

УДК 519.245

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ В ПРОЦЕССЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Скobelева А.В., студентка гр. М6О-205БВ-23, II курс
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)"
г. Москва

Введение. Управление качеством продукции при изготовлении ответственных деталей двигателей современных летательных аппаратов, элементов крыла, фюзеляжа самолета, его оперения, элементов управления полетом и т.д. является наиболее важной задачей современного авиастроения. На второй план отходят даже вопросы снижения себестоимости изготовления продукции и сложности финансирования в современных условиях. Современная ситуация в Российской Федерации неминуемо приведет к необходимости расширения производства военной авиации, активизации производства гражданских самолетов, летательных аппаратов баллистического типа, беспилотных систем и т.д. Одним из элементов силового каркаса фюзеляжа самолета или другого летательного аппарата являются авиационные оребренные панели из алюминиевых сплавов. При проектировании авиационных панелей перед конструктором стоят две прямо противоположные задачи: с одной стороны необходимо максимально снизить вес конструкции, а с другой стороны – обеспечить ее повышенную жесткость и прочность. Для обеспечения этих двух задач рекомендуется использовать панели с высокими и массивными ребрами, при этом полотно панели должно быть достаточно тонким с тем, чтобы не утяжелять конструкцию. Существуют различные технологии получения панелей и обечаек с развитыми или относительно широкими ребрами. К таким процессам относятся: литье в металлическую охлаждаемую форму, механическую обработку, горячую объемную штамповку и т.д. Однако, механическая обработка характеризуется высокой трудоемкостью выполнения операций, высокой штучно-калькуляционной нормой и высоким уровнем отходов в виде металлической стружки [1]. Получение авиационных панелей методами литейного производства приводит к формированию в материале изделий крупнозернистой литой структуры, что отрицательно сказывается на прочностных характеристиках материала, а также возможному формированию внутренних усадочных пор, раковин, усадочных трещин, что недопустимо в материале деталей ответственного назначения. Наиболее оптимальными при производстве авиационных панелей из алюминиевых сплавов, с технологической и экономической точек зрения, являются методы обработки металлов

давлением и, в первую очередь, горячая объемная штамповка. Горячая объемная штамповка характеризуется минимальными нормами расхода основного материала, высокой производительностью, качественной проработкой литьей крупнозернистой дендритной структуры и т.д. [1, 2].

Исследование состояния вопроса. Из всех существующих технологических процессов получения авиационных панелей из алюминиевых и титановых сплавов в серийных масштабах наиболее прогрессивным является изотермическая штамповка. Наиболее сложной и актуальной проблемой при изотермическом деформировании является вопрос получения бездефектного изделия [3]. Наличие каких либо внутренних или внешних дефектов в теле ответственных деталей самолетов может работать как концентратор напряжений. При превышении действующих напряжений в материале изделия наличие концентратора напряжений, с большой долей вероятности, может привести к разрушению детали и, как результат, к катастрофе летательного аппарата.

Проблема формирования дефектов в теле авиационной панели определяется требованиями о необходимости снижения норм расхода основного материала при изготовлении детали. Актуальность этой проблемы определяется довольно высокой стоимостью основных материалов для изготовления изделий авиационной техники. Поэтому технологии постоянно пытаются снижать толщину исходной плоской плиты, из которой, методом изотермической штамповки, формируют деталь. Сложность проблемы заключается в том, что при определении оптимального процесса деформирования необходимо учитывать большое количество разнообразных факторов. Кроме того, мало изучен процесс течения металла при изотермическом формоизменении заготовок. Наиболее интенсивно на возможность получения бездефектного изделия влияют такие факторы, как исходная толщина заготовки, температура деформирования, скорость деформирования, геометрия получаемого изделия, радиусы закруглений штамповой оснастки и т.д. Для изучения процесса течения металла при изотермическом формоизменении заготовок довольно часто, помимо методов натурных испытаний, используют математическое моделирование с помощью различных программных сред, представленных на отечественном рынке [3]. Это такие программные продукты как Simufact Forming (разработчик компания "HEXAGON", Швеция), ANSYS (разработчик компания "ANSYS Inc", США), Квантормформ QForm (разработчик компания "Квантормформ", Российская Федерация), SIMULIA Abaqus FEA (разработчик компания "Dassault Systèmes", Франция), DeForm и т.д. В данных программах реализован метод конечных элементов, в котором непрерывная область исследований разбивается на некоторые сегменты (конечные элементы), в рамках которых и решаются задачи пластического формоизменения металла. Затем рассчитанные и смоделированные дискретные функции полей скоростей деформации, полей напряжений, температурных полей и т.д. в рамках этих ограниченных областей объединяются в одну непрерывную функцию [3]. Метод конечных элементов с точки зрения адекватности и достоверности прово-

димого моделирования хорошо зарекомендовал себя как в области изучения пластического формоизменения металлических полуфабрикатов [4, 5], так и проведении исследований в других направлениях [6].

