

порошков / *Г.К. Жданович.* – Москва : Машиностроение, 1969. – 303 с. **4.** *Раковский В.С.* Порошковая металлургия в машиностроении : справочник / *В.С. Раковский, В.В. Саклинский.* – Москва : Машиностроение, 1972. – 126 с. **5.** *Іткін О.Ф.* Наукові основи розробки вібраційних машин для ущільнення цементобетонних сумішей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.05.02 «Машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій». – Харків, 2008. – 44 с. **6.** *Маслов А.Г.* Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве / *А.Г. Маслов, В.М. Пономарь.* – Київ : Будівельник, 1985. – 128 с. **7.** *Батуев Г.С.* Инженерные методы исследования ударных процессов / *Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов.* – Москва : Машиностроение, 1977. – 240 с.

УДК 621.735.2.043

ТАРАНЕНКО М.Е., докт. техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков
МАКОВЕЦКИЙ А.В., ассистент, НАКУ «ХАИ», Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК ИЗ АВИАЦИОННЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО И ПРИБЛИЖЕННЫХ К НЕМУ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Приведены возможности использования изотермической штамповки для получения качественных поковок с тонкими полотнами, тонкими и высокими ребрами. Предложено конечно-элементное решение задачи горячей объемной штамповки в штампах с дополнительными элементами формы. Выполнено решение для случая штамповки поковок П-образной формы из авиационного сплава типа В95. Проведен анализ полученных результатов.

Наведено можливості використання ізотермічного штампування для отримання якісних поковок з тонкими полотнами, тонкими і високими ребрами. Запропоновано скінчено-елементне рішення задачі гарячого об'ємного штампування у штампах з додатковими елементами форми. Виконано рішення для випадку штампування поковок П-образної форми з авіаційного сплаву типу В95. Проведено аналіз отриманих результатів.

The possibility of using isothermal forging to produce high-quality forgings with thin blades, thin and tall fins are given. A finite-element decision of the problem of open-die forging with a flash in dies with additional shape elements is offered. The decision for the case of forging П-shaped billets from aircraft alloy such as В95. Analysis of the results is carried out.

Свою актуальность вопрос разработки и исследования технологий изотермической штамповки приобрел в середине XX века с появлением жаростойких и жаропрочных инструментальных материалов. Изначально данная технология разрабатывалась и внедрялась на предприятиях авиационной промышленности, однако уже в 70-е годы XX века нашла свое применение на машиностроительных предприятиях [1].

Изотермическая штамповка представляет собой процесс горячего деформирования заготовок в штамповом инструменте, при котором заготовка и инструмент нагреты до температуры горячей штамповки материала. Устраненная

при этом потеря тепла заготовкой в штампе обеспечивает возможность медленной деформации при мягком, пластичном состоянии материала при относительно небольших усилиях деформации. Таким образом, появляется возможность изготовления поковок с тонкими фасонными элементами на относительно небольших прессах.

Изотермическая штамповка выполняется на тихоходных (в частности гидравлических) прессах, у которых значение перемещения траверсы не превышает 5 мм/сек. Так как штамповый инструмент нагревают приблизительно до той же температуры, что и заготовку, обычные инструментальные стали не могут быть использованы для изготовления штампов для штамповки в изотермических условиях из-за их недостаточной стойкости. Таким образом для штамповой оснастки могут применяться теплостойкие стали либо жаропрочные сплавы. Так, при изотермической штамповке алюминиевых сплавов рабочий инструмент изготавливают из теплостойких сталей марок 5ХНМ, 4Х5В2ФС и др. При изотермической штамповке титановых сплавов требуется термостойкость в диапазоне от 850 до 950 °С (рекомендуемый диапазон температур нагрева штампа вместо 370...430 °С, заданных по ТИ). Для такого диапазона применяют следующие материалы: высокотемпературные сплавы на основе никеля; металлы или их сплавы с высокой температурой плавления (молибден); керамические материалы.

Штамповка в условиях изотермического деформирования и приближенных к нему обладает рядом преимуществ перед традиционной горячей объемной штамповкой [1-3]. К ним следует отнести более равномерное распределение температуры по сечению поковки, меньшее значение потребного усилия деформирования, повышенную пластичность материала из-за более полного разупрочнения, однородность деформации.

