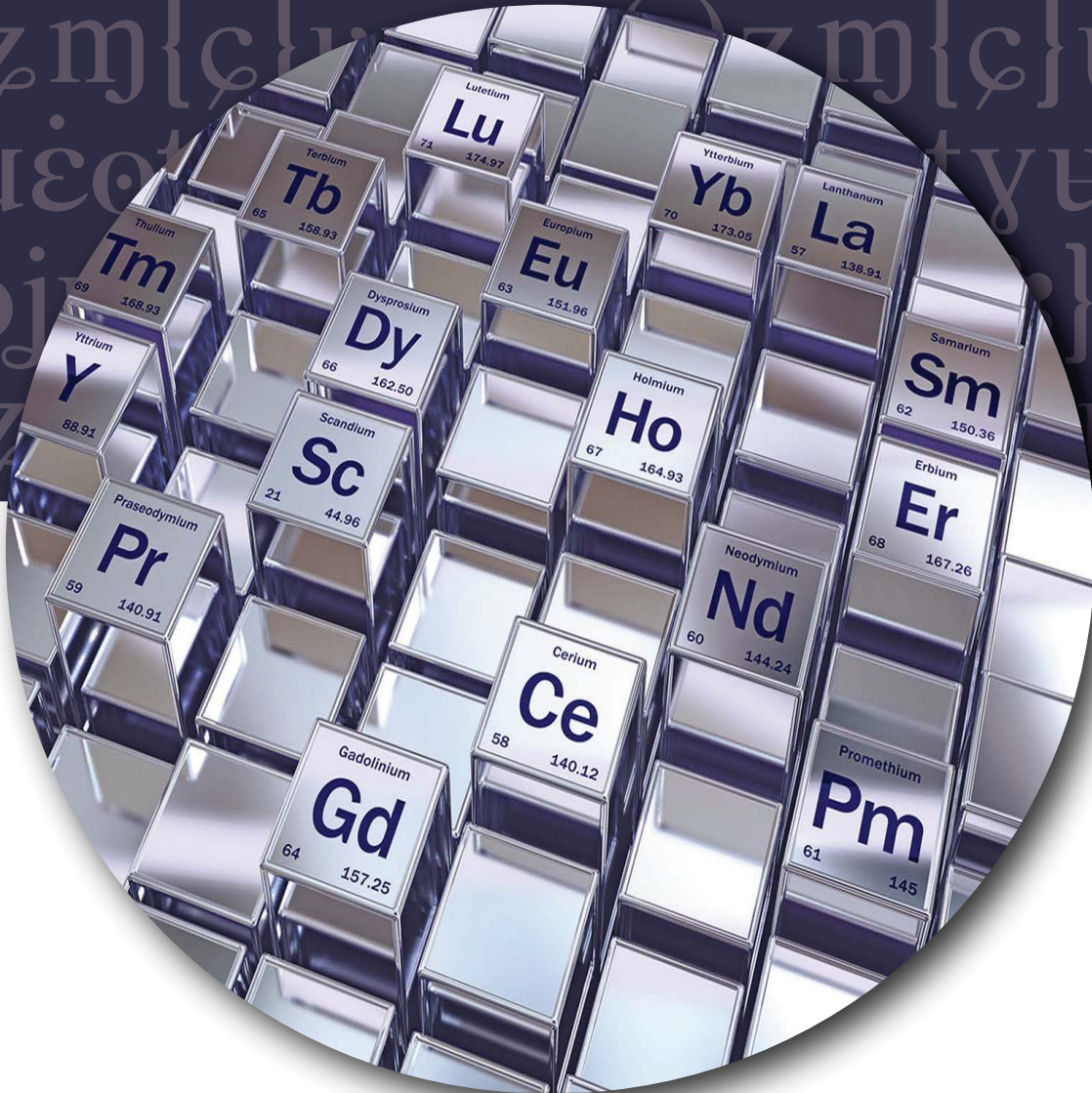




СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY



РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ  
ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.74.043  
ББК 34.616  
Р171

**А в т о р ы:**

А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, Т. А. Богданова,  
И. Е. Илларионов, Е. Г. Партыко

**Р е ц е н з е н т ы:**

П. М. Салов, доктор технических наук, профессор Чувашского государственного университета имени И. Н. Ульянова;

Г. Г. Крушенко, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук

**Р171            Разделительные покрытия для литья под низким давлением : монография / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, Т. А. Богданова [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 164 с.  
ISBN 978-5-7638-4094-0**

Рассмотрены технологические решения, направленные на повышение качества автомобильных колес при литье под низким давлением за счет использования теплопроводящих и теплоизолирующих разделительных покрытий металлических форм.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников, аспирантов, а также может быть интересна бакалаврам и магистрантам металлургических вузов.

