

УДК 621.735:004.94

В.В. Воронько, О.В. Шипуль

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

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ШТАМПОВКИ КРЫШКИ ГИДРОЦИЛИНДРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведен критический анализ серийной технологии получения поковки типа крышка гидроцилиндра летательного аппарата (ЛА) и с помощью разработанной авторами методикой установлена возможность образования внутренних растрескиваний. Предложена технология штамповки крышки из сплава Амгб в полости закрытого штампа, которая обеспечивает не только существенное повышение коэффициента использования материала сравнительно с облойной штамповкой, но главное - высокую степень проработки металла в зонах, соответствующих профилю чистой детали. Определено необходимое количество переходов для получения бездефектной поковки типа крышка. Проведен анализ формоизменения металла в полости штампа по переходам штамповки и определена максимальная степень использования ресурса пластичности. Проведена оценка потребного усилия штамповки по переходам. Обоснованность предложенной технологии подтверждена проведением физических экспериментов. Проведен анализ макроструктуры с помощью растрового электронного микроскопа и измерение твердости по Бринеллю полученных многопереходной штамповкой повок. На основании проведенных исследований сформулированы технологические рекомендации к горячей многопереходной закрытой штамповке деталей ЛА ответственного назначения.

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

Введение

В ходе получения повок типа крышка гидроцилиндра (рис. 1 а) на кузнечно-штамповочном участке авиапредприятия были выявлены регулярные типовые дефекты повок в виде внутренних растрескиваний в области внедрения пуансона радиусом 25 мм на глубину 41 мм. Для исключения брака получаемых повок на участке принято решение штамповать поковку пуансоном радиусом 15 мм на глубину 20 мм (рис. 1 б, в). Для получения указанных повок применена штамповка в открытом штампе, хотя отраслевые стандарты [1] определяют, что поковки, являющиеся заготовками для деталей ответственного назначения, типа крышек гидроци-

линдров, 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).

В большинстве случаев разработка технологического процесса многопереходной штамповки пред-

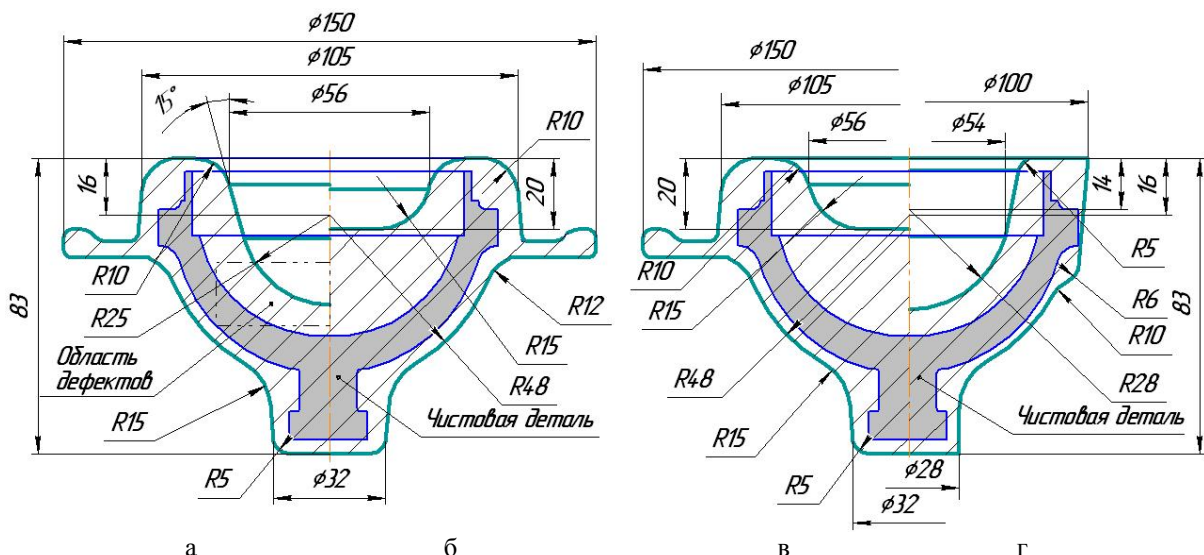


Рис. 1. Крышка гидроцилиндра, полученная в открытом (а, б, в) и закрытом (г) штампе

ставляет 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. Для установления параметров технологических процессов, не только исключая разрушение материалов в процессе пластической деформации, но и обеспечивающих достижение требуемого уровня свойств получаемых поковок 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 алюминиево-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	Коеффициент Пуассона, ν	Модуль упрочнения, $E_{\text{тан}}$, 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 $k_{\text{тр}} = 0,4$.

