

## Технология, оборудование, САПР и экология литейного производства

*The paper present the results obtained when investigating fabrication of castings for pistons of high-augmented diesel internal combustion engine. The optimum casting parameter ranges are determined. The development is made of piston construction with combined insert that ensures production of castings of high-loaded pistons with a cavity (gallery) for oil cooling of upper piston ring zone and enhancement of installation zone of upper piston ring.*

М. А. САДОХА, ОАО «БЕЛНИИЛИТ», А. Т. ВОЛОЧКО, ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»,  
В. В. ОВЧИННИКОВ, ПРУП «ММЗ»

УДК 621.43

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПОРШНЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОФОРСИРОВАННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Перед моторостроителями стоит задача создания экологически чистых и экономичных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), соответствующих современным нормам. Практически все варианты решения данной проблемы связаны с существенным повышением рабочих температур в камере сгорания. Это в свою очередь непременно сопровождается увеличением термической нагрузки на верхнюю часть поршня. Поршень – одна из самых важных и напряженных деталей двигателя. Он выдерживает механические нагрузки от сил движения газов и сил инерции, а также тепловые нагрузки от соприкосновения днища с горячими газами и трения его боковой поверхности о стенки цилиндра [1]. Традиционно в силу физико-механических свойств материала для изготовления поршней современных ДВС используют сплавы на основе алюминия, прежде всего сплавы системы алюминий–кремний (силумины) с добавками различных легирующих элементов.

Известно, что максимальные температуры поршней, изготовленных из силуминов, не должны превышать 300 °С, так как дальнейшее увеличение температур ведет к резкому уменьшению физико-механических свойств поршневого сплава. Таким образом, можно говорить о том, что резервы дальнейшего повышения характеристик двигателя внутреннего сгорания с использованием традиционных схем и материалов в значительной мере исчерпаны.

Кроме того, перегрев верхнего поршневого кольца может привести к термической деструкции масла, закоксовыванию кольца, потере им вследствие этого своих служебных характеристик (подвижности) и, как следствие, к быстрому выходу двигателя из строя.

Основные пути обеспечения работоспособности поршней в таких условиях:

- упрочнение поршня в зоне размещения верхнего поршневого кольца, что обеспечит сохранение геометрических параметров канавки под кольцо в условиях повышенных механических нагрузок;
- интенсификация охлаждения зоны размещения верхнего поршневого кольца, что эффективно нейтрализует усиление теплового потока через элементы конструкции поршня и позволяет сохранять температуру указанной зоны в допустимом диапазоне;
- сокращение теплового потока через элементы конструкции поршня за счет создания теплового барьера на поверхности поршня (в данной работе не рассматривается);
- повышение физико-механических антифрикционных свойств алюминиевого сплава при температурах работы поршня.

Для увеличения стойкости поршня в районе канавки под верхнее поршневое кольцо широкое применение получило использование упрочняющей кольцевой вставки, которая в процессе литья посредством ряда технологических приемов сваривается с основным материалом отливки. Наиболее часто в мировой практике используют вставки, которые изготавливают из высоколегированного аустенитного чугуна – нирезиста, содержащего 14–18% Ni, 6–5% Cu, 1,5–2,6% Cr, 2,5–3% C, 2–3% Si, до 0,5% P, 0,5–1% Mn, Fe – остальное [2].

Принято [2], что для обеспечения прочной металлической связи между поршневым сплавом и вставкой последнюю необходимо подвергать специальной обработке – алитированию. В процессе алитирования на поверхности вставки обра-

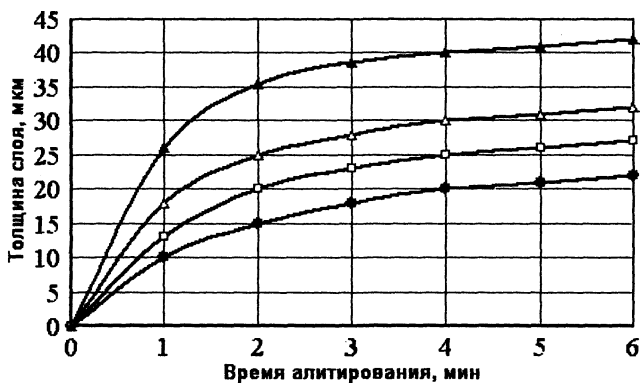


Рис. 1. Влияние времени и температуры алитирования на толщину переходного диффузионного слоя: ● –  $T = 670$  °C; □ – 710; △ – 750; ▲ – 790 °C