Одним из видов деталей ответственного назначения при производстве летательных аппаратов различных типов являются оребренные авиационные панели, которые являются частью силового каркаса фюзеляжа авиационного изделия. Был проведен анализ существующих методов получения панелей и было установлено, что наиболее перспективным способом для получения панелей с продольным оребрением является прессование, а для получения панелей с продольно-поперечным или лучевым оребрением – изотермическая штамповка [7]. При получении таких панелей необходимо обеспечить полное отсутствие в теле панели таких дефектов как утяжини, зажимы, полости, внутренние пузыри и т.д., которые получаются в теле изделия при определенных условиях деформирования. Известно, что параметрами, влияющими на характер течения металла при силовом деформационном воздействии в условиях процессов обработки металлов давлением (например, при штамповке оребренных панелей или при прокатке) являются толщина исходной плоской заготовки, скорость воздействия деформирующего инструмента, скорость истечения металла (скорость деформации), температура деформации, соотношение скоростей деформационного наклена и разупрочнения [7, 8]. Следовательно, в рамках проводимого комплекса исследований необходимо изучить и проанализировать влияние всех вышеперечисленных факторов на характер течения металла в условиях изотермической штамповки. Также необходимо исследовать течение металла и в условиях сверхпластичности.

Методика проведения исследований. Исследовался процесс изготовления авиационных панелей установленных типоразмеров из наиболее распространенных отечественных алюминиевых (АМг6, 01420, В95) и титановых (ОТ-4, ВТЗ-1) сплавов. Химический состав исследуемых сплавов соответствовал требованиям ГОСТ 4784-2019 "Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки", ОСТ 1.90048-90 "Сплавы алюминиевые деформируемые. Марки", ОСТ 190013-71 "Титановые сплавы. Марки". Изотермическую штамповку проводили в специально изготовленной штамповой оснастке на вертикальном гидравлическом прессе усилием 1568 кН (160 тс). Также горячую изотермическую штамповку и штамповку в состоянии сверхпластичности проводили в специальной термокомпрессионной установке по методике, изложенной в [9]. Температура штамповки варьировалась для алюминиевых сплавов в диапазоне 350-550 °C, для титановых сплавов – в диапазоне 800-950° C. Управление скоростями деформирования проводили с помощью алгоритмов, заложенных в автоматизированную систему управления и подробно рассмотренных в [10]. Исследование глубины залегания дефектов и микроструктуры образцов проводилось визуальным методом на оптическом микроскопе Olympus GX-51. Математическое моделирование характера пластического течения металла проводилось с помощью программной среды

"Кванторм QForm" российского разработчика с использованием реализованного в ней метода конечных элементов [7, 9, 11].

Полученные результаты и их обсуждение. При проведении исследований наиболее важной задачей ставилось определение диапазона толщин исходной заготовки для гарантированного получения бездефектного изделия. На рис. 1 представлен характерный вид фрагмента исследуемой оребренной авиационной панели.