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

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

где $E_{\text{пл}} = E_{\text{тан}} E / (E - E_{\text{тан}})$ – модуль пластического упрочнения; σ_T – предел текучести; β – параметр упрочнения, здесь $\beta = 1$ – изотропное упрочнение; $E, E_{\text{тан}}$ – модуль упругости и модуль упрочнения; $\varepsilon_{\text{пл}}$ – текущее значение пластической деформации.

Начало пластического течения определяется условием пластичности Мизеса:

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

Для оценки существующей технологии одноручьевого штамповки проанализировано напряженно-деформированное состояние алюминиево-магниевого сплава АМг6 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 контакту металу з оснасткою. Цей факт дозволяє говорити про недолік даного способу отримання поковки кришки ввиду невідповідності зон проработанного металу з профілем чистової деталі. Однак найбільш вагомим аргументом на користь відмови від існуючої технології штампування кришки – картина розподілу ступеня використання ресурсу пластичності (рис. 2, б), яка наочно демонструє області внутрішніх растрескивань, що збігаються з областями дефектів натурних зразків (рис. 1, а).

Як показали результати моделювання, реалізація вигідної схеми деформування металу в порожнині закритого штампу дозволяє використовувати як інструмент пуансон з великим радіусом (28 мм) порівняно з відкритим штампом, і вводити його на велику глибину (44 мм), забезпечуючи глибоку деформаційну проработку металу і підвищуючи коефіцієнт використання матеріалу. На основі результатів моделювання і керуючись стандартами, спроектовано штамп закритого дії.

На рис. 3, а наведено результати моделювання штампування кришки в порожнині закритого штампу, що свідчать про глибоку проработку металу за об'ємом поковки, рівномірність розподілу деформацій металу поковки в місцях, що відповідають профілю чистової деталі. Крім того,

на всіх основних етапах формозмінення металу в порожнині закритого штампу, ресурс пластичності деформуваного сплаву не був перевищений. Однак в області формування бобишки кришки на завершальній стадії деформування спостерігається недоштампування металу в кути матриці і виникає небезпека руйнування, про що свідчить картина розподілу ступеня використання ресурсу пластичності (рис. 3, б).

Таким чином, для отримання поковки кришки в порожнині закритого штампу цілком доцільно застосування декількох переходів штампування. По розробленій методикі [5], визначено стадія штампування кришки з стандартної заготовки в чистовому ручьї штампу, при якій в об'єм поковки досягаються максимально допустимі значення ступеня використання ресурсу пластичності деформуваного сплаву (за абсолютною величиною не перевищують значень 0,9 з урахуванням статистичного розкиду характеристик матеріалів в межах 10%). Відповідно до цієї стадії визначено форму матриці і пуансона першого переходу і форму заготовки для другого переходу штампування. На основі даних результатів спроектовано штамп першого переходу штампування кришки (рис. 4, а) і прийняті наступні конструктивні рішення:

1. Геометрію матриці залишити постійною, отримання дна поковки першого переходу штампування

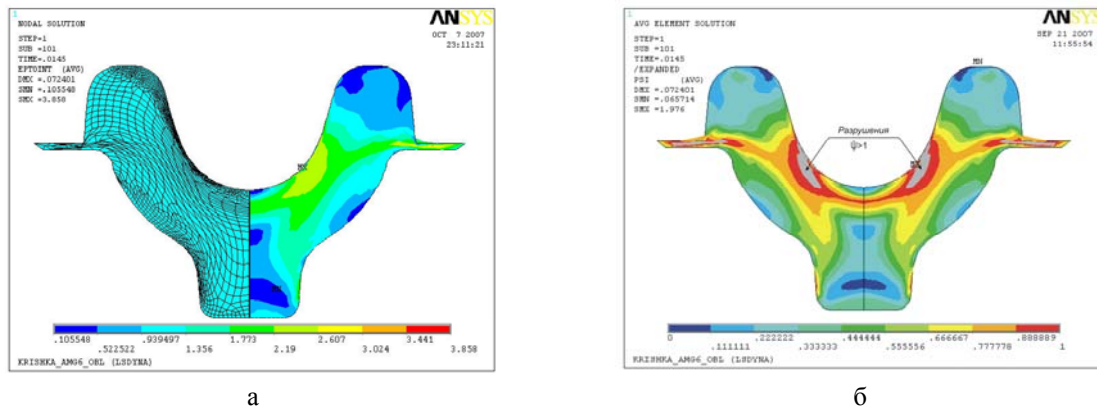


Рис. 2. Поковка кришки, отримана в відкритому штампі:
а – розподіл деформацій в лініях Лагранжа (справа) і розподіл інтенсивності деформацій (слева);
б – розподіл ступеня використання ресурсу пластичності

