

# Алюминиевые детали объемной штамповки для подвижного состава

**Применение алюминиевых деталей объемной штамповки и компонентов конструкций подвижного состава способствует снижению его массы и общих затрат на изготовление. В последние годы значительно расширились возможности изготовления деталей методом объемной штамповки, к тому же были разработаны новые сплавы, упрочняемые методами термообработки. Следует отметить, что технология объемной штамповки обеспечивает большие преимущества только в тех случаях, когда ее специфические особенности и возможности применительно к конкретной детали учтены в общей концепции еще в начальной стадии разработки.**

К облегченным конструкциям подвижного состава предъявляются повышенные требования. В создании легкого и одновременно приемлемого по стоимости подвижного состава алюминиевые сплавы играют ключевую роль. Для изготовления высоконагруженных компонен-

тов кузова широко используют различные деформируемые сплавы, особенно серии 6000, которые также широко применяются в автомобиле- и самолетостроении.

Для нагруженных узлов подвижного состава наиболее пригодны сплавы AlMgSi, имеющие значи-

тельную прочность. При высокой статической и динамической прочности в термообработанном состоянии, высокой пластичности и вязкости эти сплавы по коррозионной стойкости превосходят такие, как AlCuMg, AlZnMg и AlZnMgCu. Создание алюминиевых деталей методом объемной штамповки показано далее на примере узла сочленения вагонов электропоезда FLIRT (рис. 1).

## Свойства алюминиевых деталей, изготовленных методом объемной штамповки

### Характеристики материала

Степень деформирования материала в процессе изготовления детали в решающей степени определяет ее механические свойства. Если требуемую степень деформирования не удастся обеспечить объемной штамповкой вследствие сложности геометрической формы детали, необходимо предварительно обработать заготовку.



Рис. 1. Электропоезд FLIRT производства компании Stadler Rail

Таблица 1

Сравнение основных характеристик объемно прессованных деталей

Сплав / состояние	Значение параметра	Положение образца	Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup>	Прочность на растяжение, Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение при разрыве, мм	Амплитуда напряжений при N = 10 и R = -1
AlMgSi/F31	Согласно DIN 1749	L	260	310	6	-
	Согласно DIN 17606	T	250	290	5	-
AS10.62 (AlMgSi/T6)	Минимальное измеренное	L	305	330	13	120
		T	270	310	10	-
AS28.62 (AlMgSi/T6)	Гарантированное	L	350	380	8	-
	Минимальное измеренное	L	396	419	13	170

Примечания. 1. Приведены значения параметров для алюминиевых деталей, выполненных методом объемной штамповки, с толщиной стенки до 100 мм.

2. Приняты следующие обозначения: L — параллельно направлению волокон и перпендикулярно направлению объемной штамповки; T — непараллельно направлению волокон; N — число циклов нагружения; R — отношение напряжений (R = -1 соответствует знакопеременной нагрузке).

В табл. 1 приведены механические свойства некоторых выбранных сплавов. Достигаемые значения показателей зависят от толщины стенки детали, а значит, от скорости охлаждения при термообработке. При толщине до 100 мм можно всегда получить требуемую прочность.

В настоящее время обсуждается проект стандарта EN 13981-4, который дополнительно к стандарту EN 586-2 определяет механические свойства и особенно усталостную прочность в рамках технических условий поставок алюминиевых деталей объемной штамповки для несущих конструкций подвижного состава. Размеры деталей, однако, как правило, выбирают, ориентируясь на значения прочности, полученные

экспериментально на образцах, соответствующих специфике деталей. Эти значения обычно значительно выше приводимых в названных стандартах. Если надежные экспериментальные данные отсутствуют, то для подтверждения правильности выбранных размеров можно использовать значения, приведенные в документе Eurocode 9 (1989).

