

УДК 621.73.043:669.7.002

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА КОЛЕС ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

Вахромеев Александр Михайлович, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, wheeltest@bk.ru

Аннотация. Технология изготовления дисковых автомобильных колес в настоящее время претерпела большие изменения. Раньше колеса изготавливались только из стали. Конструктивно они состояли из прокатного обода и собственно штампованного диска. Эти две детали, изготовленные отдельно, затем соединялись между собой с помощью сварки. Но технология постоянно развивается, возникают новые методы, новые виды продукции. Так появились и легкосплавные колеса. Как правило, их изготавливают из сплавов алюминия или магния. В настоящее время в автомобильной промышленности все шире применяют легкие сплавы для производства деталей легковых и грузовых автомобилей, в том числе и колес [1–3]. Колеса из легких сплавов в зависимости от технологии изготовления колеса подразделяют на литые, кованные (изготовленные методом горячей объемной штамповки), комбинированные. Для их производства повсеместно широко применяют алюминиевые сплавы разных марок, реже магниевые сплавы, еще реже – титановые.

Ключевые слова: колесо автомобиля; легкие сплавы; литье; штамповка.

PERFECTION OF TECHNOLOGY AND TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF PRODUCTION OF WHEELS FROM LIGHT ALLOYS

Vakhromeev Aleksandr M., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, wheeltest@bk.ru

Abstract. The technology of the production of disc automobile wheels has now undergone great changes. Previously, wheels were made only of steel. Structurally, they consisted of a rolling rim and the actual stamped disc. These two parts, made separately, were then interconnected by welding ... But technology is constantly evolving, new methods, new types of products are emerging. So there were light alloy wheels. As a rule, they are made from alloys of aluminum or magnesium. Nowadays, light alloys are increasingly used in the automotive industry for the production of parts for cars and trucks, including wheels [1–3]. Wheels from light alloys, depending on the technology of manufacturing wheels are divided into cast, forged (made by hot forging), combined. Aluminum alloys of various grades, rarely magnesium alloys, and even less often titanium alloys are widely used for their production. wheels of cars are established. The proposals for improving the list of methods for assessing the impact strength of alloy wheels of cars depending on their design features are given.

Key words: car wheel; light alloys; casting; forging.

Введение

Технология изготовления дисков колес в последние годы претерпела значительные изменения. Раньше диски штамповали из стального листа. Затем для их изготовления стали использовать алюминиевые и магнитные сплавы, но коррозионная стойкость последних оказалась неудовлетворительной, и они не выдержали конкуренции. Известны также попытки изготовления колес из прочных пластмасс, но они пока не получили широкого распространения. Таким образом, алюминиевые сплавы заняли лидирующее положение среди материалов, используемых для изготовления дисков автомобильных колес. Отметим некоторые преимущества дисков из алюминиевых сплавов.

Алюминий значительно легче стали и, следовательно, алюминиевые диски снижают так называемую неподрессоренную массу автомобиля. Отношение поддрессоренной массы автомобиля к неподрессоренной увеличивается, что улучшает плавность хода. Колесо небольшого веса не «пробьет» мягкую подвеску автомобиля при больших неровностях дороги. Легкое колесо обладает меньшей инерционностью, а это улучшает устойчивость и управляемость автомобиля. Легкое колесо увеличивает срок службы узлов и сочленений подвески. Если сравнивать со стальными изделиями, то алюминиевые диски легче на 10–20%, что является их основным преимуществом. Ведь в таком случае масса неподрессоренных частей машины значительно снижается. Из-за этого при движении по неровностям дороги на кузов воздействуют меньшие ударные нагрузки, а значит, улучшается такое эксплуатационное свойство автомобиля, как плавность хода. При этом также улучшаются условия работы подвески: упругие и демпфирующие элементы воспринимают меньшие нагрузки, тем самым увеличивается срок их службы. Помимо всего прочего, колеса из алюминиевых сплавов обеспечивают лучшее охлаждение тормозных механизмов за счет лучшего обдува и высокой

теплопроводности материала. Нельзя не учитывать также высокую точность в изготовлении литых дисковых колес, которая позволяет лучше произвести балансировку колеса. Это, в свою очередь, способствует уменьшению износа подшипников ступиц, шарниров деталей подвески, рулевого привода и шин. За счет меньшей массы колеса быстрее восстанавливают контакт с поверхностью дороги при наезде на препятствие, что благотворно сказывается на устойчивости и управляемости автомобиля, движущегося на больших скоростях. Уменьшение массы колеса положительно сказывается на динамике автомобиля, так как для разгона и торможения требуется меньшее усилие, что в конечном итоге приводит к увеличению срока службы двигателя, трансмиссии и тормозной системы, а также к уменьшению расхода топлива. Алюминиевое колесо легче защитить от электрохимической коррозии металла, чем стальной. Существуют всевозможные анодные покрытия, высокопрочные лаки на гальванической подложке.

Для изготовления алюминиевых дисков применяют два принципиально разных технологических процесса.

Первый, наиболее распространенный – **литье**, обеспечивающее высокое качество изделия, отсутствие пор и раковин в металле. Литые колеса проходят стопроцентный рентгеновский контроль, гарантирующий отсутствие брака готовой продукции. Литье почти не дает отходов, а это снижает себестоимость продукции. Недостаток литья заключается в том, что изделие обладает так называемой свободной, ненаправленной кристаллической структурой. Это вынуждает конструкторов делать сечения колес достаточно толстыми для обеспечения требуемой механической прочности.

Второй способ – **горячая штамповка (ковка)**. Этим способом достигается наивысшая прочность, поскольку структура металла становится волокнистой, а направление этих волокон – изначально

заданным. Такая технология позволяет уменьшать толщину сечения колес примерно на 20% по сравнению с литьем. Недостаток штамповки – большой процент отходов, что увеличивает цену изделия.