**Электронный вариант издания см.:**  
**<http://catalog.sfu-kras.ru>**

**УДК 621.74.043**  
**ББК 34.616**

ISBN 978-5-7638-4094-0

© Сибирский федеральный университет, 2019

---

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДИСКОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ КОЛЕС.....	6
1.1. Современные технологии изготовления дисков автомобильных колес .....	6
1.2. Характеристика метода литья под низким давлением.....	16
1.3. Классификация дефектов литых автомобильных колес.....	21
1.4. Разделительные покрытия для литья под низким давлением .....	24
1.5. Управление качеством литых автомобильных колес путем изменения состава и свойств разделительных покрытий металлических форм .....	50
2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ .....	58
2.1. Этапы производства легкосплавных колес.....	58
2.2. Исходные компоненты разделительных покрытий .....	60
2.3. Методы оценки свойств разделительных покрытий .....	65
2.4. Методы оценки влияния разделительных покрытий на литейные свойства сплава и качество колес.....	71
2.5. Моделирование процесса литья колес из сплава АК12 в металлических формах с нанесенным разделительным покрытием.....	77
3. РАЗРАБОТКА ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФОРМ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ.....	81
3.1. Исследование влияния качества графита на свойства разделительных покрытий .....	81
3.2. Разработка теплопроводящего покрытия металлических форм.....	96
3.3. Разработка теплоизолирующего покрытия металлических форм .....	107
3.4. Прогнозирование эффективности покрытий путем моделирования процесса литья в окрашенную металлическую форму .....	114
4. ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФОРМ .....	120
4.1. Внедрение теплопроводящего разделительного покрытия.....	120
4.2. Испытания теплоизолирующего разделительного покрытия .....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	130
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	132
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	153

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

Литье под низким давлением (ЛНД) – один из наиболее автоматизированных и высокопроизводительных способов получения крупносерийных фасонных изделий из легких сплавов. Однако при имеющейся высокой геометрической точности отливок по-прежнему актуальной остается задача повышения качества их поверхности.

Для автомобильных колес, отлитых под низким давлением, характерными являются поверхностные и подповерхностные дефекты (неслитины, пористость и др.). Их возникновение обусловлено наличием в кристаллизующемся расплаве двухфазной области, в которой одновременно существуют твердая и жидкая фазы. Ширина этой переходной области, играющей ключевую роль в формировании структуры колеса, прямо пропорционально зависит от величины температурного интервала кристаллизации сплава и обратно пропорционально – от интенсивности отвода теплоты к металлической форме.

Одним из решений по регулированию теплоотвода, не требующих больших экономических затрат, является применение разделительных покрытий (РП), создающих на поверхности металлической формы защитный слой с заданными теплофизическими свойствами. Однако данная область исследований практически не освещена в научных изданиях.

В то же время покрытия, выпускаемые в России и странах СНГ, не в полной мере удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, часто уступают зарубежным аналогам по уровню свойств. В связи с этим отечественные производители фасонной продукции из легких сплавов вынуждены закупать их за рубежом (Великобритания, Германия, Италия, США и др.).

В монографии отражены результаты по разработке составов импортозамещающих разделительных покрытий и экспериментально обоснована возможность их применения при литье автомобильных колес под низким давлением из силумина АК12, приведены результаты исследований с использованием программного пакета ProCAST<sup>®</sup> процесса формирования качества поверхности колес под низким давлением при различных теплофизических свойствах разделительного слоя в системе «расплав – разделительное покрытие – металлическая форма».

В работе были применены методы лазерной гранулометрии, дифференциально-термического анализа (ДТА) оптической плотности (ОП) газов, лазерной вспышки, метод измерения формозаполняемости расплава по спиральной металлической пробе, оптической микроскопии, контроля уровня механических свойств, ресурсных испытаний автомобильных колес, что обеспечило достоверность полученных результатов, при обработке которых использовались стандартные компьютерные программы.

---

---

## **1. РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДИСКОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ КОЛЕС**

В последние годы в структуре мирового рынка металлов заметно растет доля, приходящаяся на алюминиевые сплавы, которые обладают высокими технологическими и эксплуатационными свойствами: низкой литейной усадкой, высокой формозаполняемостью, хорошей коррозионной стойкостью и свариваемостью. Это связано с развитием автомобильной промышленности ведущих стран и увеличением такого сегмента отрасли, как производство легкосплавных колес. Ежегодно разрабатываются новые модели, и подавляющее большинство их изготавливается из алюминиевых сплавов методом литья под низким давлением.

Одним из ключевых условий получения годных отливок по данной литейной технологии является нанесение на поверхность металлической формы разделительных покрытий, способствующих регулированию теплового режима.

Анализ литературных данных показан в работах [1–3].

