
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 629.01(075.8)

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И СНИЖЕНИЕ СТОИМОСТИ
КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ**© 2025 г. В. Ф. Коростелев¹, М. С. Денисов^{1, *}*¹Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия***e-mail: denisovmaxim90@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.02.2024 г.

После доработки 07.12.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

В машиностроении процессы производства литых заготовок конкурируют с процессами обработки металлов давлением. Эта конкуренция обостряется при сравнении свойств таких конструкционных материалов как сталь и сплавы на основе алюминия. На основании результатов исследований и сравнительного анализа различных решений разработана технологическая схема процесса литья с горизонтальным расположением камеры прессования, свободным заполнением жидким металлом полости формы и наложением высокого давления на кристаллизующийся металл. Рассматривается вариант литья и наложения давления, нацеленный на подавление усадки в отливке в виде кольца. Определены преимущества и недостатки. Названы возможности расширения области применения. Определены требования к конструкции оборудования, к средствам контроля, регулирования и управления процессом.

Ключевые слова: давление на жидкий металл, компенсация усадки, сплавы на основе алюминия, специальное оборудование, отливка под внутренним давлением, класс точности отливок, высокая герметичность отливок, использование металла, миниметаллургическое производство

DOI: 10.31857/S0235711925020038, EDN: DHILSD

Одной из наиболее острых проблем в современном машиностроении является эффективное использование металлопродукции. Основными направлениями решения проблемы являются: 1) развитие процессов производства заготовок с минимальными припусками на механическую обработку в литейном и кузнечно-штамповочном производствах; 2) сокращение длительности и трудоемкости производства изделий из металлов; 3) исследования и разработки технологических процессов с высоким инновационным потенциалом.

В представленной статье к решению поставленной проблемы предлагается подход, основанный на утверждении, что свойства, качество и надежность изделий из металлов в большей степени формируются во время перехода металла из жидкого в кристаллическое состояние нежели на последующих этапах обработки давлением, термической и механической обработки.

Компенсация усадки кристаллизующегося металла как ключевое направление повышения механических свойств металлоизделий. Общеизвестно, что продукция литейного

производства (ЛП) превосходит продукцию прокатного (ПП) и кузнечно-штамповочного производства (КШП) по такому показателю как отношение открытой поверхности заготовки к ее массе. Для сравнения можно рассчитать этот показатель для литого и ковального автомобильного диска. Коэффициент использования металла (КИМ) ковального диска несравненно ниже, чем литого. Но критерий КИМ не является главным в оценке продукции ЛП, ПП и КШП.

В настоящее время конкуренцию заготовительных производств в машиностроении можно оценить на примере производства автомобильных дисков. Мировой рынок автомобильных дисков из алюминиевых сплавов оценивается в 24.7 млрд долларов США в 2020 г. и ожидается, что к концу 2026 г. он достигнет 36.8 млрд долларов США, при этом среднегодовой рост рынка составит ориентировочно 5.8% [1].

Автомобильные диски (АД) — это продукция массового производства. Переход АД от стальных штампованных к литым из легких алюминиевых сплавов произошел не только благодаря более эффективному использованию всех видов затрат, включая и эксплуатационные. Решающее значение в конкуренции ЛП, ПП и КШП приобретают вопросы качества, экологичности и безопасности.

Важно отметить, что широкое распространение литых АД произошло благодаря разработке нового эффективного процесса литья под низким давлением с противодавлением. Но для изготовления литых АД не могут быть использованы высокопрочные деформируемые сплавы с низкими литейными свойствами. Поэтому необходим поиск компромисса между КИМ и прочностью металла.

Скрытый резерв повышения прочности. Современная теория кристаллизации сосредоточена на формировании структуры, на зависимости размеров зерен металлов от степени переохлаждения [2–4]. Значительное внимание уделяется также поведению атомов жидкого металла, приводящему к образованию ассоциативных групп [5]. При этом незаслуженно из общего поля зрения выпадают вопросы, связанные с механизмом образования кристаллов, с уменьшением объема, занимаемого атомами до кристаллизации. Поэтому представления о дендритах, представленные в трудах Д. К. Чернова не претерпели существенных изменений до настоящего времени.