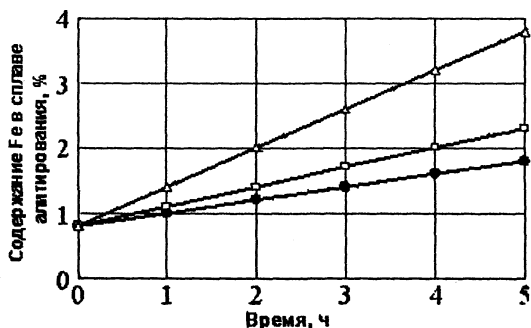


Рис. 2. Влияние времени и температуры алитирования на содержание железа в сплаве алитирования: ● –  $T = 700$  °C; □ – 750; △ – 800 °C

зуется переходный слой, состоящий из диффузионного слоя, на поверхности которого находится тонкий слой жидкого алюминиевого сплава, имеющий прочную связь с диффузионным слоем. Оптимальной толщиной переходного слоя для обеспечения наилучшей связи вставки с основным материалом поршня принято считать 10–30 мкм. Толщина, строение и состав переходного слоя зависят от состава сплава алитирования и других факторов.

Температура является важнейшим технологическим параметром, влияющим как на процесс алитирования, так и на оптимальный срок использования сплава для алитирования.

Установлено (рис. 1), что увеличение времени алитирования приводит к росту толщины переходного диффузионного слоя до определенного уровня с последующей стабилизацией. Увеличение же температуры расплава алитирования приводит к более интенсивному росту толщины переходного диффузионного слоя и установлению ее равновесного размера на более высоком уровне.

Вместе с этим определено, что увеличение времени алитирования сопровождается более интенсивным насыщением сплава алитирования железом (рис. 2).

Это можно объяснить тем, что при увеличении времени контакта комбинированной вставки с расплавом алитирования большее количество железа успевает прореагировать с алюминием и из наружных слоев переходного слоя перейти в расплав.

Установлено, что увеличение количества железа в сплаве алитирования отрицательно сказывается на качестве переходного диффузионного слоя, о чем косвенно можно судить по изменению прочности сцепления алюминиевого сплава с нирезистовой вставкой в процессе получения отливок (рис. 3).

Важным элементом исследований является определение оптимальных технологических условий формирования переходного слоя. При этом главным критерием оценки выступает качество сваривания поршневого сплава с комбинированной вставкой. Косвенно качество сваривания может быть оценено по прочности сцепления поршневого сплава с комбинированной вставкой (рис. 4).

Как видно из рисунка, оптимальной толщиной переходного алитированного слоя можно считать 10–20 мкм.

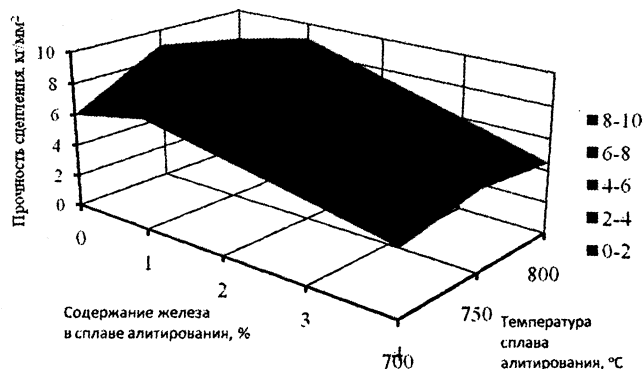


Рис. 3. Влияние содержания железа в сплаве алитирования и его температуры на прочность сцепления нирезиста со сплавом (время алитирования 2 мин)