Результаты приведенных в литературе работ [2,5] свидетельствуют о целесообразности применения для моделирования процессов горячей объемной штамповки специализированных программных продуктов для моделирования процессов ковки и объемной штамповки (QFORM, DEFORM, FORGE). Перечисленные системы основаны на широко используемом для исследования процессов обработки металлов давлением методе конечных элементов. В отличие от традиционных технологий проектирования технологических процессов, позволяющих получить результат с огромными затратами времени, материало- и энергоресурсов, компьютерное моделирование позволяет сделать это уже через несколько часов. При этом можно проследить за формоизменением материала заготовки, увидеть возможные дефекты, вызванные несовершенством конструкции оснастки или технологических параметров процесса, получить информацию о напряженно-деформированном состоянии заготовки и энергосиловых параметрах процесса.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование методом имитационного компьютерного моделирования процесса штамповки поковок П-образной в сечении и удлиненной в плане формы из труднодеформируемых алюминиевых сплавов типа В95 для отработки разрабатываемого

технологического процесса штамповки и уточнения расчетов конструкции штамповой оснастки.

Выбор объекта исследования обусловлен широким распространением в авиационных конструкциях (заготовки деталей типа балок, кронштейнов, фитингов). Возможность снижения веса в несколько раз при замене стальных деталей на алюминиевые и титановые, с сохранением показателей прочности и долговечности, позволили деталям из этих сплавов прочно утвердиться в составе узлов летательных аппаратов.

Трёхмерная модель типопредставителя таких деталей приведена на рис.1.

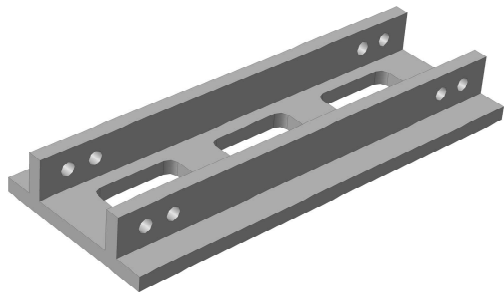


Рис.1. Трёхмерная модель детали

Получение поковки П-образной в сечении формы (поковки с тонкими полостями и тонкими и высокими ребрами) представляет значительную технологическую трудность. Неправильно выбранные соотношения геометрических размеров элементов поковки приводят в процессе штамповки к возникновению следующих дефектов: складок, зажимов, незаполнений и т.д. Для получения заготовок приведенных деталей методом горячей объемной штамповки авторами работы [6] Маковецким В.В. и Маковецким А.В. разработан способ штамповки в штампах с дополнительными элементами формы. Соответственно предложенному способу штамповки используется штамп, состоящий из двух ручьёв. При этом предварительный ручей штампа имеет гравюру, обладающую дополнительными (направляющими) выступами на верхней стороне гравюры, отвечающими полостям, формирующим оребрение. Скругленный профиль направляющего выступа позволяет изменить течения материала заготовки и обеспечивает преимущественное затекание металла в сторону ребер до выхода металла в облой. В окончательном ручье штампа происходит обжим образованных полостей в теле поковки, полученной в предварительном ручье штампа, с дальнейшей их переформовкой в готовую поковку.

Разработана конечно-элементная (КЭ) модель в которой, приложение нагрузки к заготовке моделируется путём задания перемещения вдоль вертикальной оси верхней половинки штампа за один шаг (процесс штамповки в предварительном ручье был разбит на 100 шагов, окончательном на 50). Начальная скорость движения инструмента задана равной 0,25 м/с. Температура нагрева под штамповку - 430 ± 20 °С (алюминиевый сплав типа В95). Установлено, что данная КЭ модель адекватно описывает напряженно-деформированное состояние поковки с точностью до 20 %. Проверка производилась путем сравнения расчетных данных с результатами эксперимента, приведенного в работе [4,7] и результатами теоретического расчета с использованием вариационного метода Треффца [6].

Ввиду того, что в разработанном технологическом процессе штамповки применяется штамп с двумя ручьями (предварительным и окончательным) и

таким образом совмещены две формоизменяющие операции, компьютерная модель разделена на две стадии, решаемые в программном пакете типа DEFORM последовательно с сохранением базы данных о напряженно-деформированном состоянии поковки в предварительном ручье.

Верхняя и нижняя часть штампа моделировались как жесткие тела (в виду малости деформаций штампа по сравнению с деформациями заготовки) Контактное взаимодействие заготовки с частями штампа моделируется кинематическим условием непроникновения, условием равенства нормальных сил на контактных поверхностях штампа и заготовки, касательной силой, обусловленной трением между контактирующими телами (коэффициент трения для случая горячей штамповки со смазкой $\mu=0,3$).

В ходе отработки задачи при появлении зон затруднённого деформирования металла программа в автоматическом режиме перестраивала сетку конечных элементов.

На рис. 2 приведена форма заготовки и распределение напряжений и деформаций в деформируемой заготовке в предварительном и окончательном ручье на окончательной стадии штамповки.