В структуре литых АД отмечаются дефекты в виде усадочных раковин, различия в расстояниях между осями дендритов в ободке и в ступице от 20 до 60 мкм, а также низкие по сравнению с коваными дисками механические свойства $\sigma_B = 260$ МПа, $\delta = 6\%$.

Ранее было установлено, что сжимаемость жидкого металла — сплава В95 под давлением до 400 МПа достигает 12–13%, в то время как свободная объемная усадка составляет не более 6% [6], из чего следует вывод, что существующие технологии, в которых металл кристаллизуется без внешнего воздействия, производят металл со скрытыми дефектами усадки в виде рыхлот и раковин, разрушающих межatomные связи. Создание условий для компенсации усадки и формирования структуры, не требующей дополнительной обработки, направленной на полное или неполное устранение дефектов, представляет собой назревшую проблему.

Разработка принципиальной схемы процесса компенсации усадки. При производстве АД на машинах литья под низким давлением компенсация усадки происходит за счет притока жидкого металла к фронту направленной кристаллизации. Различие в скоростях отвода теплоты в разных зонах отливки приводит к тому, что в тепловых узлах возникает дефицит металла на компенсацию усадки, что и создает условия для формирования дефектов. Важно при этом отметить, что в полости диффундируют растворенные газы, возникающие при уменьшении объема. Для создания сопротивления диффузии газов низкого давления недостаточно. Наложение высокого давления на зеркало металла в процессе жидкой штамповки эту проблему решает только на незначительной толщине отливки. Возникающая корка твердого металла препятствует распространению давления на жидкий металл.

Само название «жидкая штамповка» отражает сущность принципиального подхода к использованию давления; есть металл, есть инструмент, с помощью которого давление накладывается на металл. Точнее на поверхность металла. Но жидкий металл представляет более сложный по сравнению с твердым, пусть даже нагретым до высокой температуры металлом, объект. За время наложения давления жидкий металл, охлаждаясь, проходит следующую цепь различных состояний: → а — жидкий легкоподвижный; → б — жидкий вязкий; → в — твердожидкий; → г — твердый пластичный; → д — упруго-пластичный; → е — упругий. В результате в металле возникают зоны различной протяженности, в разных температурных интервалах, с разным сопротивлением воздействию давления. Поэтому изменение размеров и формы металла под давлением при переходе из жидкого в твердое состояние называть штамповкой явно некорректно. При штамповке нагретого твердого металла происходит лишь охлаждение металла и увеличение сопротивления пластической деформации.

Представление об обработке жидкого и кристаллизующегося металла давлением как сложного реологического тела приводит к вопросу, как следует накладывать давление, чтобы компенсировать усадку и придать заготовке требуемую форму и размеры.

На разных этапах разработки процессов, совмещающих технологии литья и обработки давлением, возникали предложения о необходимости обоснования законов наложения давления, о взаимосвязи давления со скоростью кристаллизации. Однако до настоящего времени прогресса в использовании давления для компенсации усадки не достигнуто.

На схеме (рис. 1) видно, что в полости 4 можно получить заготовку $\text{Ø}80 \times 70$ мм. Если не накладывать давление, то вследствие усадки, внутри отливки возникнет полость достаточно больших размеров. Наличие двух встречно направленных плунжеров со встроенными гидроцилиндрами обеспечивает возможность накладывать давление на жидкий металл в интервале температур $t_{\text{ж.м.}} - t_L$, а также в интервале $t_L - t_S$. Здесь $t_{\text{ж.м.}}$, t_L , t_S — температура соответственно жидкого металла, ликвидус, солидус. В рассмотрение приняты два варианта. По первому из них давление на металл ~ 400 МПа накладывается в режиме, при котором прессующие плунжеры не способны преодолеть сопротивление и останавливаются на расстоянии 3–5 мм

