

УДК [621.763+621.74.04]:[621.43+669-2]

## **Thixo- и PIM технологии в современном двигателестроении**

**А. Б. Семенов, А. Н. Муранов, Б. И. Семенов**

*Межфакультетская лаборатория «Новые способы и технологии литья»*

*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»*

## **Thixo- and PIM Technologies in Modern Engine-building**

**A. B. Semenov, A. N. Muranov, B. I. Semenov**

*Interfaculty Laboratory "New Methods and Technology of Casting"*

*FSBEI HE «Bauman Moscow State Technical University (National Research University)»*

Аннотация. В статье проведен краткий обзор информации о применении различных современных технологий для изготовления металлических деталей двигателей внутреннего сгорания и деталей автомобильной промышленности в целом. Описаны тенденции развития этих технологий. Показана эффективность использования технологии инжекционного литья порошковых композиций (MIM) для серийного и крупносерийного производства металлических деталей сложной формы.

Ключевые слова: автомобильная промышленность, двигателестроение, серийное производство сложнопрофильных металлических деталей, технология инжекционного литья порошковых композиций, тиксоформинг.

Abstract. This article gives a brief overview of the information on the application of a various modern technologies for the manufacture of metal parts of internal combustion engines and parts of the automotive industry as a whole. Described some trends of evolution of these technologies. Showed the efficiency of the use of powder injection molding technology (MIM) for serial and mass production of metal parts with complex shapes.

Keywords: automotive industry, engine-building, mass production of complex-metal parts, powder injection molding technology, tixofforming.

Обеспечение высоких технико-экономических показателей перспективных двигателей внутреннего сгорания основано на оптимизации их конструкции и режимов работы, использовании передовых методов проектирования, применении новых материалов и технологий [1, 2]. Анализ научно-технической информации о современных материалах и технологиях производства металлических деталей перспективных двигателей внутреннего сгорания является целью обзора.

Применение новых материалов и технологий имеет, на наш взгляд, следующую направленность:

- снижение массы деталей (в первую очередь подвижных) за счет использования материалов с низкой плотностью (легкие сплавы, керамики) и оптимизации конструкции деталей при применении новых материалов;

- повышение качества и точности сопрягаемых поверхностей деталей, обеспечение точности и постоянства формы и размеров деталей во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок на протяжении длительного срока эксплуатации;

- снижение экономических затрат на производство деталей, что подразумевает минимизацию количества технологических операций, минимизацию временных затрат, снижение энергоемкости производства и эксплуатации, повышение коэффициента использования материалов.

Современные технологии формообразования деталей потребовали использования новой совокупности методов обработки, изготовления, изменения состояния материалов, осуществляемых в процессе производства продукции, и нередко развиваются на основе объединения достоинств порошковой металлургии, методов обработки давлением и литейного производства. Мировые тенденции использования современных технологий изготовления металлических изделий отражены на рис. 1.