*Исходные параметры конструирования*

Контур штампуемой детали определяют следующие условия, которые необходимо учитывать при конструировании:

- внутренние стенки штампа должны иметь угол наклона около 3 град;

- плоскость разъема штампа определяется назначением детали;

- минимальные внутренние радиусы составляют 12 – 30 мм, а в углублениях могут быть большими;

- минимальные возможные наружные радиусы составляют примерно 10 мм для рассматриваемых далее крупных деталей, а для меньших — соответственно меньше;

- минимальная толщина стенки в направлении усилия штамповки в одноступенчатом штампе равна примерно 25 мм. Многоступенчатая объемная штамповка позволяет получать более тонкие стенки, однако этот процесс значительно дороже;

- минимальная толщина стенки в направлении, перпендикулярном усилию штамповки, должна составлять не менее одной трети глубины;

- желобообразные углубления могут быть выполнены при соотношении глубины к ширине 1:1;

- допуски в направлении усилия штамповки устанавливаются в зависимости от размеров детали; для рассматриваемых далее крупных деталей они находятся в диапазоне от 3 до -1,5 мм;

- допуск на плоскостность составляет ±(1 – 2) мм;

- припуск на обработку дается до 5 мм;

- допуски в направлении, перпендикулярном направлению штамповки, для рассматриваемых деталей составляют ±0,9 мм, но не более 0,3 % ширины;

- максимальное смещение штампа допускается не более 1,5 мм в зависимости от размера детали;

- максимальные размеры детали зависят от типоразмера применяемого пресса. В Европе объемной штамповкой изготавливают детали длиной до 3100 мм.

Другие параметры деталей приведены в табл. 2.

При экономичной конструкции контур отштампованной детали близок к ее конечному геометрическому очертанию, оптимальному для данного узла. Механическую

Таблица 2

Сопоставление характеристик объемно штампованных деталей

Деталь	Основные размеры, мм	Стоимость, евро		Масса, кг		Степень механической обработки, %
		заготовки	штампа	заготовки	детали	
Элемент крепления шарнира	830×440×295	1320	46 000	90,7	59,3	35
Корпус узла сочленения	850×490×415	1435	75 000	129,7	106,9	18

обработку штампованной заготовки по экономическим соображениям необходимо снижать до минимума. Оптимальный контур алюминиевой детали, изготовленной объемной штамповкой, определяют следующие факторы:

- исходные параметры конструирования: наклон внутренних стенок штампа, внутренние и наружные радиусы, минимальная толщина стенки, допуски, общие размеры;
- минимизация механической обработки: затраты на металл, стоимость обработки;
- свойства готовой детали;
- функциональные качества детали: сопряжение, крепление, прочность, долговечность;
- граничные условия: занимаемая площадь, желаемая масса.

#### *Преимущества алюминиевых деталей, изготовленных объемной штамповкой*

Достоинства алюминиевых сплавов при достигнутых в настоящее время их механических показателях заключаются прежде всего в возможности изготовления деталей, масса которых ниже, чем стальных. Это относится как к сварным, так и литым деталям.

Кроме того, по сравнению со сварной конструкцией из стали достигается значительное ценовое преимущество в том случае, если при объемной штамповке получается алюминиевая деталь конечной геометрии, не требующая при этом дорогостоящих дополнений, например приварки ребер жесткости.

Алюминиевые детали объемной штамповки по сравнению с литыми имеют следующие важные достоинства:

- высокое качество микроструктуры;
- большое разрывное удлинение;
- значительную вязкость при разрушении;
- высокую усталостную прочность;

• безопасность технологии изготовления.

Вместе с тем следует отметить, что путем литья можно получить алюминиевые полые детали меньшей стоимости.

По сравнению с деталями из стали и алюминия, полученными фрезерованием, алюминиевые детали объемной штамповки имеют преимущество в том случае, если их контур близок к заданному, так как при этом высокие затраты на саму деталь и штамп компенсируются экономией, достигаемой в результате отсутствия механической обработки и снижения массы заготовки.

Обычно фрезерованием алюминиевые детали изготавливают из проката, поэтому их размеры ограничиваются толщиной исходных листов, которая гарантирует приемлемые механические свойства. Для сплавов состава AlMgSi эта толщина термообработанного листа составляет 150 мм. У листов из сплава AlMg4.5Mn предел текучести 110 Н/мм<sup>2</sup> достигается при толщине 40–50 мм (состояние от мягкого до наклепа).