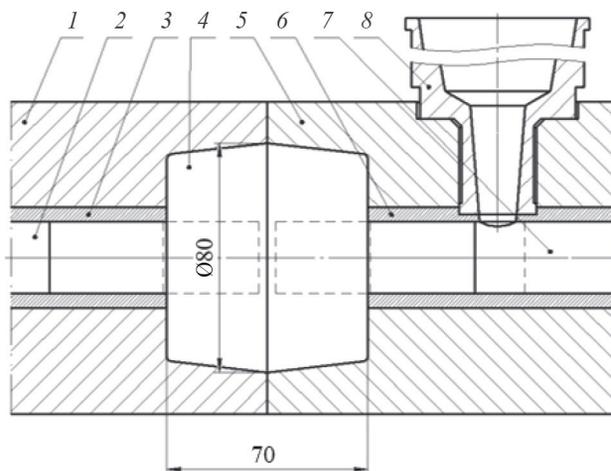


Рис. 1. Схема процесса заливки металла и наложения давления: 1 — полуформа левая; 2 — плунжер прессующий левый; 3 — камера прессования левая; 4 — полость формы; 5 — полуформа правая; 6 — камера прессования правая; 7 — плунжер прессующий правый; 8 — чаша заливочная.

от торцов заготовки. Предполагалось, что в сечении 80×70 мм будет сформирована плотная однородная структура без усадочных дефектов, а полученные таким образом литые заготовки по свойствам могут приближаться к свойствам проката.

Изучение макро- и микрошлифов показало, что избежать наличия рассеянной пористости в самом центре сечения оказалось невозможным. На не полную компенсацию усадки указывают и провалы значений твердости [7].

По второму варианту прессующие плунжеры под таким же давлением сжимают металл в центре сечения.

По такой схеме бездефектная структура формируется в отливке в виде кольца $\text{Ø}80 \times \text{Ø}30 \times \text{Ø}70$.

Значения основных параметров процесса представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения основных параметров процесса

Параметры	Значение
Температура заливки металла t_3 , °C	850
Начальная температура формы $t_{\text{ф}}$, °C	100–300
Давление на кристаллизирующийся металл p , МПа	0–400
Температура солидуса t_L , °C	580
Температура ликвидуса t_s , °C	650
Режим модуляции f , Гц	0–10
Покрытие формы	Графитовая смазка

На данном этапе исследований можно сделать следующие выводы: 1) наложение давления на жидкий и кристаллизирующийся металл является наиболее эффективным и альтернативным средством компенсации объемной усадки металла, повышения его плотности и формирования бездефектной структуры; 2) процесс наложения давления необходимо осуществлять в два этапа: на первом — опрессовка жидкого металла под давлением ~ 200 МПа, на втором — наложение давления 200–400 МПа на кристаллизирующийся металл с преодолением сопротивления атомов перемещения на компенсацию усадки; 3) компенсацию усадки металла необходимо осуществлять выдавливанием металла из теплового центра до момента, когда температура отливки достигнет значения t_s ; 4) для обоснования функциональной зависимости величины давления от реологических свойств кристаллизующегося металла необходима информация для определения положения фронта и скорости кристаллизации, что представляет собой отдельную трудноразрешимую задачу; 5) для эффективного использования давления в литейных технологиях необходима специальная технологическая оснастка и соответствующее технологическое оборудование.

Требования к специальной технологической оснастке. В соответствии со схемой (рис. 1) в конструкции технологической оснастки необходимо предусмотреть заполнение формы жидким металлом ровным потоком, отвод воздуха из полости формы и наложение давления на жидкий металл до начала кристаллизации. Этого можно достигнуть (рис. 2) использованием двух заливочных чаш б, перетеканием металла из одной из чаш в другую, перекрыванием заливочных отверстий плунжерами I и сжатием металла в замкнутой полости. Плунжеры выдавливают металл из резервных камер конической формы, в которых металл кристаллизуется в последнюю очередь.

Для изготовления формообразующих деталей оснастки применяются те же материалы, с той же термической обработкой на твердость 42–45 HRC, что и при литье под давлением [8]. Это штамповые стали 5ХНМ, 4Х5МФС, 3Х2В8Ф и др. [9].