### **1.1. Современные технологии изготовления дисков автомобильных колес**

Колесо, обеспечивая движение автомобиля, воспринимает все усилия и моменты, действующие между дорогой и автомобилем, и должно надежно противостоять ударным и циклическим нагрузкам [2–5]. При всем многообразии диски колес можно классифицировать по отдельным группам (рис. 1.1).

Сегодня основными факторами, определяющими технический уровень автотранспортного средства и направления его развития, являются материалы и конструкции, способные облегчить массу автомобиля, снизить расход топлива, повысить экономический и экологический аспекты [2, 3, 7].

Примерно до середины XX в. диски колес автомобилей изготавливали путем раскатки и штамповки из стальной полосы с последующей сваркой, что обеспечивало их дешевизну и сравнительную близость к стандартным размерам. Невысокая точность геометрии и несбалансированность дисков колес, получаемых при такой технологии, не считались существенными недостатками из-за умеренных требований к скоростным характеристикам автомобилей тех времен [2, 3].

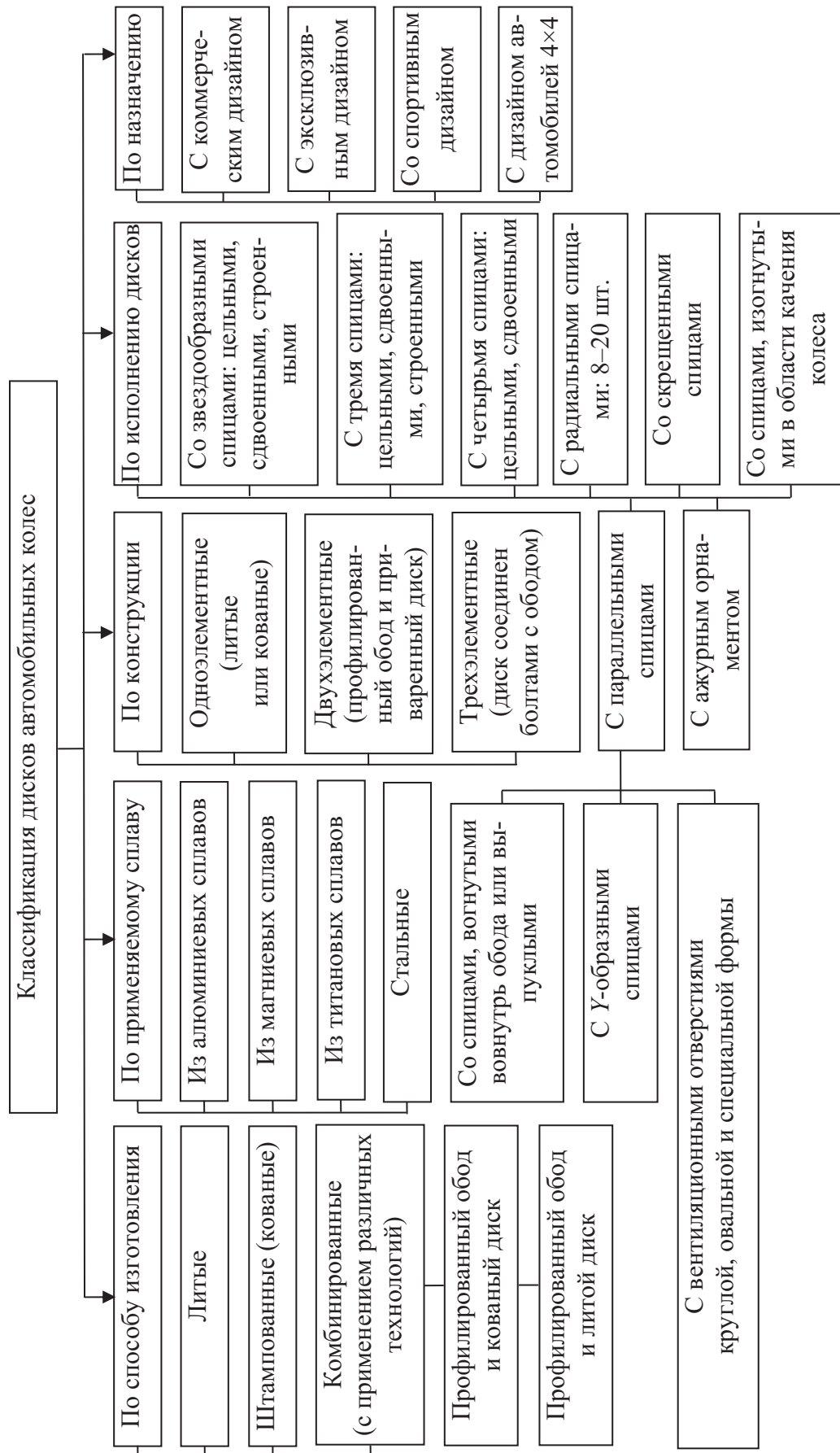


Рис. 1.1. Классификация дисков автомобильных колес [2, 5, 6]

С ростом скоростей и требований безопасности недостатки стальных штампованных дисков колес становились все более ощутимыми. В то же время развитие технологий проектирования и производства шин способствовало существенному повышению их геометрической точности и снижению неоднородности [2, 3].