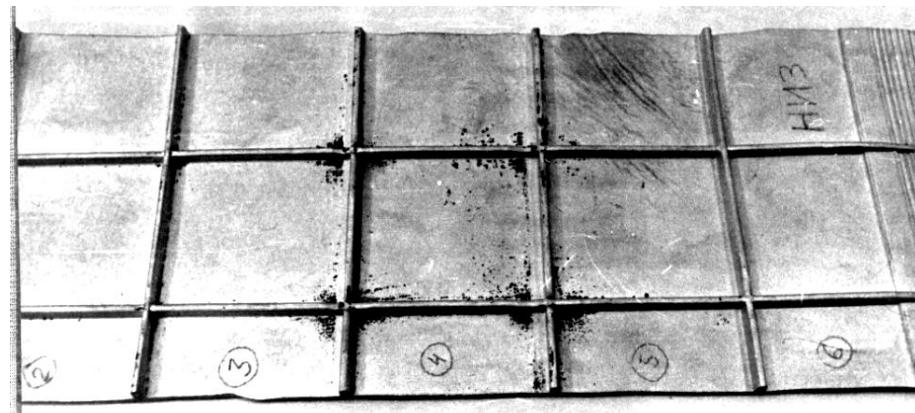


Рисунок 1 – Характерный вид фрагмента исследуемой оребренной авиационной панели

Было проведено математическое моделирования характера течения металла при оформлении сложного изделия. Был определен характер течения металла с целью получения бездефектной панели. Для всех сплавов были определены оптимальные температурно-скоростные условия деформирования, обеспечивающие получение изделия без дефектов. Определено, что наиболее существенно на изменение характера течения металла оказывает скорость деформирования. Как показали результаты математического моделирования (рис. 2) при уменьшении скорости течения металла (V) течение становится более равномерным, металл как бы прижимается к стенке реберной части внутренней полости штамповой оснастки и это оказывает дополнительное воздействие, в виде сил трения, препятствующее отрыву металла заготовки от подреберной части штампа. Всё это препятствует образованию утяжин и пор в результате потери устойчивости материалом изделия в условиях постоянной температуры процесса (T). Таким образом, были определены температурно-скоростные параметры, обеспечивающие высокое качество получаемой продукции и гарантированно исключающие образование в теле изделий дефектов в виде зажимов, утяжин, внедренных окисных пленок и т.д. Проведенные эксперименты по реальной изотермической штамповке панелей и штамповке в состоянии сверхпластичности показали высокую сходимость с результатами математического моделирования (рис. 3).

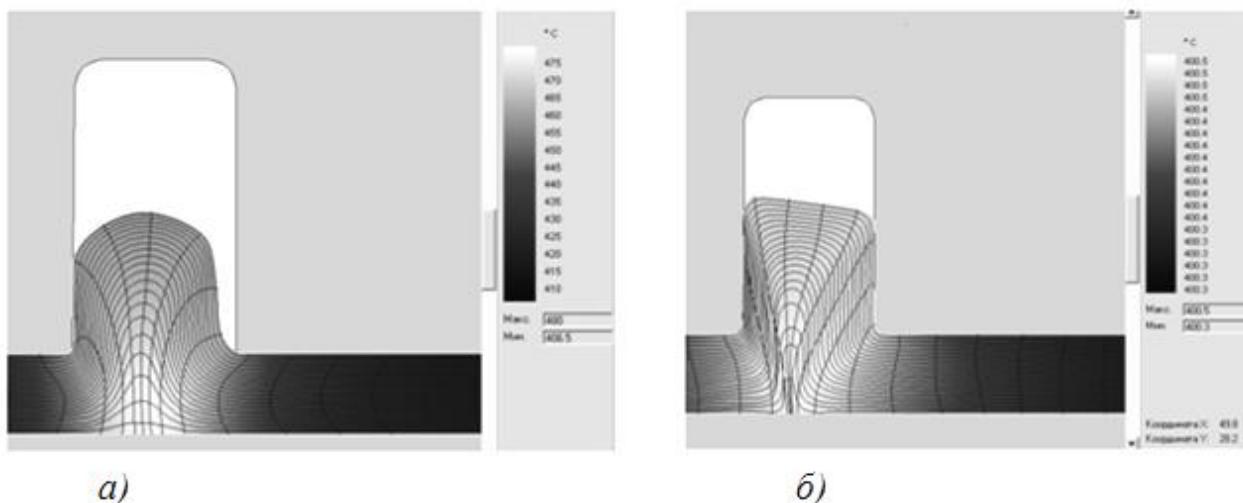


Рисунок 2 – Сравнительный анализ характера течения металла при формировании ребра (материал – алюминиевый сплав АМг6; температура деформации – 400 С): *а)* скорость деформирования (скорость движения инструмента $W \approx 2,0$ мм/с; *б)* скорость деформирования $W \approx 0,1$ мм/с.