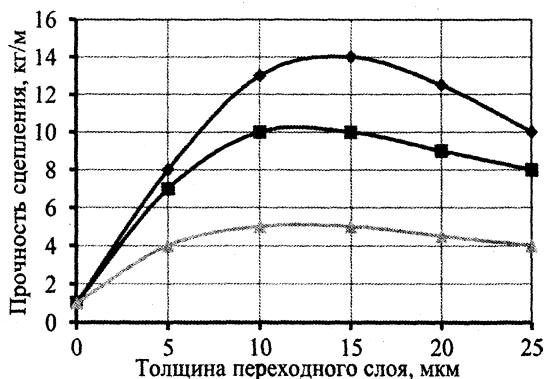


Рис. 4. Влияние толщины переходного алитированного слоя и времени выдержки до заливки алитированной вставки сплавом на прочность сцепления вставки со сплавом: ◆ – 10 с; ■ – 20 с; ▲ – 30 с

Такую толщину слоя можно получить при алитировании вставки в течение значительного диапазона времени в зависимости от температуры алитирования (см. рис. 1). Установлено, что слишком высокая температура алитирования резко уменьшает время насыщения сплава железом и ухудшает качество алитирования (см. рис. 2, 3).

Исходя из анализа полученных результатов, можно определить параметры (см. таблицу) как оптимальные для алитирования комбинированной вставки из нирезиста (состав 14–18% Ni, 6–5% Cu, 1,5–2,6% Cr, 2,5–3% C, 2–3%Si, до 0,5%P, 0,5–1% Mn, Fe – остальное) в сплаве алитирования (AK12M2MgH (AL25)).

Таблица

Параметр	Значение
Температура алитирования, °С	740–760
Время алитирования, с	90–150
Содержание железа в сплаве алитирования, %	Не более 2

На рис. 5 показана микроструктура вставки, алитированной по оптимальному режиму и залитой алюминиевым расплавом.

К мероприятиям, направленным на улучшение структуры и свойств поршневых алюминиевых сплавов, следует отнести обработку покровно-рафинирующими флюсами [3]; продувку расплава инертными газами [4]; комплексную обработку субмикронными и нанодисперсными упрочнителями алюминиевой матрицы [5, 6].

Последние мероприятия в большей степени позволяют устранить дендритную структуру поршневого сплава (рис. 6), обеспечить повышение микротвердости как  $\alpha$ -твердого раствора, так и эвтектики, улучшить эксплуатационные характеристики материала в целом. Измельчение размера керамических фаз представляется на стадии получения порошков, их механической актива-



Рис. 5. Микроструктура вставки, алитированной по оптимальному режиму и залитой алюминиевым расплавом: 1 – алюминиевый сплав; 2 – переходный слой; 3 – нирезист

ции, а также при реакционном литье, когда измельчение фаз достигается во взаимодействии вводимых частиц с алюминиевым расплавом и газами [6].

Проведенные исследования и моделирование процессов охлаждения зоны верхнего поршневого кольца в поршне (рис. 7) свидетельствуют о значительном влиянии способа и места подвода теплоносителя в поршень на разогрев различных элементов поршня.

В результате анализа полученных данных установлено, что наиболее рациональным вариантом как с точки зрения условий охлаждения, так и по технологическим причинам можно считать вариант с применением охлаждающего канала, соприкасающегося с нирезистом [5].

Дополнительно проведенные исследования и технологические работы позволили получить патент на полезную модель «Поршень для двигателей внутреннего сгорания с галерейным охлаждением» [7]. Важнейшей составляющей технологии получения детали «Поршень» является техноло-