Алюминиевые детали объемной штамповки могут быть выполнены значительно больших размеров. Благодаря высокой степени деформирования и последующей термообработке достигается высокая прочность таких деталей. К тому же сплавы серии 6000 и особенно сплав AlMgSi обладают высокой коррозионной стойкостью.

Заготовки из сплавов серии 7000, предназначенные для фрезерования, имеют очень большие размеры и хорошую прочность, но значительная часть материала идет в стружку. Для использования в железнодорожном подвижном составе они непригодны из-за низкой коррозионной стойкости. Кроме того, детали из сплава AlMgSi, выполненные фрезерованием, склонны к разрушению, вызываемому расслоением металла. У алюминиевых деталей объемной штамповки такой склонности нет.

#### **Шарнирное соединение кузовов сочлененного регионального поезда**

В пассажирском пригородном и высокоскоростном движении все чаще применяют сочлененные поезда. В таких поездах предъявляются повышенные требования к узлам сочленения кузовов в отношении занимаемого ими объема, статической и динамической структурной прочности, а также подвижности. Все это должно быть обеспечено при минимально возможной массе и низких затратах на производство. Шарнирное соединение передает продольные силы тяги и торможения, а также одновременно создает возможность относительных перемещений вагонов.

Продольная сила сжатия достигает 1500 кН. Она должна распределяться по относительно большой поверхности алюминиевого кузова вагона, так как узел сочленения частично приварен и допускает соответственно низкие напряжения. Кроме того, узел сочленения служит опорой для концевых частей двух вагонов, которые таким образом поддерживаются общей тележкой Якобса. В данном случае речь идет о сочлененном моторвагонном поезде FLIRT пригородного сообщения с низким уровнем пола, разработанном компанией Stadler Rail.

Центральным элементом узла сочленения является расположенная поперечно шарнирная опора с горизонтальным валом и эластомерным основанием. Эластомер получен на базе натурального каучука. Этот узел должен передавать возникающие нагрузки, которыми обусловлена величина диаметра вала. В зависимости от величины нагрузки выбирают общую геометрию опоры и устанавливают ограничения размеров основных крупных деталей соединения — корпуса узла сочленения и несущего элемента крепления.

Узел шарнира запрессован в несущий элемент. Вал имеет кинема-

техническое соединение с корпусом через U-образный паз. С помощью двух стальных скоб и тарельчатых пружин он фиксируется в этом углублении. Скобы крепятся болтами к корпусу.

### Конструирование

Узел сочленения нужно было разместить в ограниченном пространстве, чтобы не поднимать уровень пола в межвагонном переходе. Более того, между этим узлом и нижней частью перехода нужно было смонтировать защитное суфле. Снизу и с обоих боков монтажное пространство ограничено тележкой. К тому же узлы сочленения желательно было сделать как можно более короткими, поскольку их длина влияет на общую длину поезда. Разработать шарнирное соединение, размещаемое в таком пространстве, было достаточно сложно.

Узел сочленения должен выполнять следующие функции:

- соединять между собой кузова двух вагонов;
- обеспечивать возможность их поворота относительно всех осей;
- воспринимать движения шарнирного узла;
- передавать нагрузки между кузовами вагонов;
- передавать нагрузки от тележки и на тележку;
- обеспечивать возможность монтажа, технического обслуживания и демонтажа, включая расцепление вагонов;
- давать возможность удобной и быстрой замены изношенных деталей, особенно эластомерной опоры, в течение всего срока службы (8 лет).

Основной задачей при конструировании была минимизация общей массы поезда и, следовательно, шарнирного соединения. Федеральные железные дороги Швейцарии (SBB), выступившие в качестве заказчика, оговорили в контракте право требовать с разработчика неустойку за превышение

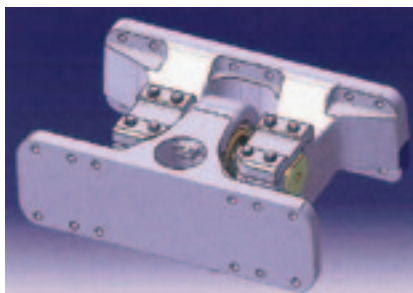


Рис. 2. Узел межвагонного сочленения поезда FLIRT в сборе

максимальной массы, указанной в техническом задании.