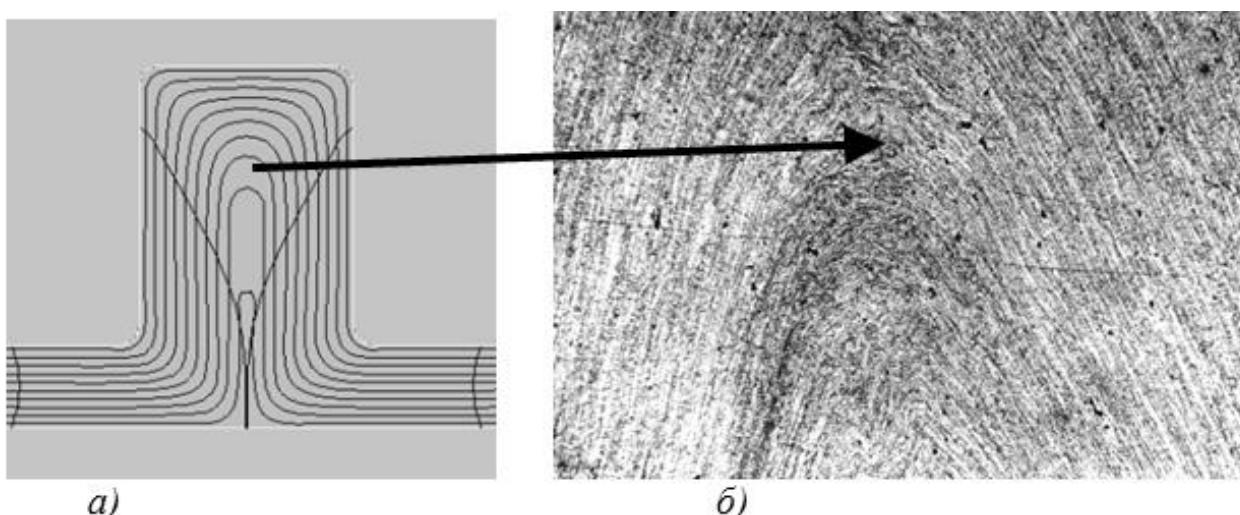


Рисунок 3 – Характер течения металла при формировании ребра (материал – алюминиевый сплав АМг6; температура деформации – 400 С): *а)* модель, рассчитанная в программе "Кванторметр QForm"; *б)* микроструктура образца после реальной штамповки

В результате проведенных исследований удалось установить, что для получения бездефектного изделия (тонкостенной панели практически любой конфигурации с толщиной полотна от 1 до 5 мм) в условиях изотермического деформирования, толщина исходной заготовки должна определяться по следующей эмпирической формуле:

$$S_0 = (\alpha \cdot T + \beta \cdot W) \cdot S_{\text{кон.}} \quad (1)$$

где $S_{\text{кон.}}$ – окончательная толщина полотна панели, мм;

T – температура процесса изотермической штамповки, °С;

W – скорость движения деформирующего инструмента, мм/с;

α, β – эмпирические коэффициенты, определенные для каждого конкретного сплава и конкретных режимов процесса деформирования.

При расчете по вышеприведенной зависимости можно определить минимальную толщину исходной заготовки, которая будет гарантировать получение качественного изделия при минимальных затратах материала. Это условие характерно как для сплавов склонных, так и не склонных к деформированию в состоянии сверхпластичности. Дать однозначный ответ о влиянии эффекта сверхпластичности алюминиевых сплавов на характер течения металла при формировании авиационных панелей на данном этапе исследований не представляется возможным. С одной стороны сверхпластичность облегчает заполнение полости штампа металлом, с другой – обеспечивает потерю пластичности путем образования складки металла при более больших значениях толщины полотна.

При поведении всего комплекса исследований также было выполнено имитационное моделирование работы участка изотермической штамповки авиационных панелей. В качестве прикладной программы для ситуационного моделирования применялась среда имитационного моделирования AnyLogic 6.3.1 отечественного разработчика, которая зарекомендовала свою высокую адекватность при проведении исследований подобного рода [12]. Несмотря на наличие на рынке программ имитационного моделирования производственных процессов других программных продуктов [13], примененная программа AnyLogic 6.3.1 нашла широкое применение при выполнении симуляции процессов в машиностроении [12]. Данная программа позволяет моделировать различные процессы деформационной и механической обработки, операции нагрева и складирования полуфабрикатов, позволяет определять пути движения материальных запасов и полуфабрикатов, а также определять межоперационные запасы между двумя соседними технологическими операциями [14].