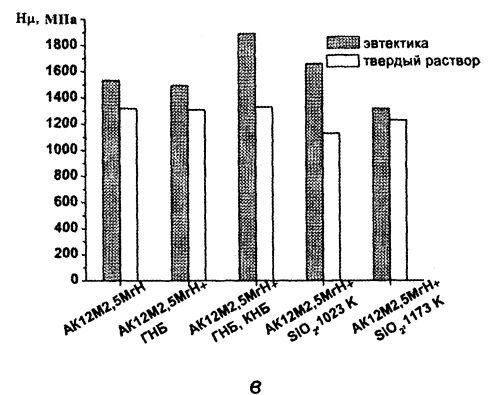
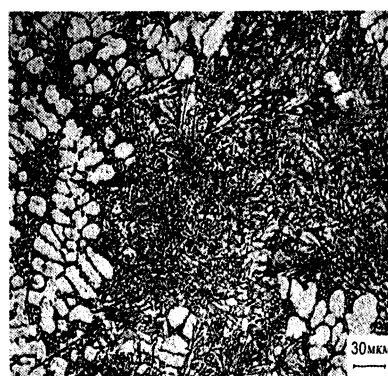
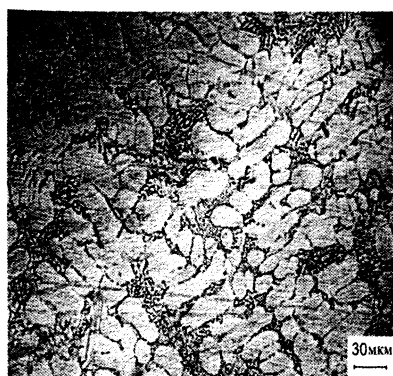


Рис. 6. Микроструктура исходного сплава AK12M2.5MgH и композита на его основе, армированного BN, подвергнутого механической активации в атриторе