Одновременно требовалось минимизировать и общие затраты на разработку и изготовление поездов. Последнее достигалось снижением числа изготавливаемых и сопрягаемых между собой деталей. По этой причине при разработке концепции была принята идея интегрировать шкворни подерживающих тележек в узлы сочленения. Для этого корпус сочленения и шкворень штамповали из одной заготовки.

**Концепция.** Для изготовления обеих главных деталей шарнирного соединения, имеющих сложную форму, выбран метод объемной штамповки, позволяющий получать детали с геометрической формой, максимально приближенной к заданной. При этом механическая обработка требовалась только в зонах сопряжения с шарниром, а также в местах крепления к кузову и тележке.

Поскольку в начале разработки концепции были известны специфические возможности и технологические ограничения метода, при дальнейшей оптимизации стало возможным полное использование достоинств объемной штамповки. Вследствие того что шарнирное соединение требовалось разместить в ограниченном пространстве, оно должно было быть компактным. Этого удалось добиться, применяя алюминиевые детали объемной штамповки, отказавшись от деталей с ребрами жесткости.

В качестве материала рассматривался только высокопрочный

алюминиевый сплав, что позволяло снизить массу деталей. Исходя из накопленного опыта (сочлененные поезда GTW2), компания Stadler Rail выбрала сплав AlMgSi, упрочняемый термообработкой. Снижение массы по сравнению с вариантом применения фрезерованных или сварных деталей из стали составило примерно 170 кг на одно вагонное сочленение, т. е. около 510 кг на поезд, состоящий из четырех вагонов.

Сложный нелинейный анализ, выполненный методом конечных элементов с использованием моделей и граничных условий, позволил уже на этапе разработки концепции доказать возможность реализации таких деталей. При этом были учтены воздействия предварительной затяжки болтов, свойства прессовой посадки в держателе, влияние температуры (различное термическое удлинение алюминиевого держателя и стального вала в шарнире).

**Оптимизация деталей.** С учетом заданных параметров выполнена оптимизация геометрической формы штампованных деталей. Для этого с использованием метода конечных элементов и основных положений концепции была создана специальная модель. При этом контроль подвижности шарнирного соединения в собранном виде выполнялся с помощью системы 3D-CAD. Элементы корпуса и держателя видны на рис. 2.

Оптимизация геометрической формы алюминиевых деталей объемной штамповки позволила при значительной экономии материала обеспечить минимальный объем механической обработки деталей, о чем свидетельствует рис. 3, из которого видно, что относительно большие поверхности (светлые) обработки не требуют.

**Защита от коррозии.** В ряде случаев не удастся избежать прямого контакта алюминиевых деталей со стальными. В таком соединении возникает опасность контактной коррозии. В данном случае

стальной вал шарнира расположен в обработанном, но не имеющем покрытия алюминиевом держателе. Стальные детали (вал шарнира, наружное кольцо и скобы) имели гальваническое покрытие из цинка толщиной 15 мкм и хромовое покрытие.

Дополнительно все поверхности (кроме места прессовой посадки шарнира в держатель) перед монтажом обрабатывали герметиком Dinitrol 77B; такая обработка с заполнением критических углублений проводилась и после монтажа. Этим же средством с обеих сторон герметизировали все названные места контактирования, что исключало возможность накопления в них воды и особенно моющих средств. Все это способствовало минимизации коррозии, особенно в местах контактирования стальных и алюминиевых деталей и в труднодоступных зонах с пустотами.

Остальные поверхности этих толстостенных алюминиевых деталей, выполненных объемной штамповкой, дополнительно не обрабатывали, так как сплав AlMgSi обладает достаточно хорошими антикоррозионными свойствами. Кроме того, часть этих деталей при поставке имела анодированное покрытие хромом.

**Оценка прочности.** Силы, действующие на кузов вагона, определяли по стандарту DIN EN 12663 (для моторных вагонов), а в мес-

тах связей тележек с кузовами—по EN 13749. Структурную прочность оценивали, используя данные из документа Eurocode 9 (1999).