Результаты моделирования процесса штамповки в предварительном ручье штампа свидетельствуют о том, что материал заготовки полностью заполнил ручей штампа без дефектов формы, а выбранная ширина мостика облойной канавки позволила создать нужное сопротивление течению металла, и таким образом заполнить по высоте П-образные выступы и боковые вылеты полотна поковки до вытекания металла в облойную канавку.

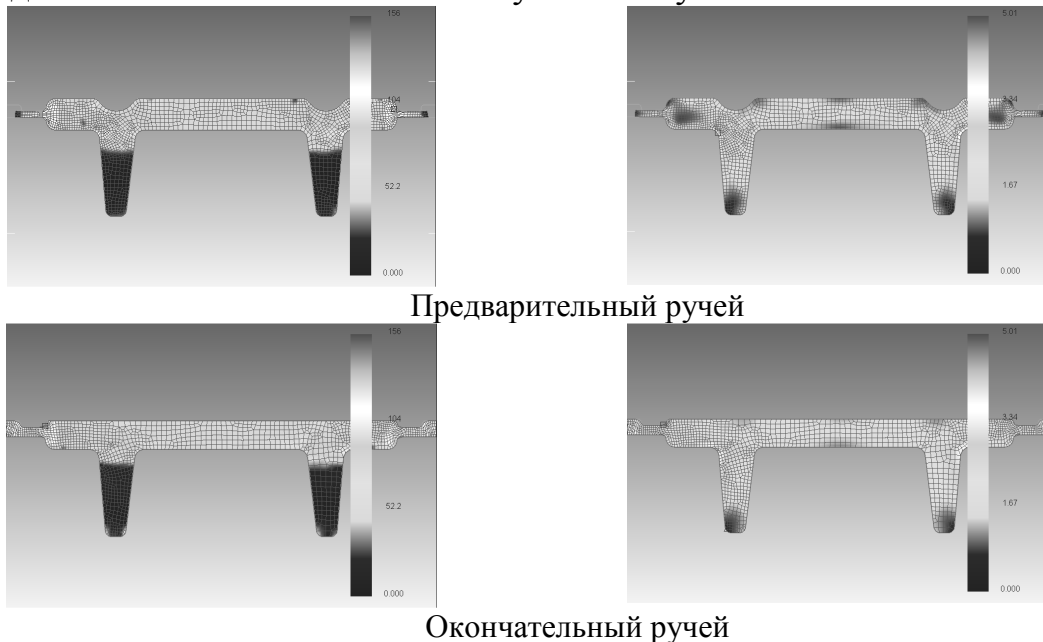


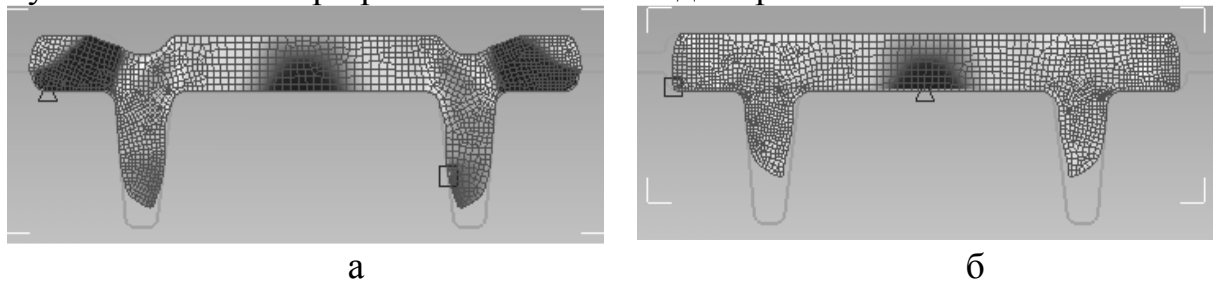
Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений (слева) и деформаций (справа) при моделировании штамповки поковки П-образной в сечении и удлиненной в плане формы

Распределение напряжений по телу поковки на окончательной стадии штамповки в предварительном ручье носит равномерный характер, кроме

незначительного роста значений в теле полотна до 80 МПа и в зоне, соответствующей дополнительным выступам на гравюре верхней части штампа – до 100 МПа. Максимального значения напряжения достигают в области мостика облойной канавки (до 120 МПа). Интенсивность деформаций по телу поковки при этом составляет и 0,8-2,2. Максимальные деформации распределены в области перехода полотна в П-образный выступ (значение интенсивности деформации от 2 до 2,6), что свидетельствует о проработке металла в этой области.