Соотношение весовых показателей таково: литой диск в 1,3–1,5 раза легче обычного стального, а штампованный, в свою очередь легче литого. Однако разница в ценах такова, что литые колеса на сегодня представляются наиболее разумным компромиссом.

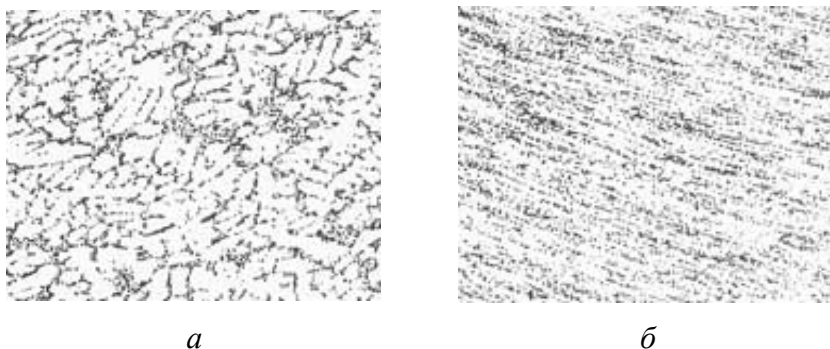


Рис. 1. Макроструктура алюминиевого сплава в литом (а) и штампованном (б) колесе

Но вершиной эволюции колеса легкосплавные литые модели, даже самые лучшие и дорогие, уже перестали быть. Случилось это почти сразу после появления колес, изготовленных методом горячей объемной штамповки. Стоит сделать еще одно небольшое пояснение. В английском языке термину "forging", часто переводимому как «ковка», соответствует, по крайней мере, пять разных технологий. Все они повышают прочность колеса либо его поверхности. В том числе простейшая накатка роликом. Реальный же прирост потребительских свойств дает только горячая штамповка под высоким давлением. Путаница выглядит не вполне случайной: как хороша ковка, знают многие. Но вот безумно дорогие линии мощных прессов поставить почти никто не в состоянии. А тут такая удачная игра слов! Так вот, речь пойдет о горячей штамповке. Именно она позволяет довести толщину обода до значения 1,8 мм без потери надежности и ухудшения прочих свойств колеса. Колеса «Формулы-1» являются штампованными. Только эта технология позволяет выиграть,

реально формируя высочайшие динамические характеристики. Это предел? Нет, развитие колеса продолжается. Появились технологии, позволяющие совместить преимущества литого и штампованного колеса.

Процессы литья

Среди алюминиевых колес, литые составляют более 80% в Европе, 85% в США для легковых автомобилей и легких грузовиков и 93% в Японии.

Их основными преимуществами по сравнению со стальными или другими алюминиевыми колесами являются:

- высокая универсальность стилей;
- вес (равный или меньше, чем сталь без стилизации);
- точность измерения (распределение массы);
- утилизация;
- статическое и динамическое поведение.

В процессе производства дисковых колес используют следующие методы литья по способу заполнения форм:

- литье под низким давлением (в основном);
- гравитационное литье (менее использовано);
- литье с противодавлением (минимально используемый).

Редко используются следующие процессы:

- литье под высоким давлением;
- литье с последующей штамповкой (Cobapress);
- тиксолитье.

подавляющее большинство легкосплавных дисковых колес изготавливаются посредством использования метода гравитационного литья. Одним из главных достоинств этого метода является высокий коэффициент использования материала, благодаря чему, себестоимость производства существенно снижается. Именно это и является

определяющим фактором при формировании цены (литье в 2–3 раза дешевлековки). В качестве конструкционных материалов широко используются относительно дешевые сплавы на основе алюминия (табл. 1). Алюминий является одним из наиболее легких металлов, что в сочетании с высокой прочностью его сплава, способствует снижению веса диска.

Таблица 1

Химический состав и механические свойства литейных сплавов
на основе алюминия для гравитационного литья

	С термообработкой	Без термообработки
	Al Si 7 Mg Sr	Al Si 11 Mg Sr
	Si 6.5 – 7.5	Si 10.5 – 11.5
	Fe < 0.15	Fe < 0.15
	Mg 0.25 – 0.30	Mg 0.10 – 0.30
	Ti 0.10 – 0.15	Ti 0.10 – 0.15
	Cu < 0.03	Cu < 0.03
	Sr 0.01 – 0.02	Sr 0.015 – 0.035
Предел прочности	250 МПа	150 МПа
Предел текучести	180–200 МПа	80 МПа
Относительное удлинение	5%	5%

Первый этап в процессе производства литых дисковых колес – приготовление сплава. Исходное сырье поступает на завод в виде слитков, которые плавятся в специальных печах и разливаются по формам, при этом плавление сплавов должно происходить при строго определенных температурах для достижения определенной текучести материала, чтоб исключить появление пустот.

Особое внимание уделяется составу сплава, из которого будут изготавливаться литые колеса под низким давлением, который соответствует американскому стандарту A356.2. Кроме алюминия в него входят: Si 6.5 – 7.5%, Mg 0.30 – 0.45%, Ti < 0.2%, Fe < 0.12%, Mn < 0.1%, Cu < 0.05%, Zn < 0.05%.

Второй этап в производстве литых колес – отливка колеса для последующей механической обработки. В процессе производства дисковых колес используют следующие методы литья по способу заполнения форм:

- гравитационное литьё;
- литье под низким давлением.