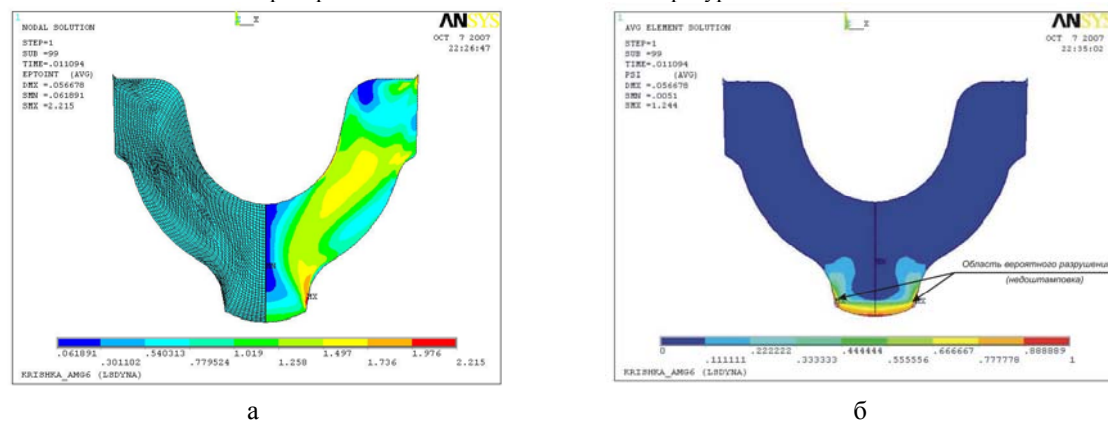


Рис. 3. Поковка кришки, отримана в закритому штампі:
а – розподіл деформацій в лініях Лагранжа (справа) і розподіл інтенсивності деформацій (слева);
б – розподіл ступеня використання ресурсу пластичності

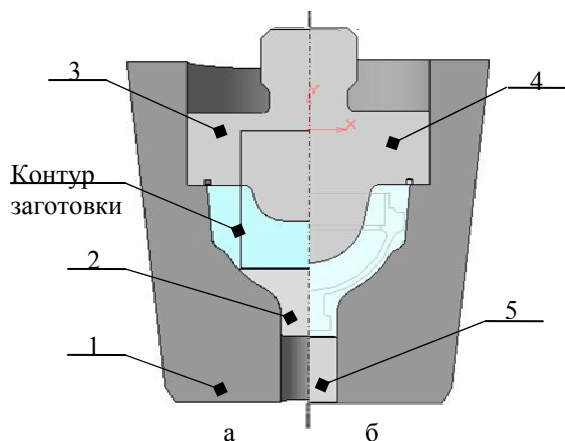


Рис. 4. Штмп для первого (а) и второго (б) перехода штамповки: 1 – матрица; 2 – вставка; 3 – пуансон для первого перехода; 4 – пуансон для второго перехода; 5 – выталкиватель

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 считать 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 поковок. 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 алюминийево-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



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

до 390 °С. Деформирование производилось с помощью гидравлического прессы 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 незаполнение гравюры в углах, ослабление размеров по внешнему диаметру и недоштамповка по высоте.

Анализ полученных в ходе натурных 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 чистой 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 НЕО-РНУТ 30 и электронного растрового микроскопа с камерой низкого вакуума РЭМ-106. Фотоснимки макроструктуры изучаемых поковок и соответствующие им картины распределения интенсивностей деформаций представлены на рис. 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 чистой детали;

– сравнение полученной макроструктуры металла с картиной распределения деформаций по объему поковки, полученной за один переход штамповки из прутка, где деформирование 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 чистой детали, что подтверждает достаточный уровень деформационной проработки металла.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования по проверке технологии многопереходной штамповки крышки из алюминиевого сплава АМг6, разработан-

