе решения задачи предельного формоизменения с помощью разработанной методики, использующей в качестве инструмента систему численного моделирования, позволяют сформулировать следующие

технологические рекомендации:

- 1) для определения потребного количества переходов закрытой штамповки, формы и размеров заготовок для последующих переходов использовать разработанную методику;
- 2) использовать в качестве геометрии гравюры штампа промежуточного перехода контур поковки, полученный в результате решения задачи предельного формоизменения с определением степени использования ресурса пластичности;
- 3) определять форму и размеры ограничительных вставок и колец чистой гравюры штампа на основе контуров поволоков промежуточных переходов и конструктивных решений;
- 4) использовать исходную заготовку (прессованный пруток) с соотношением диаметра к высоте не более 2,5, обеспечивающую максимальное обжатие в полости штампа в пределах 90...92%;
- 5) исходные заготовки обработать на токарном станке для снятия поверхностных дефектов с точностью $d_0^{+0,1}$; $h_0^{+0,3}$;
- 6) предусмотреть в пуансоне компенсационные полости с обязательным назначением штамповочных уклонов (3...5)0 для исключения заклинивания металла в полости закрытого штампа;
- 7) проводить полный отжиг заготовок между переходами штамповки согласно [6];
- 8) применять смазки согласно [7], на основе дисульфид молибдена, для снижения коэффициента трения;
- 9) деформирование осуществлять на гидравлических прессах с усилием выталкивателя 30...40% от усилия штамповки.

Литература

1. ОСТ 92-1619-87. Заготовки штампованные из алюминиевых сплавов. Типовой технологический процесс горячей объемной штамповки. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 40 с.
2. ОСТ 1.41187 – 78. Заготовки штампованные. Допуски на размеры и припуски на обработку. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 44 с.
3. ОСТ 1.41188 – 78. Заготовки штампованные. Конструктивные элементы. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 36 с.
4. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1977. – 336с.
5. Кривцов В.С., Мещеряков А.Н., Дыбский П.А., Шипуль О.В. Анализ предельного формоизменения металла в полости закрытого штампа / В.С. Кривцов, А.Н. Мещеряков, П.А. Дыбский, О.В. Шипуль // Кузнечно-штамповочное производство, – 2007. – № 3 – С. 39–44.
6. Типовая производственная инструкция ТПИ-1051. Термическая обработка деформируемых алюминиевых сплавов. Издание 5е. – К., НИАТ, 1977. – 56с.
7. Исаченков Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением / Е.И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1978. – 208с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Ф.В. Новиков, Харьковский национальный экономический университет, Харьков.

Поступила в редакцию 16.03.2009