По результатам выполненного имитационного моделирования работы участка изотермической штамповки в прикладной программе AnyLogic 6.3.1 была определена оптимальная схема размещения производственного оборудования, определена потребность в основном оборудовании, синхронизирована работа оборудования, создана схема движения сырья, материалов и полуфабрикатов, обеспечивающая минимальные уровни запасов перед операциями технологического процесса.

Заключение. В результате всего проведенного комплекса исследований были оптимальные параметры технологических процессов изготовления бездефектных авиационных панелей, определены основные показатели технологических операций, проведены эксперименты на натуральных образцах на предмет определения соответствия результатам математического моделирования. Расхождения количественных параметров результатов математического моделирования и результатов реальных экспериментов составили 3-5

%, что укладывается в рамки стандартной статистической погрешности при проведении научных исследований.

Список литературы:

1. Братухин А.Г. Технологическое обеспечение высокого качества, надежности, ресурса авиационной техники. В 2-х т. Т. 1. М.: Машиностроение. – 1996. – 524 с.
2. Бойко С. В., Ларичкин А. Ю. Обратная задача формообразования оребренной панели // Прикладная механика и техническая физика. – 2023. – Т. 64. – № 3 (379). – с. 216-226. doi: 10.15372/PMTF202215214.
3. Жаров М. В. Анализ характера течения металла при изготовлении авиационных панелей из различных групп алюминиевых сплавов методами изотермической штамповки // Физика и химия обработки материалов. – 2024. – № 1. – с. 41-52. doi: 10.30791/0015-3214-2024-1-41-52.
4. Петров М.А., Петров А.Н. Конечно-элементное моделирование процесса комбинированного выдавливания сдвигом для изготовления поковки "Ниппель" // Технология металлов. – 2022. – № 7. – с. 54-64. Doi: 10.31044/1684-2499-2022-0-7-54-64.
5. Durga Rajesh K. V., Mishra H., Buddi T. Finite element analysis of chromium and molybdenum alloyed steel billets forged on multi step process using Simufact Forming. Advances in Materials and Processing Technologies. – 2021. – V. 8 (sup. 3). – pp. 1260-1274. doi: 10.1080/2374068X.2021.1939562.
6. Адхиари Б. Р., Саху А., Бхаттачарья П. Связанная виброакустическая модель неоднородных композитных панелей, обтекаемых турбулентным течением пограничного слоя, на основе методов конечных и граничных элементов с использованием разложения Холецкого // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64. № 6 (382), с. 210-225. Doi: 10.15372/PMTF202215231.
7. Жаров М. В. Исследование течения металла при изотермической штамповке авиационных панелей и обечаек с целью повышения качества изделий // Вестник машиностроения. – 2024. – Т. 103. – № 2. – с. 120-124. doi: 10.36652/0042-4633-2024-103-2-120-124.
8. Kumar A., Rath S., Kumar M. Simulation of plate rolling process using finite element method // Materials Today Processes. – 2021. – N 42. – pp. 650-659. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.050.
9. Жаров М. В. Исследование механизмов формирования дефектов, возникающих при изготовлении оребренных авиационных панелей и обечаек // Цветные металлы. – 2024. – № 2. – с. 60-67. doi: 10.17580/tsm.2024.02.07.
10. Жаров М.В., Преображенский Е.В. Контроль технологических параметров процесса штамповки оребренных панелей: использование средств измерений и численного моделирования // Измерительная техника. – 2023. – № 10. – с. 41-48. doi: 10.32446/0368-1025it.2023-10-41-48.

11. Rihacek J., Peterkova E., Cisarova M., Kubicek J. Comparison of FEM and FVM for the numerical simulation of forging process // MM Science Journal. – 2020. – pp. 3734-3739. doi: 10.17973/MMSJ.2020_03_2019151.
12. Жаров М.В. Исследование перспектив применения программных средств имитационного моделирования при разработке и оптимизации производств машиностроения // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2021. – № (54). – с. 58-67. doi: 10.17072/1993-0550-2021-3-58-67.
13. Лаптева Е.В., Лекарева Ю.С., Уманский С.С. Имитационное моделирование производственных процессов в среде Flexsim // Вестник Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. – 2023. – Т.20. – № 2 (128). – с. 16-23.
14. Жаров М.В. Моделирование оптимизации для организации производств цехов машиностроения в программной среде AnyLogic // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2020. – № 71. – с. 151-161. doi: 10.21667/1995-4565-2020-71-151-161.