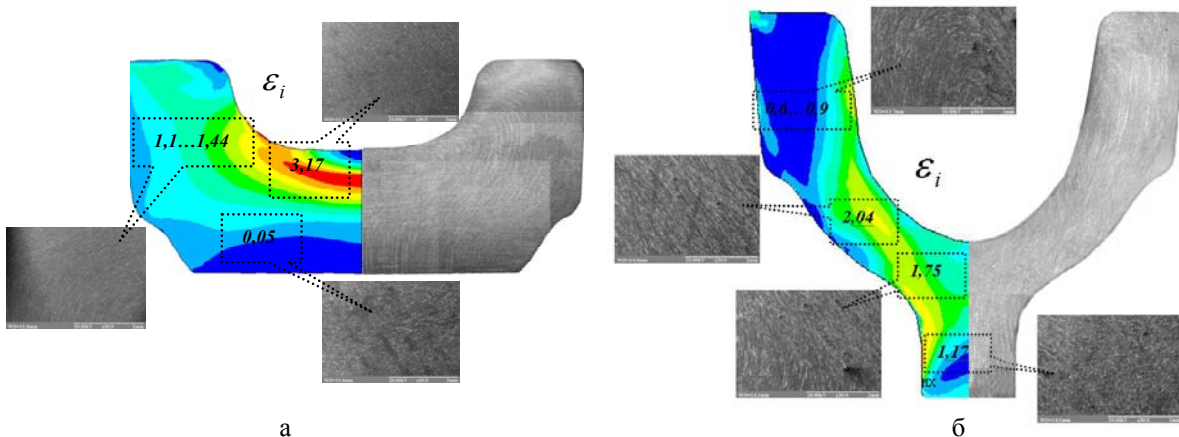


Рис. 6. Макроструктура (справа) и распределение интенсивностей деформаций (слева) поковки крышка: а – после первого перехода; б – после второго перехода штамповки

ной 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 поковок промежуточных переходов и конструктивных решений;

4) использовать исходную заготовку (пресованный 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)° для исключения запираения 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.

Список литературы

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. – 336 с.

5. 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. – 5-е изд. – К.: НИИАТ, 1977. – 56 с.

7. Исаченков Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением / Е.И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.

Поступила в редколлегию 24.10.2008

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

ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОПЕРЕХІДНОГО ШТАМПУВАННЯ КРИШКИ ГІДРОЦИЛІНДРА З ВИКОРИСТАННЯМ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В.В. Воронько, О.В. Шипуль

Проведено критичний аналіз серійної технології одержання поковки типу кришка гідроциліндра літального апарату (ЛА) й за допомогою розробленою авторами методикою встановлена можливість утворення внутрішніх розтріскувань. Запропоновано технологію штампування кришки зі сплаву Амгб у порожнині закритого штампа, що забезпечує не тільки істотне підвищення коефіцієнту використання матеріалу порівняно з облоїним штампуванням, але головне - високий ступінь опрацювання металу в зонах, що відповідають профілю чистої деталі. Визначено необхідну кількість переходів для одержання бездефектної поковки типу кришка. Проведено аналіз формозміни металу в порожнині штампа по переходах штампування й визначено максимальний ступінь використання ресурсу пластичності. Проведено оцінку потрібного зусилля штампування по переходах. Обґрунтованість запропонованої технології підтверджена проведенням фізичних експериментів. Проведено аналіз макроструктури за допомогою растрового електронного мікроскопа й вимір твердості отриманих поковок по Бринелю. На підставі проведених досліджень сформульовані технологічні рекомендації щодо гарячого багатоперехідного закритого штампування деталей ЛА відповідального призначення.

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

DESIGNING MULTISTAGE PUNCHING OF THE HYDROCYLINDER LID WITH THE USE OF NUMERAL SIMULATION

V.V. Voronko, O.V. Shipul

The critical analysis of serial technology of hydrocylinder's lid forging is conducted and in according to a method developed by authors the possibility of internal spalling formation is set. The multistage closed punching technology of lid from the alloy Amgб is offered. This technology provides not only the substantial increase of stock utilization ratio comparative with the burring punching, but main, high degree of workup metal in fit of clean detail areas. The necessary amount of transitions multistage closed punching for the receipt of defect-free forging type the lid is certain. The analysis of forming metal in the cavity of stamp on transitions of punching is conducted and the maximal feet of the plasticity's resource use is certain. Estimation of the required effort of punching on transitions is conducted. The validity of the offered technology is confirmed by conducting of physical experiments. The analysis of macrostructure by a raster electronic microscope and measuring of Brinell's hardness is carrying out. On the conducted researches basis the technological recommendations to the hotter multistage closed punching of details responsible setting are formulated.

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