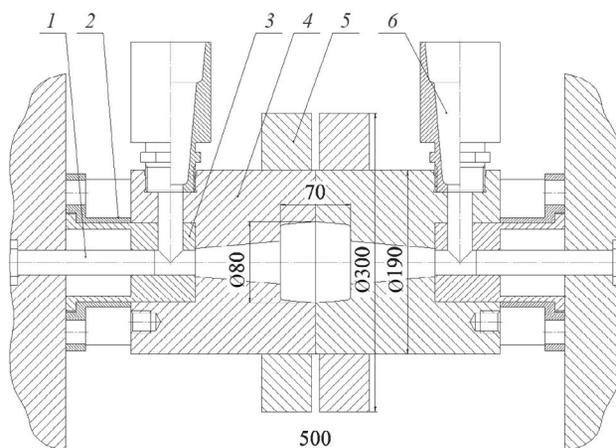


Рис. 2. Комплект технологической оснастки для наложения давления: 1 — плунжер прессующий; 2 — основание формы; 3 — камера прессования; 4 — корпус формы; 5 — кольцо (бандаж); 6 — заливочная чаша.

Наружный диаметр полуформ назначается как для сосудов, работающих под внутренним давлением в 3–5 раз больше диаметра отливки. Применение колец 5, устанавливаемых с предварительным нагревом, позволяет это соотношение уменьшить.

При диаметре прессующих плунжеров $\varnothing 30$ мм требуемое давление создается гидроцилиндрами, развивающими усилие 0.30 МН, при этом необходимое усилие запирания формы составляет 3 МН. Ход прессующих плунжеров рассчитывается с учетом сжимаемости и усадки металла, достигающей 12–13%.

Информационное обеспечение автоматизированной системы управления. Согласованное со скоростью отвода теплоты наложение давления на металл можно осуществить при условии наличия информации, фиксируемой датчиками в режиме реального времени.

Реализованное в соответствии со схемой на рис. 3 размещение датчиков обеспечило возможность проведения исследований влияния давления на компенсацию усадки и на формирование структуры кристаллизующегося металла.

Изменения в конструкции специального оборудования. Под влиянием давления, которое воздействует на кристаллизующийся металл изнутри и приводит твердую

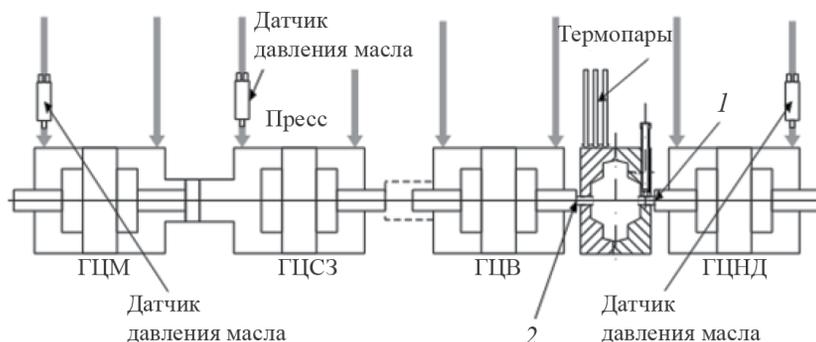


Рис. 3. Схема расположения датчиков: ГЦМ — гидроцилиндр мультипликатора; ГЦЗ3 — гидроцилиндр силового замыкания; ГЦВ — гидроцилиндр встроенный; ГЦНД — гидроцилиндр наложения давления; 1 — правый прессующий плунжер; 2 — левый прессующий плунжер.

корку в идеально плотный контакт с поверхностью формы или штампа, открывается возможность привести точность размеров и класс шероховатости поверхности до уровня, достигаемого на финишных операциях механической обработки. В этой связи возникает проблема базирования технологической оснастки на плитах применяемого оборудования.

Недостатком серийных гидравлических прессов и машин литья под давлением является перекос подвижных плит при внецентренном приложении нагрузки из-за наличия зазора между втулками и направляющими колоннами.

В прессе, спроектированном во Владимирском государственном университете и изготовленном во взаимодействии с КБ «АРМАТУРА» (г. Ковров), заводом «Большевик», ныне Государственный Обуховский завод, на средства отечественного инвестора, этот недостаток устранен установкой блока из двух плит 4 и 8 (рис. 4), разнесенных на значительное расстояние и стянутых приработанными к колоннам 9 гильзами 7.