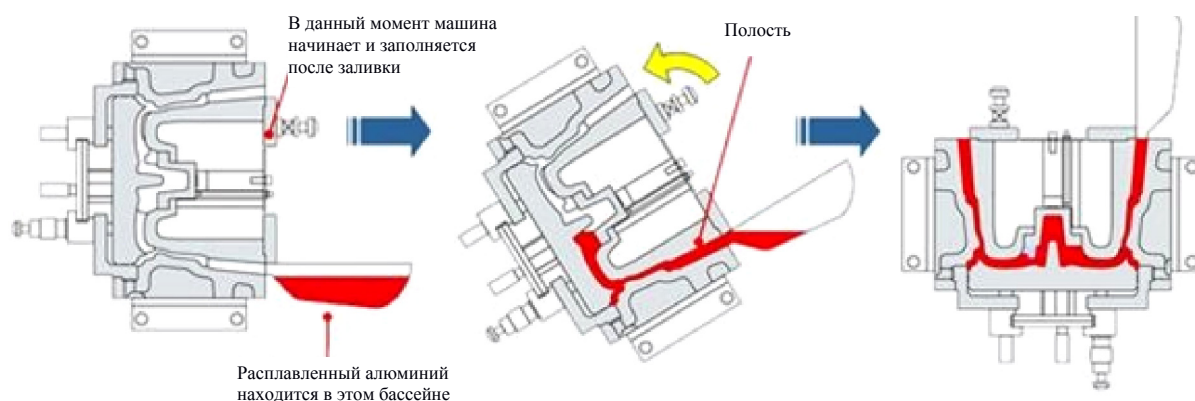


Рис. 2. Процесс наиболее экономичного гравитационного литья колеса

На рис. 3 показана литейная форма с отливкой колеса методом гравитационного литья традиционным способом.

Самая современная на сегодняшний день технология литья алюминиевых дисковых колес – литье низкого давления (около 2 бар), которое создается воздействием газа на расплавленный металл. При этом из исходного сырья выдавливается воздух, что позволяет избавиться от пустот внутри диска.



Рис. 3. Литейная форма с отливкой колеса методом гравитационного литья традиционным способом

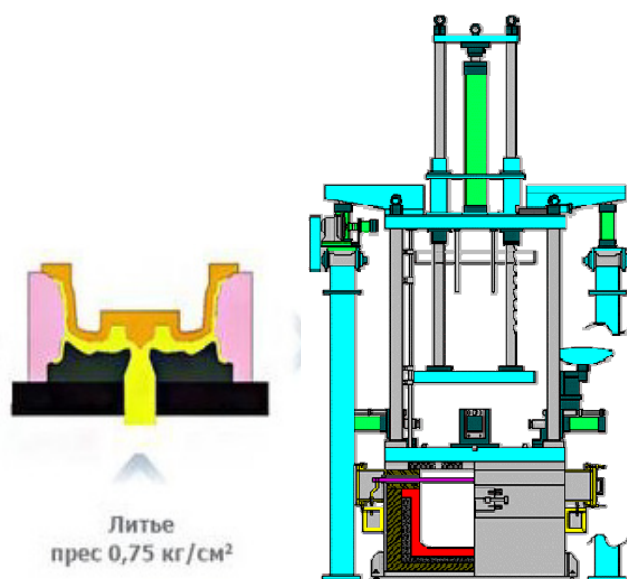


Рис. 4. Схема заполнения литейной формы при литье под низким давлением

Далее форма охлаждается до температуры 400°C и лишь после этого форма открывается для окончательного застывания. Затем заготовка направляется на проверку с помощью рентгеновского излучения, проверяется размер и внешний вид полученного литого диска, наличие шероховатостей и каверн.

После того как заготовка отлита, ее подвергают многократному нагреву до высокой температуры (примерно 540°C) и резкому охлаждению в воде – эта технология сродни закалке металла. В процессе этой термической обработки меняется микроструктура алюминия, в результате чего сплав становится мелкозернистым. При помощи современных компьютерных технологий осуществляется анализ и контроль изменения структуры алюминия до, во время и после затвердения. Такой технологический процесс позволяет сделать колесо тонкостенным не в ущерб его прочности.

Если говорить об обычном гравитационном литье, то в его процессе заполнение формы жидким сплавом и его затверждение происходят без какого-либо внешнего воздействия, т.е. исключительно за счет действия силы тяжести. Литье под давлением – способ получения отливок

в пресс-формах, которые сплав заполняет с большой скоростью (16 секунд) под давлением. Использование этого метода обеспечивает точность размеров и предупреждает образования пористости конструкции. Технология соединила в себе теории технологий литья иковки, чтобы сфокусироваться на решении данной конфронтации веса и прочности. При производстве литой диск проходит ускоренный этап затвердения жидкого алюминия для достижения требуемой прочности и жесткости. Обычное охлаждение водой в нижней форме дополняется охлаждением и в верхней форме. Сплав затем подвергается высокоскоростной термической обработке.