В окончательном ручье штампа происходит обжим образованных полостей в теле поковки, металл движется в сторону перпендикулярную оси симметрии поковки по направлению к облою. Таким образом, на окончательной стадии процесса мы формируем полотно поковки до заданной высоты, сформировав П-образные выступы на предварительной стадии. Результаты моделирования процесса штамповки в окончательном ручье свидетельствует о том, что материал заготовки полностью заполнил гравюру штампа, оформив заданную геометрию полотна и готовой поковки.

При моделировании процесса объемной штамповки поковок П-образной в сечении формы была подтверждена эффективность предложенного способа штамповки в штампе с дополнительными элементами формы. Анализ производился путем сравнения картины распределения скоростей частиц материала заготовки в штампе с направляющими выступами и в штампе с плоской формой гравюры верхней части штампа. На рис. 4 приведена промежуточная форма деформируемой заготовки и картина распределения скоростей частиц металла в штампе с разработанными дополнительными выступами и без них при равной величине хода верхней половины штампа.



Δ, □ – минимальное и максимальное значение

Рис. 3. Картина распределения скоростей частиц в теле поковки в штампе с разработанными дополнительными выступами (а) и без них (б)

Так в штампе со специально созданными выступами (рис. 3,а) скорость течения частиц металла растёт в направлении П-образного выступа (ребра), достигая наивысшего значения в его нижней части. Это позволяет оформить оребрение с заданной геометрией на предварительной стадии штамповки. При этом величина недоштамповки ребра по высоте в случае применения штампа с направляющими выступами в 2,5 раза меньше чем в штампе с плоской поверхностью при равной величине хода верхней части штампа. Анализ диаграммы (рис. 3,б) показывает, что в штампе с плоской формой гравюры верхней части штампа скорость течения частиц растёт в направлении к облою,

достигая максимального значения в области мостика облойной канавки, и металл не устремляется в ребро, тем самым не позволяя оформить ребро заданной формы без применения промежуточных переходов штамповки и увеличивая значение потребной энергии на стадии доштамповки.

В результате выполненного компьютерного моделирования процесса горячей объемной штамповки установлены размеры заготовки под штамповку, обеспечивающие заполнение ручья по высоте и образование облоя по схеме с наименьшими потерями металла – отношение ширины к высоте прямоугольной в сечении заготовки должно составлять $B_{заг} / H_{заг} = 0,8...0,9$.

Таким образом, проведенный анализ результатов целого ряда работ свидетельствует об эффективности применения метода горячей объемной штамповки в условиях изотермического и приближенных к нему деформирования для получения заготовок деталей сложной пространственной формы (в частности с вертикальным оребрением) из авиационных труднодеформируемых сплавов. Точный контроль процесса при изотермической штамповке обеспечивает получение поковок с однородными свойствами, что является наиболее важным фактором, определяющим качество готовой продукции в авиапромышленности.

При этом для отработки разрабатываемых технологических процессов штамповки и уточнения расчетов штамповой оснастки целесообразным является проведение имитационного компьютерного моделирования. Анализ результатов ряда модельных экспериментов на базе разработанных КЭ моделей показали, что при соответствии размеров подготовительного ручья теоретическим расчетам конструкции штамповой оснастки и разработанным рекомендациям, штамповка поковок в предварительном и окончательном ручье прошла без наличия дефектов, форма готовой поковки оформлена полностью.

Список литературы: 1. Фиглин С.З. Изотермическое деформирование металлов / С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю.Г. Калпин, Ю.И. Калпин – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с. 2. Петров П.А. Изотермическая штамповка алюминиевых и магниевых сплавов: моделирование технологических процессов / П.А. Петров // Материалы международной научно-технической конференции АПАИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». Книга 10, Москва, МГТУ «МАМИ», 2010 г., 139 с. С. 107-113. 3. Багмет М.Н. Изотермическое и сверхпластичное деформирование при горячей объемной штамповке жаропрочных сплавов / М.Н. Багмет, И.А. Жданов, С.К. Колтун, В.Н. Фандеев // Двигатели внутреннего сгорания 1'2004. С. 126-128. 4. Корнеев Н.И. Ковка и штамповка цветных сплавов: справочник / Н.И. Корнеев, В.М. Аржаков, Б.Г. Бармашенко и др. – М., «Машиностроение», 1971. – 232 с. 5. Шейнман Е.Л. Современная классификация и тенденции развития ОМД в США / Е.Л. Шейнман // Кузн. штамп. пр-во. М.: Машиностроение. -№4. -2007. –С.28-34. 6. Маковецкий В.В. К расчету процессов получения заготовок на основе метода Треффца / В.В. Маковецкий, А.В. Маковецкий // Вісник донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. праць. №2(4) – Краматорськ: ДДМА, 2006. – С. 132–137. 7. Полухин П.И. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия. 1983. – 352 с.