Направляющие гильзы 7 выполнены с высокой точностью (Н7) как по поверхности контакта с колоннами 9, так и по поверхности запрессовки (h7) в плиты 4 и 8. В пространство между плитами 4 и 8 установлен встроенный гидроцилиндр 6.

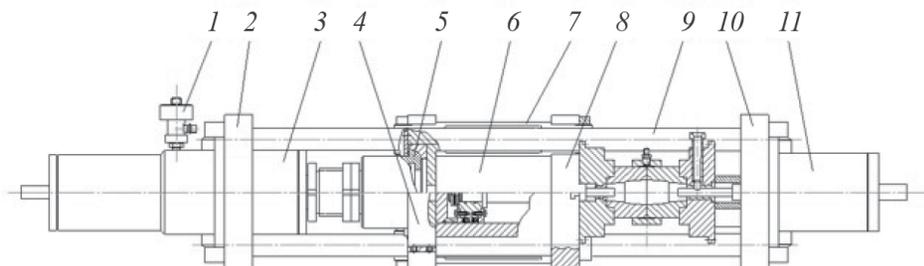


Рис. 4. Усиленный подвижный блок пресса: 1 — регулирующий клапан; 2 — плита мультипликатора; 3 — мультипликатор; 4 — плита встроенного гидроцилиндра; 5 — гидроцилиндр силового замыкания; 6 — гидроцилиндр встроенный; 7 — гильзы; 8 — плита подвижная; 9 — колонны; 10 — плита неподвижная; 11 — гидроцилиндр наложения давления.

Общий вид пресса, установленного в лаборатории кафедры «Автоматизация, мехатроника и робототехника», представлен на рис. 5.

Основные технические характеристики пресса представлены в табл. 2.

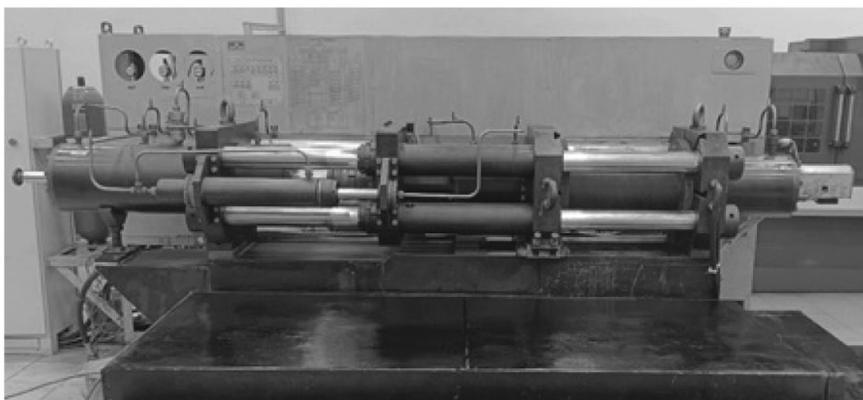


Рис. 5. Пресс с усилием заприраия формы 3МН.

Таблица 2. Основные технические характеристики прессы

Техническая характеристика	Значение
Максимальное усилие прессы, развиваемое подвижной плитой, МН, (300 тс)	3
Ход плиты прессы на открывание формы, мм	250
Скорость холостого хода плиты прессы, мм/с	50
Рабочее усилие гидроцилиндра для наложения давления, МН	0.3
Число гидроцилиндров	4
Расположение гидроцилиндров	Соосное
Скорость холостого хода, мм/с	60

Особого внимания заслуживает тот факт, что при изготовлении прессов были использованы какие технологии, как выплавка стали для гидроцилиндров в мартеновских печах с кислой футеровкой. Слитки стали проковывались на стержни для последующего трехкратного электрошлакового переплава. Очищенную от неметаллических включений сталь переплавляли, доводили по химсоставу, разливали на слитки, из которых на молотах свободной ковки изготавливали заготовки размерами $\varnothing 400 \times 1200$ мм. Цилиндры обрабатывали на высокоточных станках. На рабочую поверхность цилиндров осаждали гальванический хром, трущиеся поверхности поршней обрабатывали бронзированием. За двадцать с лишним лет работы под давлением 10 МПа и 100 МПа в цилиндре запирающей формы не обнаружено случаев подтекания рабочей жидкости.