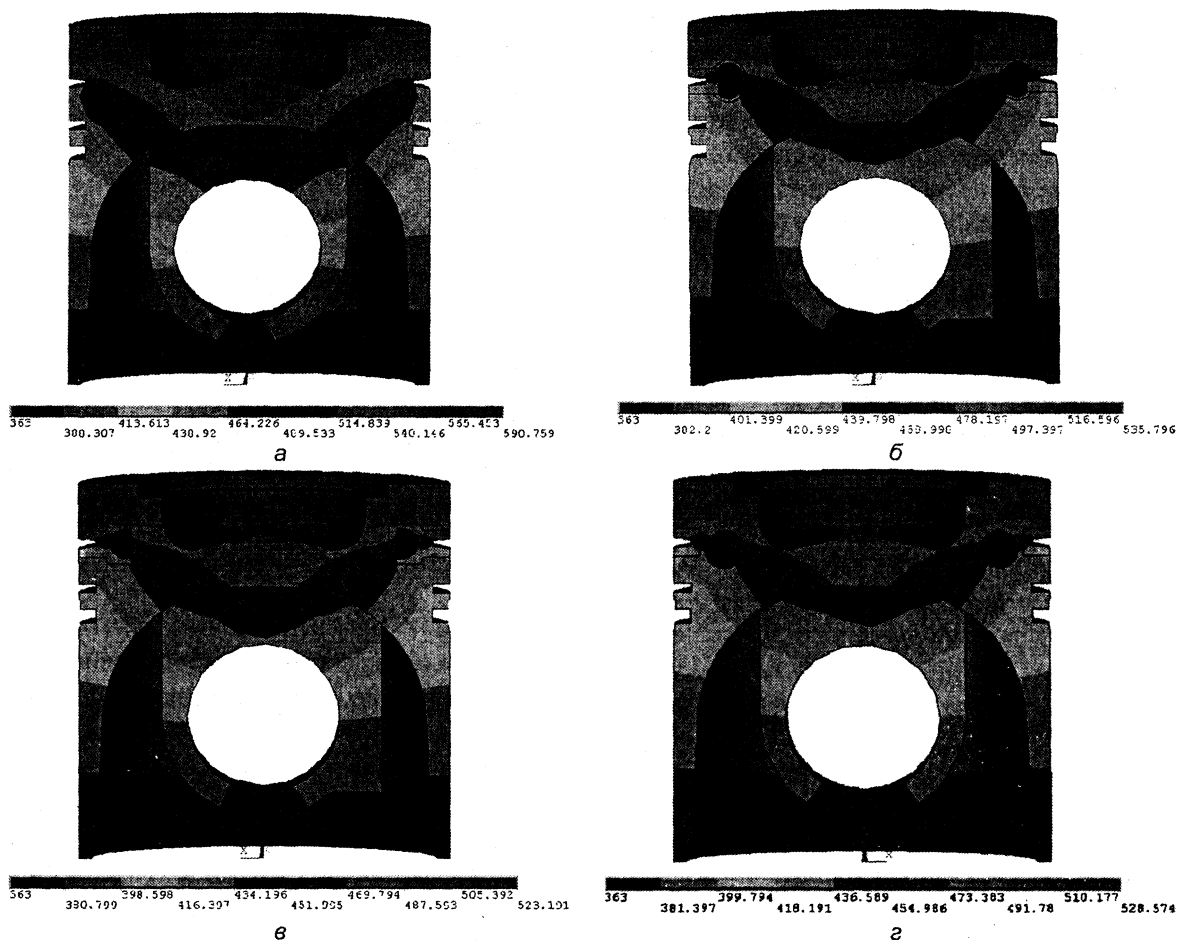


Рис. 7. Распределение температурных полей в теле поршня: *а* – без охлаждения; *б* – с охлаждающим каналом из стали 08 кп и нирезиста; *в* – с охлаждающим каналом из нирезиста; *г* – с безоболочковым охлаждающим каналом

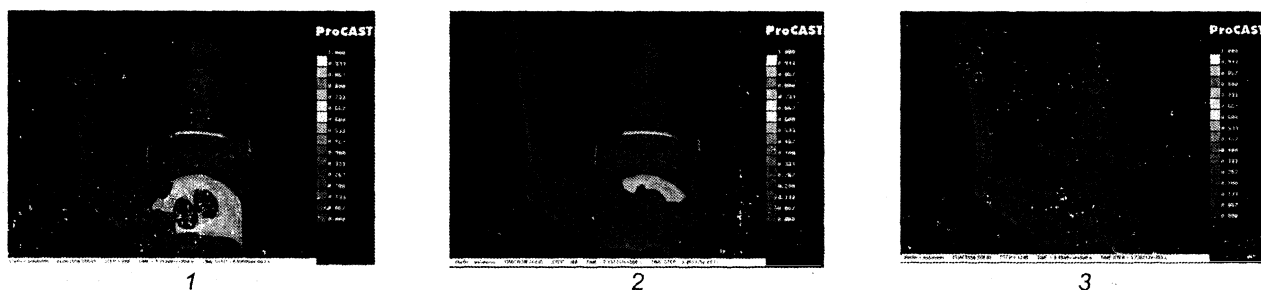


Рис. 8. Фрагменты отдельных этапов заполнения формы расплавом при оптимальных параметрах кокиля: 1, 2, 3 – стадии заполнения кокиля расплавом

гния получения отливки. Установлено, что наиболее приемлемой технологией получения отливок поршней является литье в кокиль. В связи с тем что отливка «Поршень» является крайне неравномерной с наличием значительных перепадов по толщине стенок и больших массивов в определенных зонах, установлено, что водяное охлаждение рационально применить отдельно для некоторых элементов отливки. К таким местам следует отнести днище поршня с внутренней стороны поршня; бобышки под поршневой палец; головку поршня.

Причем для каждого элемента, как установлено в результате моделирования в среде ProCAST,

требуется различное время охлаждения и разная интенсивность потока воды.

На рис. 8 показаны фрагменты моделирования отдельных этапов заполнения формы расплавом при оптимальных параметрах кокиля для обеспечения формирования качественной отливки поршня без усадочных и воздушно-газовых дефектов с каналом масляного охлаждения и нирезистовой вставкой под верхнее компрессионное кольцо.

Анализ результатов моделирования свидетельствует о ламинарном характере заполнения формы, что гарантирует отсутствие воздушно-газовых дефектов в отливке. При этом принятая лит-