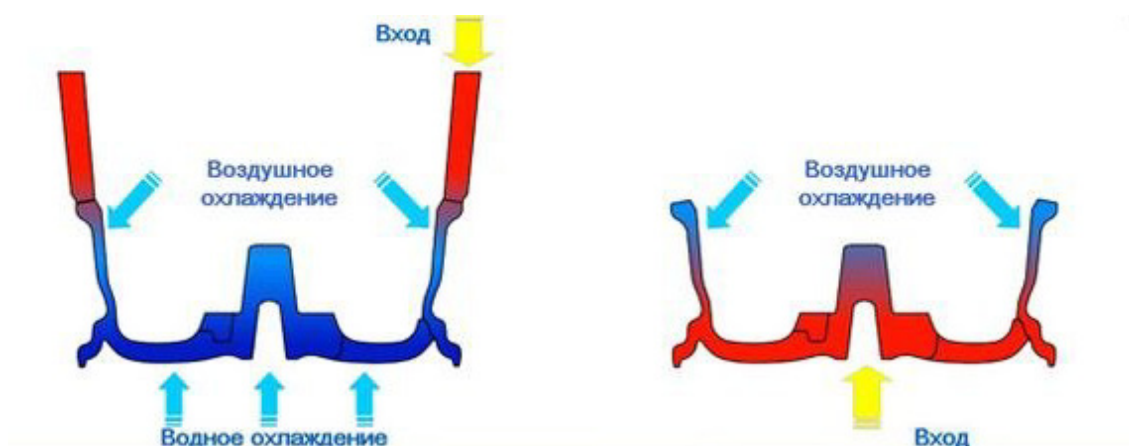


Рис. 5. Сравнение методов гравитационного литья и под низким давлением колеса легкового автомобиля

Третий этап в формировании отливки колеса – термическая обработка. Термическая обработка дисков длится несколько часов и включает в себя несколько этапов. Первый – отжиг при температуре 480–550°C (в соответствии с DIN 1706). Температура подбирается оптимальная для растворения легирующих элементов, что позволяет повысить равномерность сплава, тем самым повысить прочность литого диска. Второй этап – быстрое охлаждение до температуры 70°C. Этот этап подготавливает заготовку литого диска к третьему этапу – искусственному старению металла, важный момент, отвечающий за механические свойства

будущего литого диска. На всех этих этапах очень важен температурный режим, так если при отжиге температура превысит 550°C , заготовка считается бракованной и отправляется на переплавку.

Технология жидкой штамповки (Liquid Forging)

Данный технологический процесс объединяет преимущества литья иковки. Как это выглядит? Расплавленный алюминий подается в форму и осуществляется первичное давление в 50 кг/см^2 и последующее давление в 1000 кг/см^2 . Третья степень давления – 4000 кг/см^2 производится после того, как форма полностью заполнится расплавленным металлом и продолжается до полного затвердения. При таком многократном давлении поры расплавленного алюминия полностью устраняются, металл получается без усадочных раковин и с отличной микроструктурой.

Технология жидкой штамповки для изготовления дисковых алюминиевых колес обеспечивает более высокую прочность, чем диски, изготавливаемые по обычной литейной технологии, которая применима лишь к алюминиевым сплавам с высокой жидкотекучестью, но невысокими прочностными свойствами. Это обусловлено тем, что технология жидкой штамповки позволяет изготавливать диски колес из алюминиевых сплавов, обладающих повышенными механическими свойствами, но отличающимися низкой жидкотекучестью.

Для осуществления жидкой штамповки используется специальная технологическая оснастка, которая устанавливается на гидравлический пресс с усилием 630 тс, оснащенный также изотермическим штамповым блоком (рис. 6а). На рис. 6 показаны дисковые колеса, изготовленные с использованием жидкой штамповки.

Дисковые колеса, изготовленные с применением технологии жидкой штамповки, демонстрируют целый ряд преимуществ:

– отсутствие «усадочной раковины», микроотверстий и пор;

- мелкозернистость (20–30 nm);
- вариативность и изысканность дизайна в сравнении с цельноштампованными колесами;
- вес жидкокованного колеса ниже на 30% по отношению к литым дискам;
- высокие механические свойства и отличная микроструктура.