Для расчета напряжений в шарнирном соединении под статической нагрузкой использовали конечно-элементную модель, в состав которой входили все детали соединения и упрощенно смоделированный кузов примыкающего вагона.

Путем моделирования определяли прочность корпуса и держателя. При этом принимали во внимание нелинейность характеристик всех предварительно нагруженных резьбовых соединений, а также упругопластичное поведение материала и прессовую посадку вала при теоретически максимальном натяге.

Всего согласно технической спецификации было рассчитано пять сочетаний статического нагружения:

- масса брутто (масса тары плюс масса груза) при вертикальном ускорении 1,3g;
- масса тары плюс сила сжатия сцепки, равная 1500 кН;
- масса брутто плюс сила сжатия сцепки;
- масса тары плюс сила растяжения сцепки, равная 1000 кН;
- масса брутто плюс сила растяжения сцепки.

Допускались небольшие, локально ограниченные пластические деформации.

Для доказательства способности корпуса и держателя противостоять усталостному разрушению на модели оценивались последствия воздействия амплитудных напряжений, определяемых по их средним значениям. Узел сочленения в смонтированном виде подвергался суммарному воздействию следующих нагрузок:

- вертикальной при различной нагрузке примыкающего вагона;
- динамической переменной, вызванной вертикальным, поперечным и продольным ускорениями.

### Обеспечение качества

На термообработанные штампованные заготовки были разработаны подробные спецификации, определяющие свойства материала и перечень контрольных мероприятий:

- испытания на образование трещин;
- контроль поверхности;
- проверка размеров;
- ультразвуковые испытания;
- контроль твердости;
- проверка электропроводности.

Разрушающие испытания проводились на растяжение, усталость при круговом изгибе и на макроструктуру. В процессе производства также проводили выборочные разрушающие испытания заготовок. Образцы для испытаний на растяжение и усталостную прочность вырезали в определенных, заранее

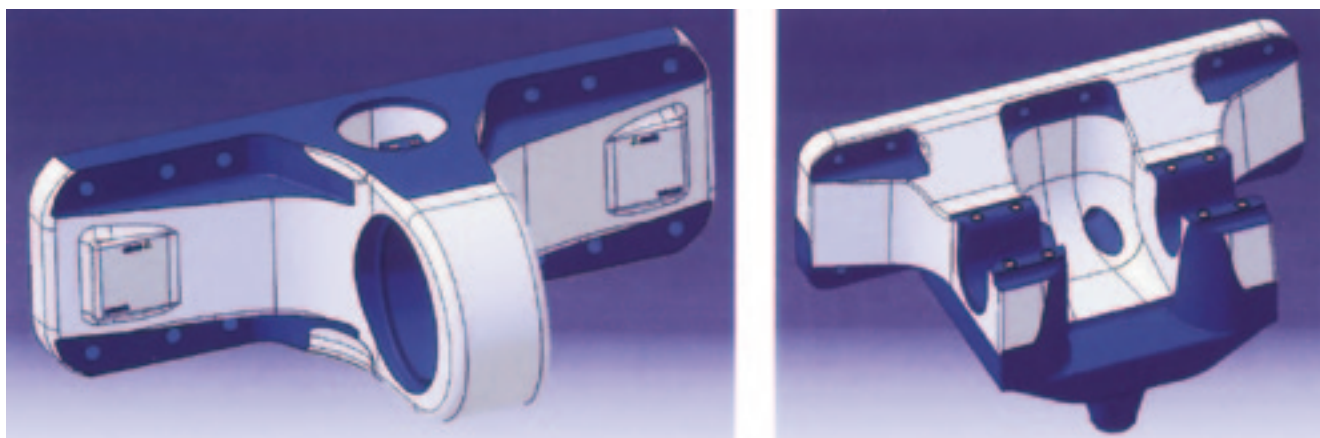


Рис. 3. Основные элементы сочленения с механически обработанными (слева) и необработанными поверхностями (справа)

намеченных зонах. Проводились также химический анализ материала и контроль его свойств после термообработки. Было установлено, что свойства материала деталей значительно превосходят требуемые. Например, предел текучести, по которому судят о прочности, должен был составлять 220 Н/мм<sup>2</sup>; его минимальное значение, полученное при испытаниях, равнялось 270 Н/мм<sup>2</sup>.