В 30–50-е гг. прошлого века на гоночные автомобили начали устанавливать алюминиевые диски. В отечественной промышленности попытки производства дисков из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов делали в 80-е гг. XX в. [2–4].

Как видно из рис. 1.1, по способу изготовления диски можно поделить на три категории: литые, штампованные и комбинированные (сборные).

**Штампованные (кованые) диски.** В мире существуют следующие виды кованых дисков:

- изготовленные моноблочной штамповкой;
- полученные штамповкой с последующей раскаткой;
- для сборных кованых колес.

*Моноблочная штамповка.* При горячей штамповке (ковке) достигается наивысшая прочность, поскольку структура металла становится волокнистой, а направление этих волокон – изначально заданным. Недостаток штамповки – большой процент отходов, что увеличивает цену изделия [2, 3, 8, 9].

В России используют технологию объемной горячей штамповки, включающую несколько этапов. Сначала небольшую цилиндрическую болванку (слитки, из которых делают диски колес, имеют форму цилиндрических столбов различного диаметра, их нарезают на болванки нужной длины) на первом прессе осаживают, превращая в диск. Затем этот диск проходит несколько прессов, обеспечивающих различное усилие, постепенно превращаясь в окончательную заготовку. На определенном этапе, еще в заготовке, прошивают центральное отверстие (рис. 1.2) [2, 3, 9].

Перед каждым прессованием заготовку и рабочие штампы нагревают до температуры в несколько сотен градусов. Сами прессы, несмотря на достаточно большую мощность (до 20 тыс. т), производят горячую штамповку медленно. Нагрев и малая скорость деформирования исключают возможность возникновения нежелательных разрывов и трещин в теле заготовки [2, 3, 9].

Полученную заготовку закаливают и подвергают искусственному старению. Затем, после многочисленных проверок и выборочного контроля качества заготовки (структуры волокон), она проходит механическую обработку на токарных и фрезерных станках, в результате превращаясь в готовое изделие [2, 3, 9].

При пластическом деформировании за счет измельчения кристаллической решетки и ликвидации внутренних микродефектов металл упрочняется.

Благодаря такой технологии с формированием у металла волокнистой структуры прочность дисков колес получается выше, чем у остальных, в 2,5 раза, а пластичность – ниже всего на 20–30 %.

Можно делать стенки на 20 % меньшей толщины по сравнению с литыми. В результате вес такого диска на 15–20 % ниже литого и на 40–50 % стального штампованного [2, 3, 9].



Рис. 1.2. Установка для производства кованных дисков [9]

Имеется еще один существенный недостаток данной технологии. В процессе формирования в колесо превращается лишь 30–40 % исходного материала. Остальное выгорает в печах, и особенно много уходит со



стружкой. Эти отходы можно переплавить и снова пустить в производство, но себестоимость значительно повышается. Однако такие диски при эксплуатации хорошо противостоят неровностям и ухабам. Расколоть качественный кованый диск колеса почти невозможно. В случае небольшого замятия их можно отреставрировать, хотя любое воздействие на такой диск все равно нарушает его структуру [2, 3, 9].

*Штамповка с последующей раскаткой.* Суть данной технологии заключается в штамповке заготовок до оформления ступицы, полотна с прилегающей ребордой и цилиндрической частью с последующим формообразованием (раскаткой) из нее обода и реборды (рис. 1.3).