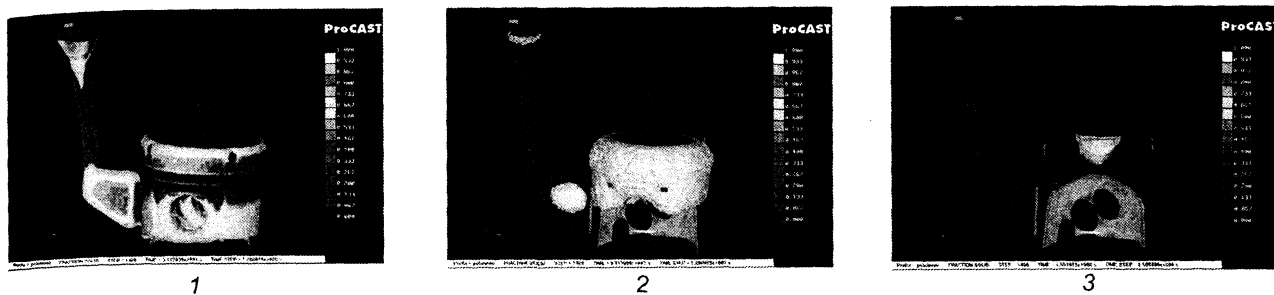


Рис. 9. Моделирование процесса кристаллизации отливки «Поршень»: 1, 2, 3 – стадии кристаллизации отливки

никовая система позволяет провести заполнение в достаточно короткое время – это особенно важно для обеспечения сваривания нирезистовой вставки с алюминиевым сплавом.

При моделировании различных вариантов кристаллизации отливки установлено, что оптимальная исходная температура кокиля 200 °С. Наличие водяного охлаждения дает возможность интенсифицировать процесс производства отливок и стабилизировать тепловой режим кокиля на нужном уровне. При этом моделирование показало, что в случае производства отливок поршней наиболее оптимальным режимом водяного охлаждения является периодическое охлаждение, включаемое сразу после заполнения формы расплавом и прекращаемое через определенный промежуток времени.

Одновременно следует отметить достаточно малый объем литниковой системы и прибыли. Это оказывает положительное влияние на экономические показатели процесса получения отливок поршней в кокилях с выбранными параметрами.

На рис. 9 показан процесс кристаллизации отливки «Поршень» в результате моделирования по

наиболее рациональному варианту. Причем для наглядности процесса на изображениях показана только остающаяся в отливке в процессе кристаллизации жидкая фаза.

Как видно из рисунка, в процессе кристаллизации отсутствуют оставшиеся замкнутые объемы жидкой фазы, что свидетельствует о направленности процесса кристаллизации и, как следствие, формировании плотной структуры отливки без наличия усадочных дефектов. Последние элементы жидкой фазы наблюдаются в прибыльной части отливки.

Таким образом, можно говорить о теоретическом подтверждении правильного выбора параметров кокиля, которые будут обеспечивать получение отливок поршней высокого качества.

Таким образом, в результате проведенных исследований определены основные параметры технологии получения отливок поршней, выполнен анализ теплофизических процессов, протекающих как при формировании отливки, так и при последующей работе поршня. Создана и защищена патентом конструкция поршня с галерейным охлаждением.

### Литература

1. Афанасьев В. К., Гладышев С. А., Ефименко Б. С. и др. Поршневые силумины. Кемерово: Изд-во «Полиграф», 2005.
2. Овчинников В. В., Жданович О. Е., Ласковнев А. П. Производство алюминиевых поршней для высокофорсированных двигателей внутреннего сгорания. Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2003.
3. Немененок Б. М., Задруцкий С. П., Бежок А. П., Кудравец Н. И. Оценка экологической безопасности процессов плавки и выпечной обработки алюминиевых сплавов // *Литье и металлургия*. 2008. № 3. С. 171–174.
4. Краев Б. А., Садох М. А., Мельников А. П. и др. Технология и оборудование для литья поршней // *Литье и металлургия*. 2001. № 4. С. 52–54.
5. Комаров А. И., Сенють В. Т., Шипко А. А. и др. Новые технические решения при создании композитов на основе эвтектических силуминов // *Инновации в машиностроении: Сб. науч. тр. МНТК ОИМ НАН Беларуси*. Мн., 2008.
6. Волочко А. Т., Изобелло А. Ю. Измельчение структуры вторичных алюминиевых сплавов // *Новые материалы и технологии: Материалы докл. 8-й МНТК ГНПО ПМ НАН Беларуси*. Мн., 2008. С. 78–79.
7. Пат. 4713 РБ. Поршень двигателя внутреннего сгорания с галерей охлаждения / МПК F 02 F 3/00.
8. Волочко А. Т., Изобелло А. Ю. Моделирование теплонапряженного состояния поршней высокофорсированного дизельного двигателя внутреннего сгорания с циркуляционным охлаждением // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. 2008. № 2. С. 63–68.