Точность заготовок, изготавливаемых на прессе, доведена до 6–7 квалитетов точности с шероховатостью ~ 1 мкм. В частности, при изготовлении формообразующих вкладышей пресс-форм для литья пластмасс дополнительная механическая обработка не требуется.

Заключение. Разработка технологических процессов, включающих наложение высокого 200–400 МПа давления на жидкий и кристаллизующийся металл, связана с выполнением проектно-конструкторской и проектно-технологической подготовки производства и потому требует значительной инвестиционной поддержки.

Отсутствие такой поддержки и привело к тому, что совмещенные процессы производства массовой металлопродукции литьем и обработкой давлением ни в отечественной, ни в мировой практике не получили развития.

Инвестор, который вложил большие средства в изготовление 14 прессов (рис. 5), многократно окупил затраты не за счет экономии металла или повышения производительности, а за счет производства заготовок с качественно новым сочетанием свойств.

Так, при изготовлении корпусных деталей, предназначенных для работы под пневматическим давлением до 40 МПа, используют деформируемый сплав на основе алюминия типа Д16. Заготовки из проката дополнительно обрабатываются на ковочных молотах. Перед установкой в агрегаты корпуса проходят испытания на герметичность под давлением воздуха до 50 МПа. Значительная часть корпусов не проходит испытания по причине натекания.

Партия из 50 корпусов, изготовленных по технологии литья с наложением внутреннего давления на кристаллизующийся металл, выдержала испытания под давлением 100 МПа.

Герметичность достигается за счет движения атомов под давлением изнутри и проникновения их в междендритные пространства, не достигаемого ни одним из существующих технологических процессов.

Экономический эффект достигается на этапе использования продукции за счет уменьшения массы, повышения надежности и т.д.

Вправе считать, что наложение давления на жидкий и кристаллизующийся металл представляет собой инновационное решение, оценка перспектив реализации которого заслуживает внимания и развития соответствующих взаимосвязей с заинтересованными предпринимателями.

Одним из вариантов использования достигнутых результатов исследований может быть организация совместных мини-металлургических производств продукции с более высоким по сравнению с существующими производствами уровнем механических свойств в деталях типа корпусов, дисков, цилиндров и т.д. гражданского и военного назначения.

Финансирование работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10156, <https://rscf.ru/project/23-29-10156/>

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Merlin M., Timelli G., Bonollo F., Garagnania G. L.* Impact behaviour of A356 alloy for low-pressure die casting automotive wheels // *J. of Materials Processing Technology*. 2009. V. 209. P. 1060.
2. *Тамман Г. Г.* Руководство по гетерогенным равновесиям. Л.: ОНТИ, 1935. С. 166.
3. *Баландин Г. Ф.* Основы теории формирования отливки. В 2 частях. Ч. 1. Тепловые основы теории. Затвердевание и охлаждение отливки. М.: Машиностроение, 1976. 328 с.
4. *Вейник А. И.* Термодинамика литейной формы. М.: Машиностроение, 1968. 332 с.
5. *Марукович Е. И., Стеценко В. И.* Основные трудности современной теории кристаллизации металлов. Пути преодоления // *Литье и металлургия*. 2016. № 3 (84). С. 24.
6. *Шеметев Г. Ф.* Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение. «Производство отливок из сплавов цветных металлов» Часть I (Электронный ресурс). СПб. 2012. 155 с.
7. *Коростылев В. Ф., Денисов М. С., Давыдов К. Е.* Автоматизация управления кристаллизацией под высоким давлением // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2023. № 4. С. 92.
8. *Платонов Б. П.* Размерные расчеты литейной формы. Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1970. 176 с.
9. *Гун Г. С.* Развитие теории обработки металлов давлением (научный обзор). Часть 2 // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 2015. Т. 15. Вып. 3. С. 116.