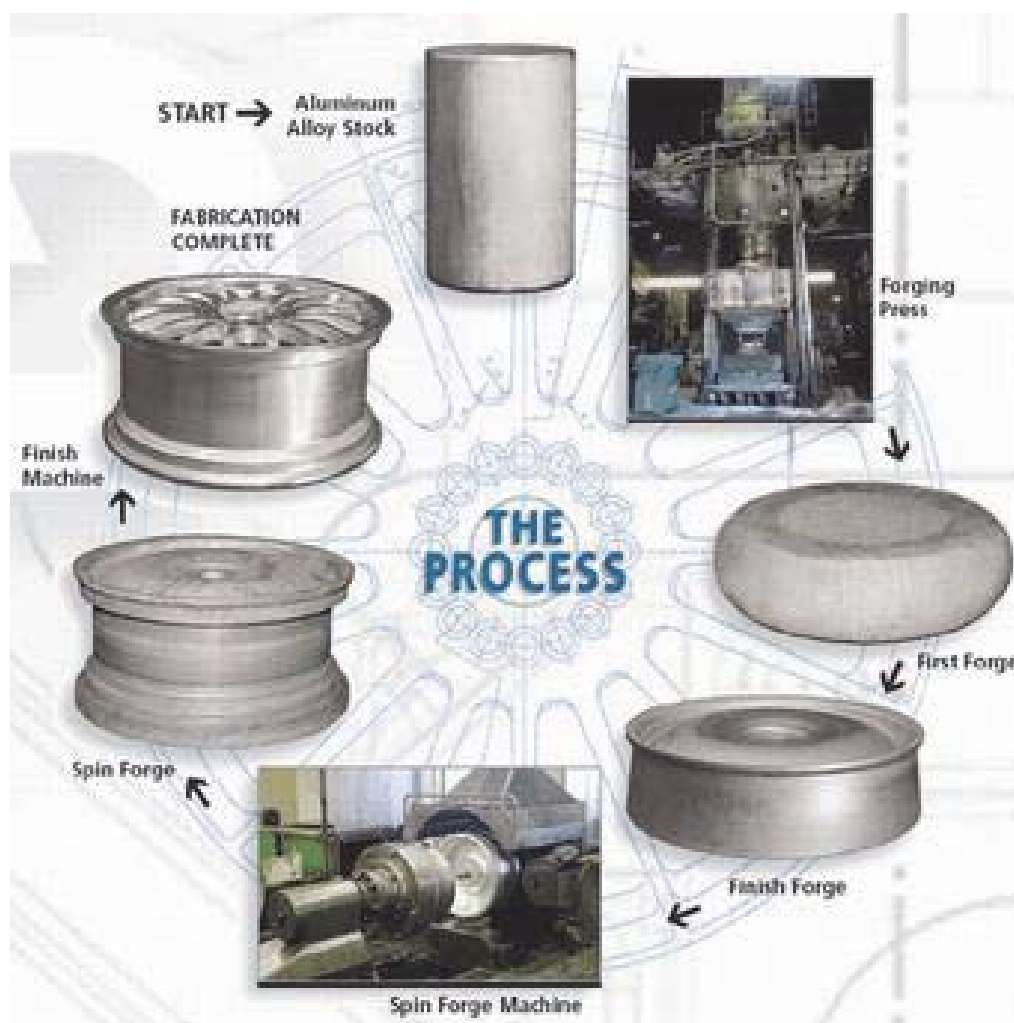


Рис. 1.3. Технология получения диска методом штамповки с последующей раскаткой [11]

Формообразование обода и реборды производят роликом с обжатием до размера, превышающего толщину обода на величину калибровки. Калибровку обода и реборды осуществляют калибровочным роликом, про-

филь поверхности которого аналогичен профилю обода и реборды готовой детали [2, 3, 10].

Преимущество процесса раскатки перед штамповкой состоит в том, что благодаря использованию локального деформирования с вращением сохраняется мелкодисперсная структура диска, возможно получение дисков большого диаметра и сложной формы при незначительных усилиях [2, 3].

*Изготовление сборных кованых колес.* При таком подходе кованая лицевая часть изготавливается методом объемной горячей штамповки, а обода – методом раскатки (при этом ширина обода может варьироваться от 6 до 12 дюймов). Полученные заготовки отдельно проходят идентичную предыдущим двум вариантам термическую и механическую обработку, на них наносят лакокрасочное покрытие, а затем производится сборка лицевой части с ободом при помощи крепежных болтов [11].

*Литые диски.* Сырьем для изготовления литой продукции служит магний или алюминий. Производственный цикл состоит из нескольких этапов, среди которых дизайн, расчет и моделирование форм, подача жидкого сплава в заливочные формы, обработка посадочных поверхностей и обтачивание крепежных отверстий поковки после остывания металла на токарном станке [12].

Очевидное преимущество легкосплавных образцов заключается в их легкости, что ведет к уменьшению инерционной массы, повышению срока службы подвески, плавности хода, управляемости и устойчивости транспортного средства. К тому же литье относится к категории безотходных производств, что непосредственно сказывается на низкой себестоимости продукции. Лучшим доказательством неоспоримых достоинств легкосплавных колесных образцов является то обстоятельство, что они повсеместно устанавливаются на спортивные марки машин. Большинство автоладельцев также предпочитает купить диски именно этой модификации. Несовершенство конструкций заключается в возможности образования скрытых литых раковин и снижении механической прочности, обусловленной свободной кристаллической структурой стального сплава, что приводит к его хрупкости. При ударном воздействии диск может расколоться [12].

*Комбинированные диски.* В работах [2, 3, 13–16] показано, что одним из перспективных процессов для производства заготовок сложно-профильных объемных алюминиевых деталей является комбинация литейных и деформационных способов.

*Жидкая штамповка.* Процесс жидкой штамповки кристаллизующегося металла совмещает достоинства литья под давлением и горячей объемной штамповки.