### Допуск к эксплуатации

Основанием для получения разрешения на эксплуатацию служили результаты статических и динамических испытаний, а также эксперимента по сжатию кузова вагона. В последнем случае нагрузки на торцовую часть вагона действовали через смонтированный узел сочленения. На держателе и корпусе этого соединения располагали соответственно четыре и пять тензометрических элементов, что позволяло сравнивать расчетные напряжения и измеренные деформации в этих точках. Сравнение показало, что отклонения не превышали 20 %.

### Другие области применения алюминиевых деталей, выполненных объемной штамповкой

Из алюминиевых сплавов методом объемной штамповки могут быть выполнены и другие детали:

- комплексные, многофункциональные, сложной формы;
- рассчитанные на изготовление с одним направлением усилия штамповки;
- несущие детали с многофункциональной формой.

При этом необходимо, чтобы были выполнены следующие условия:

- наличие необходимости в облегчении конструкции;

- число деталей достаточно для амортизации штампа;

- детали не должны быть слишком тонкостенными, а геометрическая форма их после штамповки должна быть близка к конечной. При этом уже на этапе разработки концепции нового изделия должны быть учтены свойства новых деталей. Только при таком подходе могут быть оптимально использованы достоинства алюминиевых деталей объемной штамповки;

- необходимость замены существующих литых деталей из стали или алюминия, которые состоят из двух частей, соединяемых сваркой;

- замена фрезерованных стальных и алюминиевых деталей, при изготовлении которых теряется большое количество материала. При этом штампованная деталь должна иметь форму, максимально приближенную к конечной. В этом случае будут компенсированы затраты на штампы и освоение новой технологии изготовления.

На железнодорожном подвижном составе такие детали уже используются, например консоль межвагонного сочленения моторвагонного поезда GTW2 и консоль сцепки поезда FLIRT (обе производства компании Stadler Rail); штампованные заготовки из сплава AlMgSi для поводка, вала и стойки подшипника высокоскоростного поезда Talgo 300.

Другие возможные области применения алюминиевых деталей объемной штамповки:

- элементы тележки в зонах первичного и вторичного рессорного подвешивания;
- баки трансформаторов;
- консоли для установки пассажирских кресел.

Следует отметить успешное использование колесных дисков, выполненных объемной штамповкой из алюминиевых сплавов. Технология их изготовления полностью отработана, по крайней

мере для подвижного состава с конструкционной скоростью 160 км/ч. При сопоставимых расходах масса одного диска снижается примерно на 75 кг, а общая масса тележки — на 300 кг. Более широкое применение этой технологии ограничивается условиями безопасности.

Несколько лет назад были разработаны и построены полностью алюминиевые тележки с нетрадиционной кинематикой и использованием литых деталей, для соединения которых частично применялась даже сварка: например, тележки цистерн для железной дороги Rhätische Bahn, тележки грузовых вагонов для SBB и железных дорог США, моторная тележка Aludrive для пригородного подвижного состава.

Если задаться целью построить легкую и приемлемую по стоимости тележку для пассажирских и грузовых вагонов, то простая замена существующих стальных деталей на алюминиевые объемной штамповки вряд ли приведет к успеху. Тележку необходимо полностью разработать заново. Концепция алюминиевой тележки будет неразрывно связана с возможностью изготовления алюминиевых деталей методом объемной штамповки и их оптимизацией. Такая тележка даже выглядела бы иначе, чем обычная. В ней нет сварной рамы, так как она будет состоять из механически соединенных объемно-штампованных элементов.

Методом объемной штамповки из алюминиевых сплавов можно изготавливать различные компоненты железнодорожного подвижного состава, что приведет к снижению его массы и стоимости. Однако это следует учитывать еще на стадии разработки концепции, чтобы полностью использовать достоинства технологии объемной штамповки.