# Проектирование язычковых матриц с помощью математической формулировки

**Ключевые слова:** Прессование, прессование алюминия, проектирование матрицы, полый профиль, питатель

# Аннотация

Математический подход к решению проблемы проектирования язычковых матриц основан на статистическом анализе большого объема геометрических данных успешных конструкций язычковых матриц. В сотрудничестве с ведущей экструзионной компанией было проанализировано значительное количество экструзионных матриц. Все они были изготовлены из стали H-13, а материалом заготовки во всех случаях был алюминий 6063. Линейная и логарифмическая регрессия использовались для анализа геометрических данных 596 различных питателей 88 опытных матриц. Несущественные переменные или переменные с высокой корреляцией отброшены в соответствии со знанием процесса экструзии и статистических критериев. Таким образом, эта математическая формулировка является способом обобщения в одном выражении опыта, накопленного в большом количестве проектов с течением времени. Кроме того, он может быть использован в качестве инструмента, помогающего создать отправную точку для проектирования матриц высокой сложности, чтобы сократить количество итераций моделирования методом конечных элементов с последующей модификацией для достижения оптимального решения. Это предназначено не для того, чтобы исключить использование моделирования методом конечных элементов, а для того, чтобы помочь ускорить и улучшить задачу проектирования матрицы. Эта статья посвящена валидации модели типичной конструкции матрицы для алюминиевого сплава серии 6xxx: четыре канала и четыре питателя на канал. Открыт широкий путь исследований для обобщения этой модели или распространения ее на другие типы штампов для иллюминаторов.

# Вступление

В настоящее время применение алюминиевых профилей становится все шире и шире в различных областях из-за их превосходных физических свойств. Прямое прессование алюминия — это сложный процесс деформации металла, включающий деформацию формы, теплопередачу и сложное состояние трения [1]. Производительность, эффективная стоимость и качество экструдированных профилей являются основными коммерческими факторами. Эти три фактора напрямую связаны с производительностью экструзионной матрицы. Кроме того, существуют некоторые другие факторы, такие как характеристики экструзионного пресса, качество материала заготовки, возможности вспомогательного оборудования и последние операции, такие как старение, покраска, анодирование… Из-за очень точных допусков, специального материала и высоких требований к термомеханическим усталостным характеристикам, матрица, вероятно, является наиболее важным компонентом экструзии [2].

Экструзия полых профилей - вполне обычный промышленный процесс, осуществляемый с использованием так называемых язычковых матриц. Последние состоит из двух частей, а именно рассекателя и матрицы. Поясок, являющийся формирующим элементом профиля, находится на обеих этих частях. При производстве полых профилей, поясок матрицы формирует внешний контур профиля. Аналогичным образом, внутренние полости профиля формируются пояском рассекателя. Для того, чтобы позволить алюминию течь от поверхности рассекателя, контактирующей с заготовкой к пояскам, в рассекателе фрезеруются так называемые питатели. Стальные зоны рассекателя между питателями называются перемычками. Таким образом, функция питателей заключается в том, чтобы позволить алюминию течь через матрицу, в то время как функция перемычек заключается в фиксации положения иглы рассекателя. В процессе экструзии поток алюминия разделяется перемычками и проталкивается через питатели. После прохождения перемычек, поток алюминия должен снова свариваться вместе в сварочной камере. Сварка происходит в твердом состоянии при надлежащем давлении и температуре [3].

Традиционный способ проектирования экструзионных матриц основан на аналогиях и аналогичном опыте предыдущего проектирования. Численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) может быть использовано для процесса экструзии алюминия, но применение такого рода расчетов в экструзионной промышленности ограничено из-за высокой сложности [1].

Эмпирический подход к проектированию - еще один популярный способ проектирования экструзионных матриц. За последние годы было предложено и изучено множество правил проектирования и формул. Некоторые авторы затрагивают конкретные вопросы, такие как: длина пояска и компоновка [4], конструктивные факторы и рекомендации по проектированию длины пояска [5].

Изучая научную литературу, можно обнаружить, что за последние годы было представлено мало новых работ, касающихся конкретно основ проектирования язычковых матриц. В некоторых статьях представлены базовые рекомендации для различных аспектов проектирования язычковых матриц, но это лишь общие рекомендации.