Оценка возможности изготовления жидкой штамповкой дисков автомобильных колес диаметром 17 дюймов из алюминиевых сплавов

A356.2 и 6061 описана в работах [2, 3, 16]. Показано, что при этом способе изготовления автомобильных дисков достигается более плотная и однородная структура, повышаются механические свойства и устраняются литейные дефекты.

*Литье под низким давлением с технологией раскатки обода* (рис. 1.4). Это не менее перспективный способ получения автомобильных дисков, который способствует достижению легкости и высокой прочности обода диска.



Рис. 1.4. Технология литья с раскаткой обода [2, 3, 15]

Диски с раскаткой обода имеют эксплуатационные качества кованных дисков по цене литых [2, 3, 17].

*Технология Liquid Forging* (рис. 1.5–1.7). Данная технология объединяет преимущества литья иковки. Расплавленный алюминий подается в форму и осуществляется первичное давление в 5 МПа (50 кг/см<sup>2</sup>) и последующее давление в 100 МПа (1 000 кг/см<sup>2</sup>). Третья степень давления – 400 МПа (4 000 кг/см<sup>2</sup>) – 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 (рис. 1.6) [18].

Колесные диски, изготовленные с применением технологии Liquid Forging, имеют следующие преимущества:

- отсутствие усадочной раковины, микроотверстий и пор;
- мелкозернистость (20–30 нм);
- лучшее прохождение поворотов, более высокую радиальную износоустойчивость и ударопрочность (по отношению к дискам, литым при низком давлении);
- вариативность и изысканность дизайна в сравнении с цельноковаными дисками;

- более низкий вес (на 30 % меньше по отношению к литым дискам);
- высокие механические свойства и отличную микроструктуру [18].

*Plant engineering business*

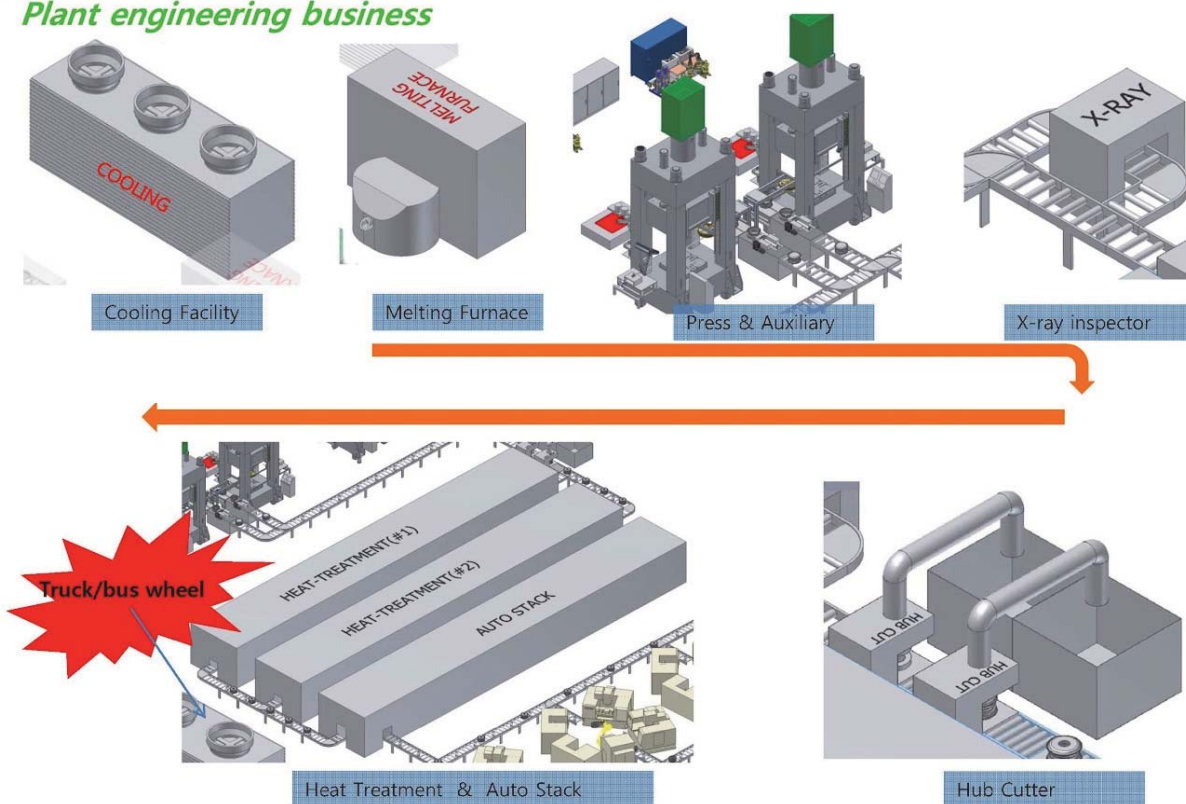


Рис. 1.5. Метод Liquid Forging для изготовления дисков грузовиков и автобусов [19]