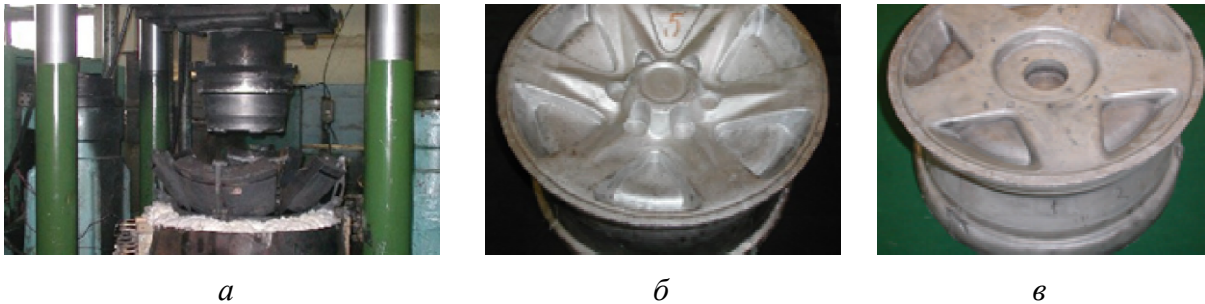


Рис. 6. Дисковые колеса, изготовленные с использованием жидкой штамповки

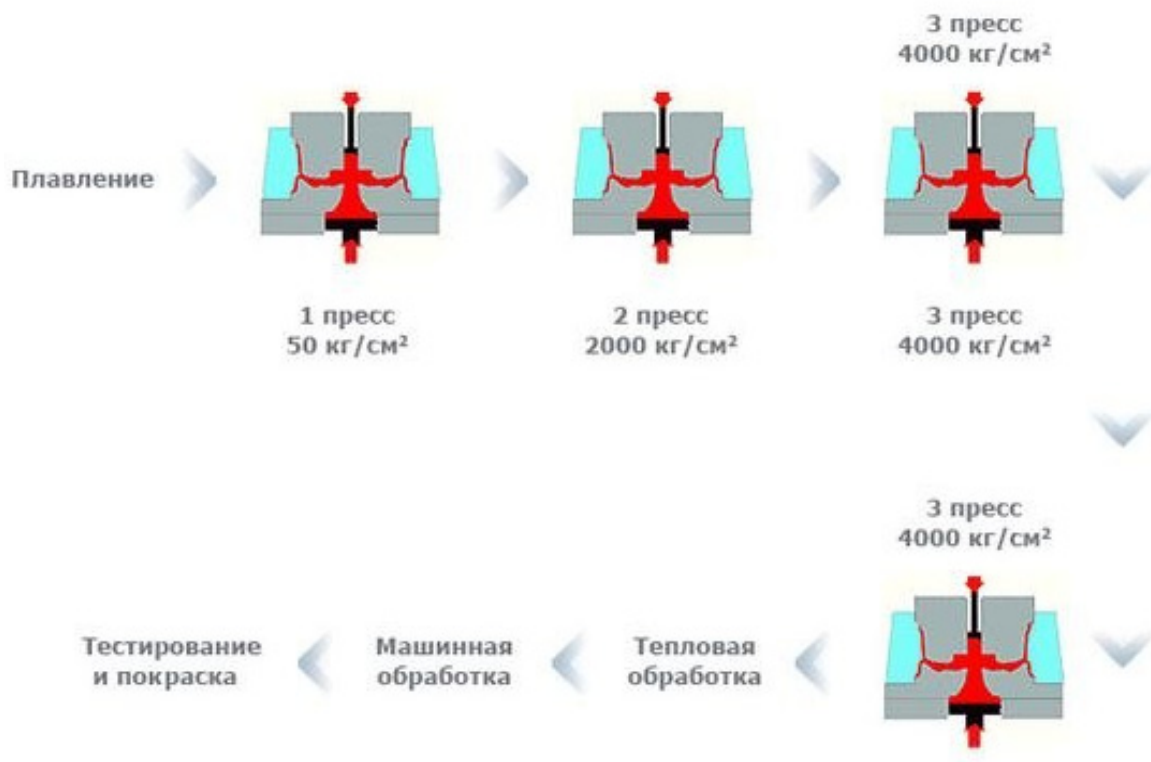


Рис. 7. Схема производства колеса легкового автомобиля методом жидкой штамповки

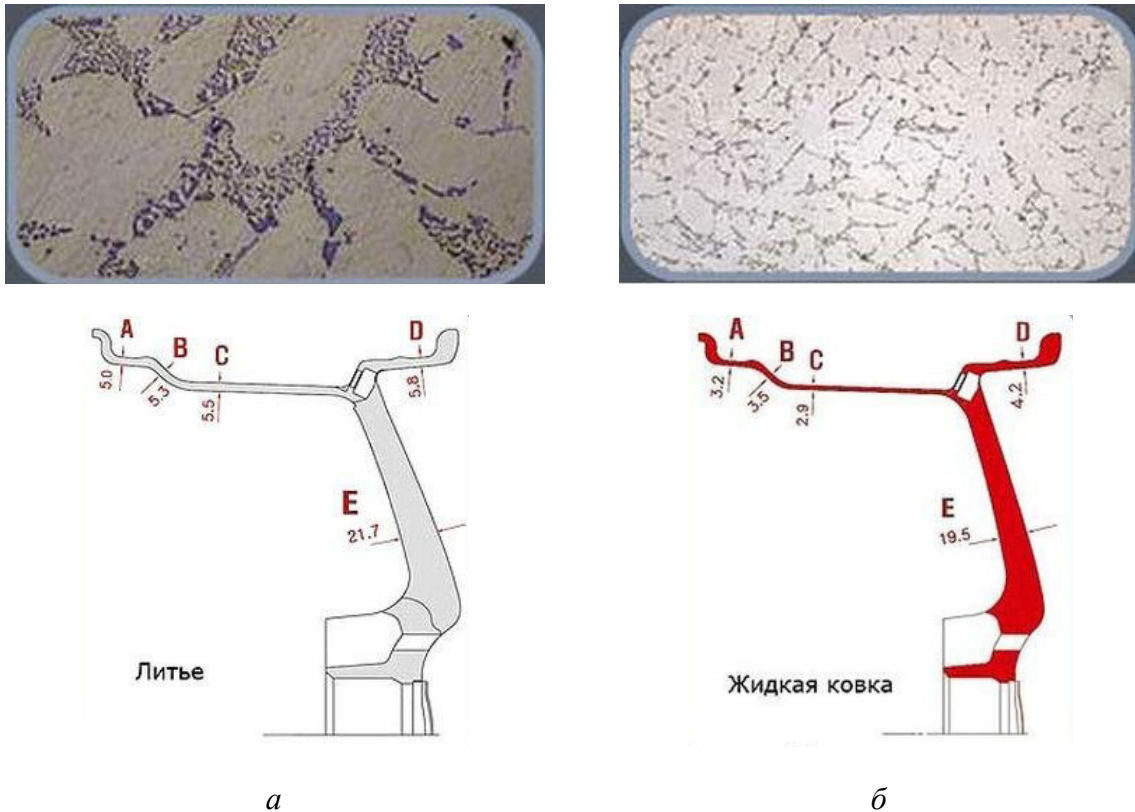


Рис. 8. Сравнение микроструктуры сплава и толщин профиля в колесе, полученном литьем под низким давлением (а) и жидкой штамповкой (б)

Таблица 2

Механические свойства сплава после литья под низким давлением
и жидкой штамповки колес легковых и грузовых автомобилей

Технологический процесс	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительно удлинение, %
Литье	270	170	9
Жидкая штамповка Легковое колесо	320	200	12
Жидкая штамповка грузовое колесо	340	220	14

После литья 100% отливок колес проверяются на рентгеновском аппарате.