Некоторые из наиболее важных докладов публикуются раз в два года ICEB (Международная конференция по экструзии и бенчмарку). Это мероприятие, на котором эксперты в области экструзии алюминия объединяются, чтобы проверить повышение точности моделирования FEM для оптимизации процесса, а также для того, чтобы поделиться знаниями по этому вопросу. Для этих целей для каждого мероприятия разрабатывается своя матрица: в 2007 году основное внимание уделялось проектированию канала [6], в 2009 году - влиянию деформации язычка при прессовании U-образных профилей [7], в 2011 году для экструзии полых профилей использовались различные стратегии балансировки питателей [8], в 2013 году экспериментальные исследования были направлены на прогнозирование последствий деформации рассекателя [9], в то время как в 2015 году было исследовано влияние формы пояска (прямой, закругленный или наклоненный) и его длины [10].

Использование моделирования методом конечных элементов для проектирования экструзионных матриц является впечатляющей возможностью для экструдеров и производителей инструмента. Коммерческие пакеты программного обеспечения предоставляют удобный пользовательский интерфейс и предлагают широкий спектр результатов: различия в скорости истечения профиля, отклонения инструмента, напряжение инструмента и температуре профиля. Возможность внесения изменений в конструкцию штампа без испытаний на прессе экономит много денег и времени. Одним из недостатков использования МКЭ-моделирования является необходимость привлечения экспертов по моделированию для правильной подготовки расчета и последующего анализа. В зависимости от сложности, подготовка и анализ могут занять часы или дни, без учета времени, затраченного на численный расчет. Таким образом, это снижает привлекательность моделирования МКЭ для процессов экструзии из-за увеличения времени проектирования, дополнительных затрат на программное обеспечение и дополнительных затрат на персонал [11].

Учитывая трудности и затраты на моделирование МКЭ, в данной статье предпринята попытка предложить проектировщику математический инструмент, который поможет в успешном определении размеров питателей экструзионных штампов. Неправильные геометрические свойства отверстий (площадь, положение...) являются наиболее важным источником серьезных проблем при экструзии язычковых матрицах, что может привести к большому прогибу прессуемого профиля или большим боковым смещениям рассекателя и изменениям толщины профиля.

Как уже упоминалось, существует множество статей, предлагающих принципы проектирования, рекомендации по проектированию матриц и некоторые конкретные формулы для определения некоторых конкретных элементов язычковых матриц. Но ни один из них не обеспечивает структурированную и точную формулировку, облегчающую проектирование питателей и определение конструктивных размеров язычковых матриц. Вероятно, в промышленном мире у некоторых крупных компаний и известных производителей матриц есть какие-то подобные инструменты, помогающие инженеру-конструктору в определении геометрии питателей, но все эти знания являются ноу-хау, и по этому вопросу нет никаких публикаций.

Можно обобщить, что для получения оптимальной конструкции язычковой матрицы необходимо обеспечить: механическую стойкость всех деталей матрицы и равномерную скорость истечения алюминиевого профиля в процессе экструзии. Расчеты сопротивления позволяют гарантировать оптимальные механические свойства. Принципиальными переменными проектирования, необходимыми для достижения равномерной скорости истечения металла в язычковых матрицах являются: геометрия сбалансированных питателей для обеспечения равномерного течения алюминия в сварочной камере, оптимальная конструкция сварочной камеры [12] и длины поясков в зависимости от толщины профиля и его положения в матрице.

Тем не менее, определить сбалансированные питатели не так просто, поскольку распределение скоростей внутри алюминиевой заготовки неравномерно. Из-за трения между заготовкой и стенкой контейнера, давление алюминия [13] и концентричного распределения скоростей на переднем конце заготовки, ее максимальная скорость находится в центре, а минимальная - во внешней зоне).

Новый инструмент, представленный в этой работе, предназначен для использования в качестве окончательной помощи при проектировании для определения геометрии сбалансированных питателей в простых или средних язычковых матрицах. Кроме того, он может быть использован в качестве отправной точки для проектирования язычковых матриц высокой сложности, чтобы сократить количество итераций моделирования для достижения оптимального решения.