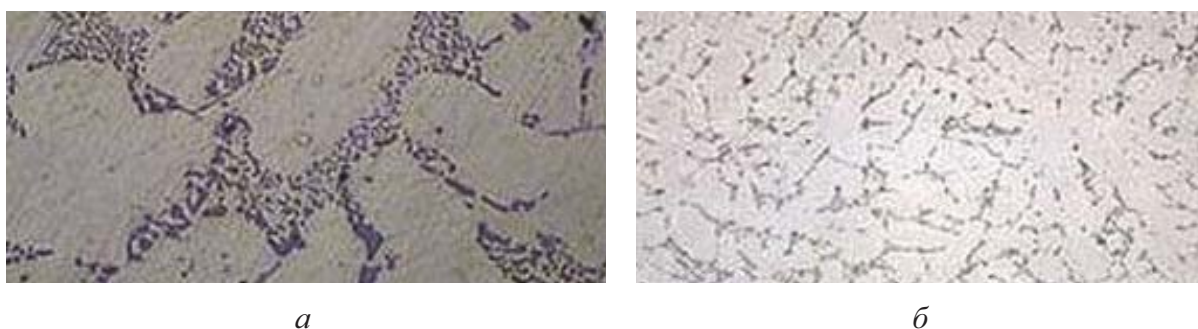


Рис. 1.6. Микроструктура диска, полученного литьем под низким давлением (а) и по технологии Liquid Forging (б) [18]

*Технология Flow Forming* (рис. 1.8) [2, 3, 20]. Суть технологии заключается в следующем. После окончания процесса литья колесный цилиндр раскручивают, оказывая равномерное давление на его внутреннюю поверхность. Вследствие чего алюминий спрессовывается, становясь в то же время более эластичным и приобретая более высокий предел прочности.

Данный процесс наделяет металл теми же свойствами, что и ковка. В результате колесо становится легче, прочнее, устойчивее к ударам, долговечнее, а также получает повышенную грузоподъемность (рис. 1.9, 1.10) [21].

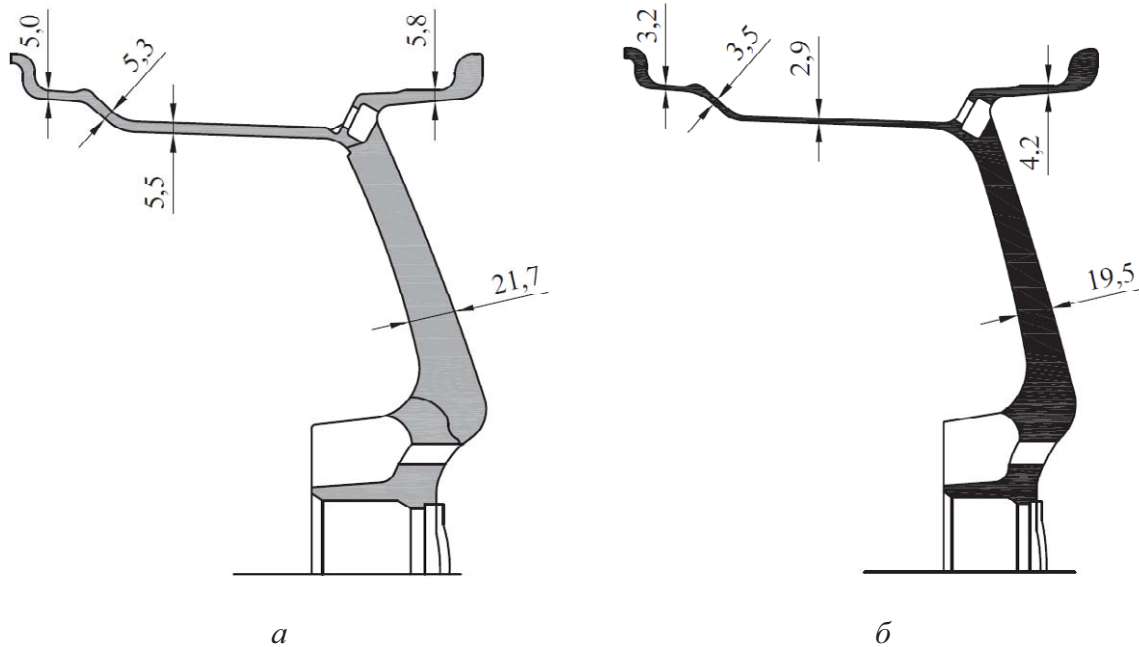


Рис. 1.7. Толщина обода литого (а) и жидкокованого (б) диска [18]

У Kosei такой метод имеет название Super Forming (SF), у MI-tech и Marcello – FF (Flow Forming).