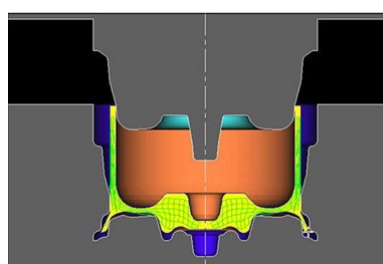
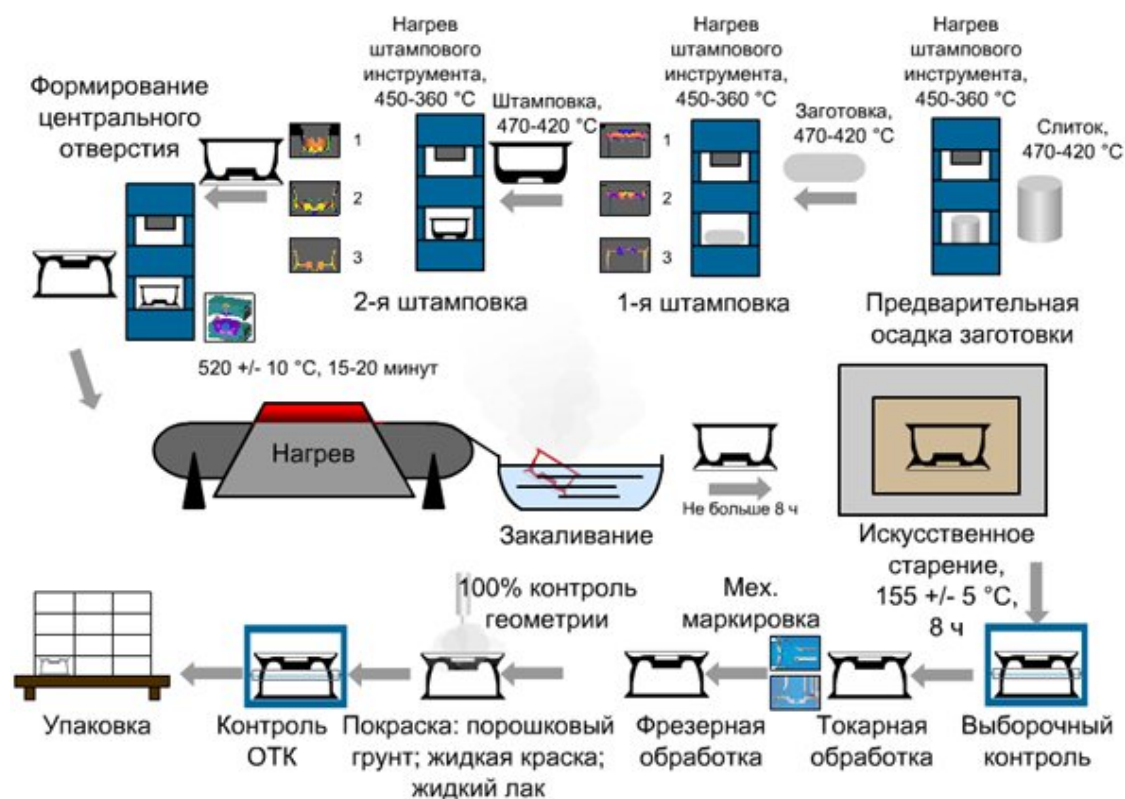
Штамповка

Поиск совершенства привел к выбору нового материала: легкого, прочного, упругого. Речь идет о магнии. Выигрыш в весе колеса

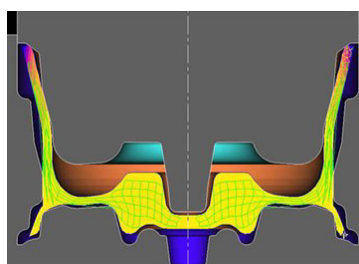
из магниевого сплава по сравнению с алюминиевым – почти вдвое. Это настолько серьезно, что в стороне остаются и опасная склонность к коррозии, и то обстоятельство, что магний при достижении критической температуры горит в куске. Большой спорт практически единогласно проголосовал за магний. В «Формуле – 1» магниевый сплав уже стал практически обязательным, в американских гонках «Инди» предпочтение магнию отдает около половины команд, в чемпионате мира по кольцевым гонкам – порядка 80%, в авторалли приверженцев несколько меньше, процентов шестьдесят. Кстати, совершенно иное звучание в спорте высших достижений имеет слово «безопасность». Если применительно к серийному автомобилю именно это обстоятельство является главным показанием для применения кованных колес, то в спорте ключевое слово иное. Скорость. Причина проста. Тормозной путь как таковой неинтересен, важно определить момент начала торможения перед поворотом – это может быть, к примеру, 45 метров или 50. Пересчитайте секунды, в доли секунд – может быть, именно они решат судьбу призовых мест. Можно даже не обращать внимание на низкую коррозионную стойкость сплавов магния, ставшую главным препятствием их массового применения на серийных машинах. Штампованные алюминиевые колеса – это цельные колеса, образованные из единого металлического блока методом горячей штамповки, горячего или холодного формования и обработки. Процессковки позволяет гибко управлять дизайном диска, подобным литым колесам.

Стандартными сплавами, которые применяются для кованных алюминиевых колесных дисков, являются термически упрочняемые сплавы системы легирования AlMgSi (серия 6xxx): 6082 в Европе и 6061 в Северной Америке. Полное обозначение алюминиевого сплава 6082 по Европейскому Стандарту EN 573-1 выглядит следующим образом: EN AW-6082 или EN AW-AlSi1MgMn, а сплава 6061 – EN AW-6061

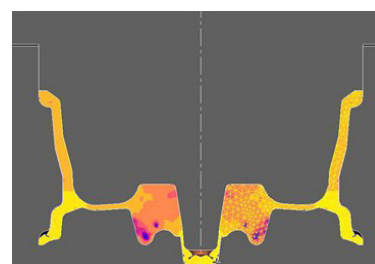
или EN AW-AlSiMgCu. Сплав 6082 – это аналог отечественного алюминиевого сплава АД35, а сплав 6061 – сплава АД33 по ГОСТ 4784-97.