В табл. 1.1 приведены сравнительные данные дисков, полученных по различным технологиям.



Рис. 1.8. Диски, полученные по технологии Flow Forming [21]

Преимуществами технологии Flow Forming являются [21]:

1. Легкость. В результате применения технологии Flow Forming колесо становится на 25 % легче аналогов с таким же дизайном и характеристиками, полученных при обычной плавке. Облегченные колеса пользуются особенной популярностью у гонщиков, стремящихся снизить безрес-

сорный вес, но разница будет заметна на абсолютно любом автомобиле. Легкие колеса не только увеличивают скорость разгона, но и снижают расход топлива.

2. Прочность. В среднем предел прочности колес, изготовленных по технологии Flow Forming, выше на 20–30 %. Это помогает как во время автогонок, так и при решении повседневных задач.

3. Устойчивость к ударам. Повышенная удароустойчивость также немаловажное преимущество, существенно увеличивающее срок службы колеса при езде по плохим дорогам.

4. Эластичность. В плане эластичности колеса, произведенные с использованием технологии Flow Forming, очень сильно превосходят обычные. Такие изделия можно значительно сильнее изогнуть прежде, чем они сломаются. Данная технология повышает эластичность колесного цилиндра как с внешней, так и с внутренней стороны, обеспечивая преимущество во время автогонок и при решении повседневных задач.

5. Грузоподъемность. Колеса, изготовленные по технологии Flow Forming, имеют более высокую грузоподъемность.

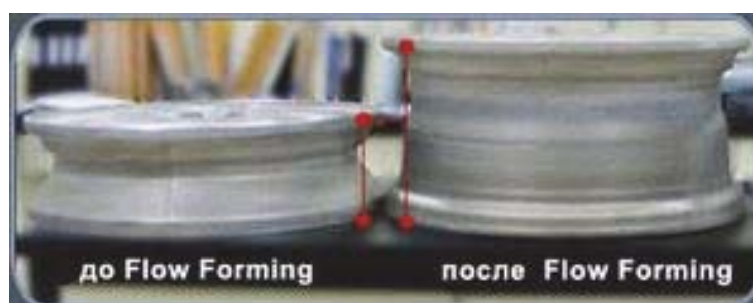


Рис. 1.9. Внешний вид дисков до и после обработки их по технологии Flow Forming [18]



а



б

Рис. 1.10. Микроструктура металла диска до и после применения технологии Flow Forming [18]

*Способ получения дисков методом литья и изготовления обода по технологии MAT (Most Advanced Technology). Данный способ позволяет добиться показателей, приближенных к характеристикам кованных дисков, и снизить вес на 10–15 % [2, 3, 22, 23].*

Таблица 1.1

**Механические и эксплуатационные характеристики дисков [18]**

Технология	Временное сопротивление разрыву, МПа (кгс/м <sup>2</sup> )	Предел сжатия, МПа (кгс/м <sup>2</sup> )	Продолжение эксплуатации, %
Литье	0,000 26 (27,0)	0,000 17 (17,0)	0,000 09 (9,0)
Литье под низким давлением	0,000 27 (27,4)	0,000 17 (17,2)	0,000 06 (6,1)
Литье под низким давлением + Flow Forming	0,000 27 (28,0)	0,000 17 (17,7)	0,000 14 (14,4)
Жидкая ковка + Flow Forming	0,000 30 (30,7)	0,000 19 (19,0)	0,000 15 (15,8)

В основу самой современной технологии МАТ вошло сочетание технологии цельной отливки колеса и технологии формирования обода посредством применения процесса вытягивания [23].

## **1.2. Характеристика метода литья под низким давлением**

Литье под низким давлением считается наиболее эффективной промышленной технологией для изготовления автомобильного диска. Она только частично зависит от человека и хорошо подходит для автоматического программирования отдельных технологических фаз процесса. В связи с тем что заполнение формы происходит без завихрений на ламинарном потоке, процесс позволяет практически гарантировать отсутствие пористости в получаемых отливках [24].

Процесс литья под давлением имеет более чем вековую историю. Его возникновение относится к концу XIX в., и первоначально он использовался в основном для цинковых сплавов, однако уже к 1915 г. выпускалось значительное количество изделий из алюминия, являющегося наиболее востребованным в промышленности цветным металлом.

Развитие теории и практики литья под давлением совместно с выпуском широкой номенклатуры изделий привело к совершенствованию оборудования и появлению прообраза современных литейных машин.

Возможность регулирования давления на металл позволила сформировать принципы литья под низким давлением, которое выделилось в самостоятельное направление и получило большое значение в промышленности [25, 26].

Принцип процесса ЛНД заключается в принудительном заполнении рабочей полости металлической формы расплавом и последующем формировании отливки под действием избыточного давления (рис. 1.11).