Промежуточное формирование диска (1)



Промежуточное формирование диска и обода (2)



Окончательное формирование штамповки (3)

Рис. 9. Технологический процесс производства штампованного легкосплавного колеса

При производстве штампованных колес в России используется технология объемной (горячей) штамповки. В других странах применяют метод раскатки (холодное формование). Некоторые фирмы работают

по «обходным технологиям». Например, менее мощные прессы (скажем, с усилием в 3–5 тысяч тонн) обходятся гораздо дешевле, но не развивают достаточного усилия для горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов.



Рис. 10. Вытянутая зеренная структура алюминия в ковном колесном диске (источник – фирма Alcoa)



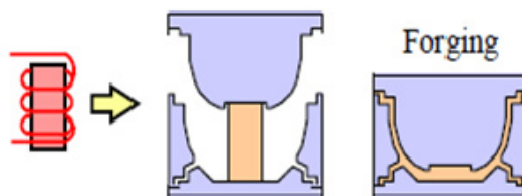
Рис. 11. Технологическая цепочка изготовления облегченных дисковых колес на фирме Otto Fuchs (источник – фирма Otto Fuchs)

Технология Semi-Solid Forging (SSF)

Технология Semi – Solid Forging (SSF), формование металла в полутвердом состоянии, была разработана в Массачусетском технологическом институте (MIT) в 1971 г. В основе ее лежит такой эффект, как тиксотропия, – снижение вязкости (или увеличение текучести) материала при механическом сдвиге. Последовательность операций, как правило, следующая: сначала заготовка разогревается до температуры, когда одновременно существуют две фазы – жидкая и твердая, т.е. заготовка находится в полутвердом (или полу-расплавленном) состоянии, затем она перемещается во внутреннюю полость штампа, после этого производится прессование с большой скоростью, которое увеличивает текучесть металла до вязкости сравнимой с вязкостью машинного масла. В итоге происходит равномерное заполнение пресс-формы в отсутствие каких-либо турбулентных процессов. Технология SSF сочетает в себе преимущества штамповки и литья под высоким давлением, прочность и пластичность. Она часто используется там, где особо требуются легкость и прочность детали, например, в авиационной промышленности. Вслед за Соединенными штатами Америки технология получила широкое применение в Японии.



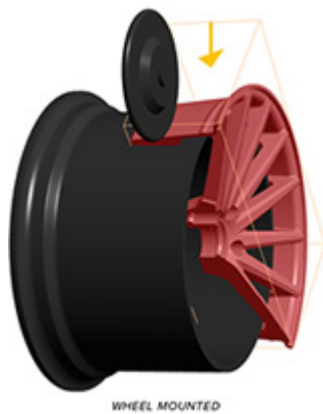
Нагрев заготовки до полутвердого (полу-расплавленного) состояния



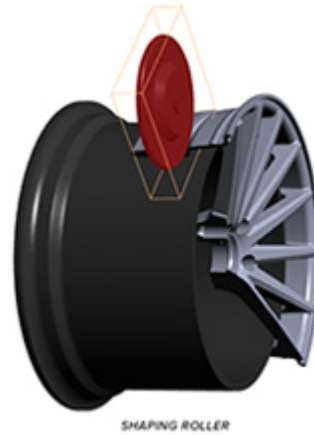
Перемещение заготовки внутрь штампа. Формование с высокой скоростью



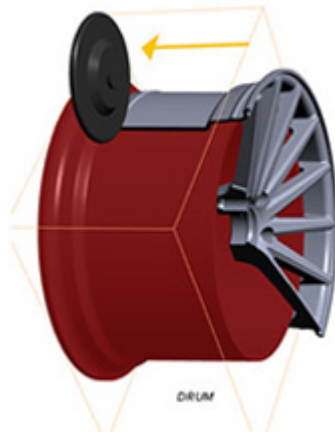
Готовый бесшовный моноблок легкий и прочный



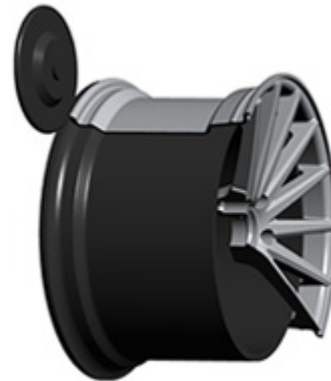
Литая заготовка колеса крепится к формирующему барабану и используется нагрев заготовки



Гидравлические натяжные ролики под давлением раскатывают заготовку колеса



Металл колеса растягивается, формируя необходимую форму и толщину обода



При растягивании металла, улучшается структура зерна алюминия, что позволяет увеличить прочность металла, которая становится схожей с прочностью кованых колес

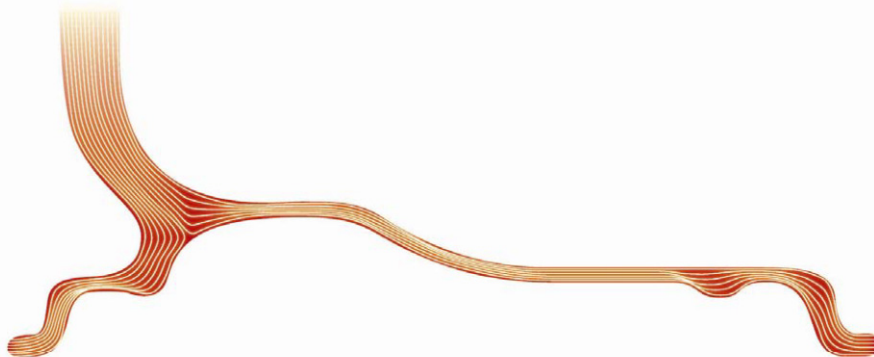


Рис. 12. Структура материала по ободу колеса после вытягивания

Технологию SSF выгодно отличают:

- отсутствие необходимости в дополнительной механической обработке, – продукт получается чистовым и готов под покраску;
- сравнительно низкая усталость материала при термообработке, высокая износостойкость пресс-формы, отсутствие усадки в процессе отверждения при охлаждении материала;
- высокая устойчивость к возникновению трещин при термообработке, низкие пористость и усадка, из-за отсутствия турбулентных процессов, свойственных для литья в жидком (расплавленном) состоянии, позволяют добиться более высоких механических показателей при меньшем весе и толщинах колеса;
- высокая плотность и однородность микроструктуры материала, которая обеспечивает повышенные прочностные характеристики колес.

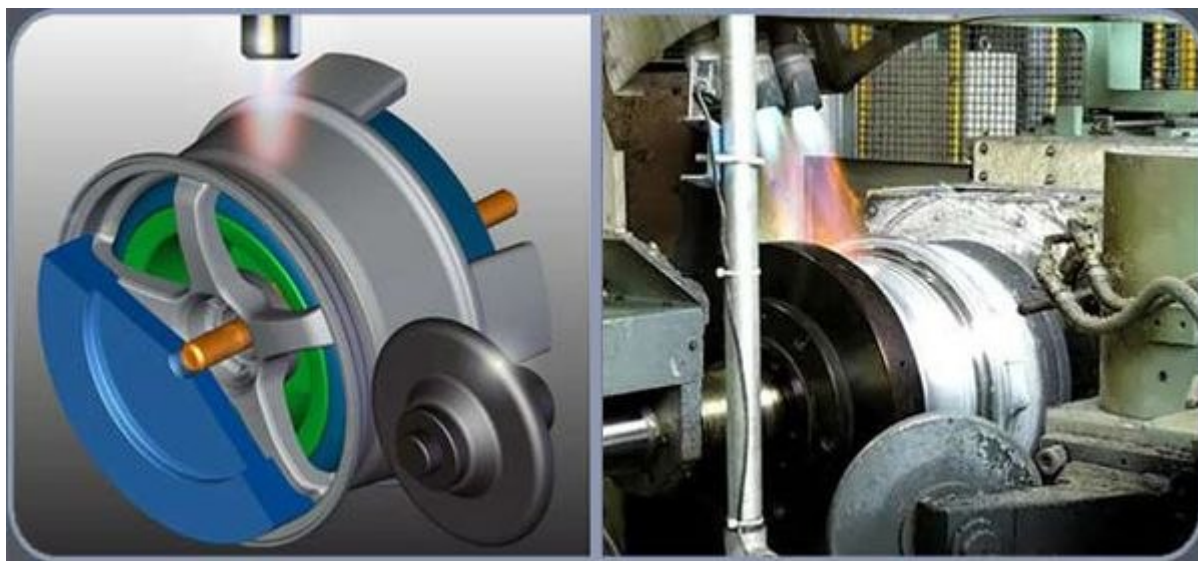


Рис. 13. Один из таких проверенных методов – процесс вытягивания обода под воздействием высокой температуры. У Kosei такой метод имеет название Super Forming (SF), у MI-tech и Marcello – FF (Flow Forming)

Заключение

Проанализировано большинство из предложенных на сегодняшний день методов изготовления легкосплавных колес автомобилей. Проведено

сравнение механических свойств материалов в колесе. Широкое применение алюминия в зарубежном автомобилестроении убеждает в том, что и в нашей промышленности необходимо создание высокопроизводительных и эффективных процессов производства колес из легких сплавов, покупатели легкового автомобиля предъявляют повышенные требования к улучшению дизайна и экономичности машины, покупатели грузового автомобиля к рентабельности за счет увеличения полезной нагрузки и снижения эксплуатационных расходов. Каждый из рассмотренных выше способов изготовления колес имеет определенные преимущества и недостатки как в техническом, так и в экономическом отношении и может найти свою область использования. Отмечены преимущества и недостатки рассмотренных технологических процессов.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52390-2005. Транспортные средства. Колеса дисковые. Технические требования и методы испытаний. – М.: Госстандарт, 2007. – 30 с.
2. ГОСТ Р 50511-93. Колеса из легких сплавов для пневматических шин. Общие технические условия. – М.: Госстандарт, 1993.
3. ЕЭК ООН. Правила 124. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения колес для легковых автомобилей и их прицепов (E/ECE/324, E/ECE/TRANS/505, Rev.2/Add.123).

References

1. Transportnyye sredstva. Kolesa diskovyye. Tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniy, GOSTR 52390-2005 (Means of transport. Wheels are disc. Technical requirements and test methods, State Standart 52390-2005), Moscow, Gosstandart, 2007, 30 p.
2. Kolesa iz legkikh splavov dlya pnevmaticheskikh shin. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya, GOSTR 50511-93 (Light alloy wheels for pneumatic tyres. General specifications, State Standart 50511-93), Moscow, Gosstandart, 1993.
3. EK OON. Pravila 124. Edinoobraznye predpisaniya, kasayushchiesya oficial'nogo utverzhdeniya koles dlya legkovykh avtomobilej i ih pricepov (UNECE. Rules 124. Uniform provisions concerning the approval of wheels for cars and their trailers) (E/ECE/324, E/ECE/TRANS/505, Rev.2/Add.123).