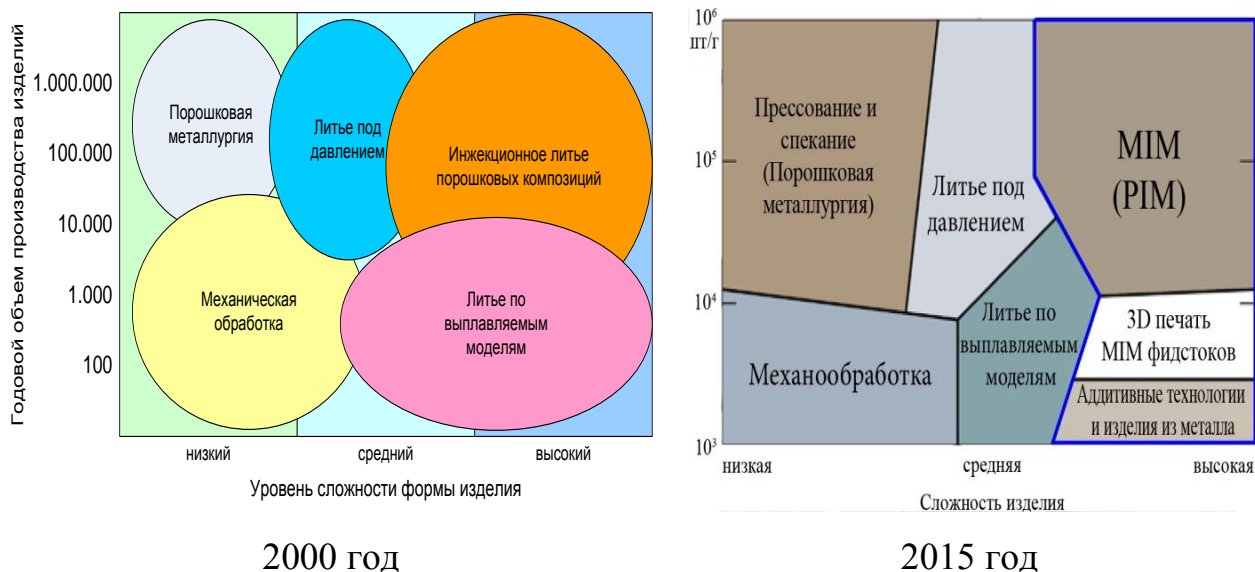


Рис. 1. Тенденции использования различных технологий производства [3]

Область производства изделий максимальной сложности сегодня занимают технология аддитивного производства (AM – additive manufacturing) и технология инжекционного литья порошковых композиций (PIM – powder injection molding). При этом, особенности технологий предопределяет их следующее разделение: AM технология актуальна для мелкосерийного и единичного производства изделий, а PIM технология – для серийного и крупносерийного производств. PIM технология позволяет изготавливать не только детали из металла (MIM – metal injection molding), но и керамические детали (CIM – Ceramic injection molding). Однако 90 % рынка PIM изделий в настоящее время составляют именно изделия на основе металлических порошков. MIM технология, ставшая серьезным конкурентом литью по выплавляемым моделям и механообработке, вытесняет эти технологии там, где делается упор на миниатюризацию изделий, использование новых материалов и усложнение конструкции детали (Таблица 1). Схема MIM процесса с наиболее распространенными вариантами удаления полимерного связующего (дебиндинга) показана на рис. 2.

Таблица 1

## Сравнение конкурирующих методов изготовления деталей

Характеристика	Инжекционное литье порошковых композиций (МІМ)	Порошковая металлургия (Powder metallurgy)	Литье под давлением (Die casting)	Литье по выплавляемым моделям (Investment casting)	Механо-обработка (Machining)
Сложность формы	высокая	низкая	высокая	удовл.	высокая
Толщина стенки, мм	от 0,5 до 10	от 1 до 20	от 0,8 до 10	от 2 до 20	от 0,5 до 100
Качество поверхности Ra, мкм	от 0,4 до 2	от 2 до 5	5	5	от 0,2 до 4
Относительная прочность, %	высокая (> 96)	удовл. (70)	низкая	хорошая (> 90)	высокая (100)
Относительная плотность, %	от 95 до 100	менее 95	от 99 до 100	от 99 до 100	от 99 до 100
Вес, г	от 0,01 до 300	от 5 до 2500	Var	от 1 до 1000	от 1 до 10000
Минимальный относительный допуск на размер, %	от 0,3 до 0,5	1,0	Var	от 0,5 до 1,0	менее 0,1
Разнообразие материалов	большое	среднее	небольшое	среднее	большое
Производительность	высокая	высокая	высокая	удовл.	низкая
Себестоимость	средняя	низкая	низкая	средняя	высокая

Технология МІМ основана на смешивании металлических порошков заданного состава с полимерным связующим, последующем впрыске этой смеси в формообразующую полость литейной формы, отверждении отливки под давлением, извлечении отвержденной заготовки детали (зеленая деталь – деталь из полимера, наполненного металлическим порошком), удалении полимерного связующего (дебинденг) и последующем спекании пористой металлической детали, в результате чего получается готовая (конечная) деталь. При необходимости, после спекания готовая металлическая деталь подвергается дополнительной механической и химико-термической обработке.

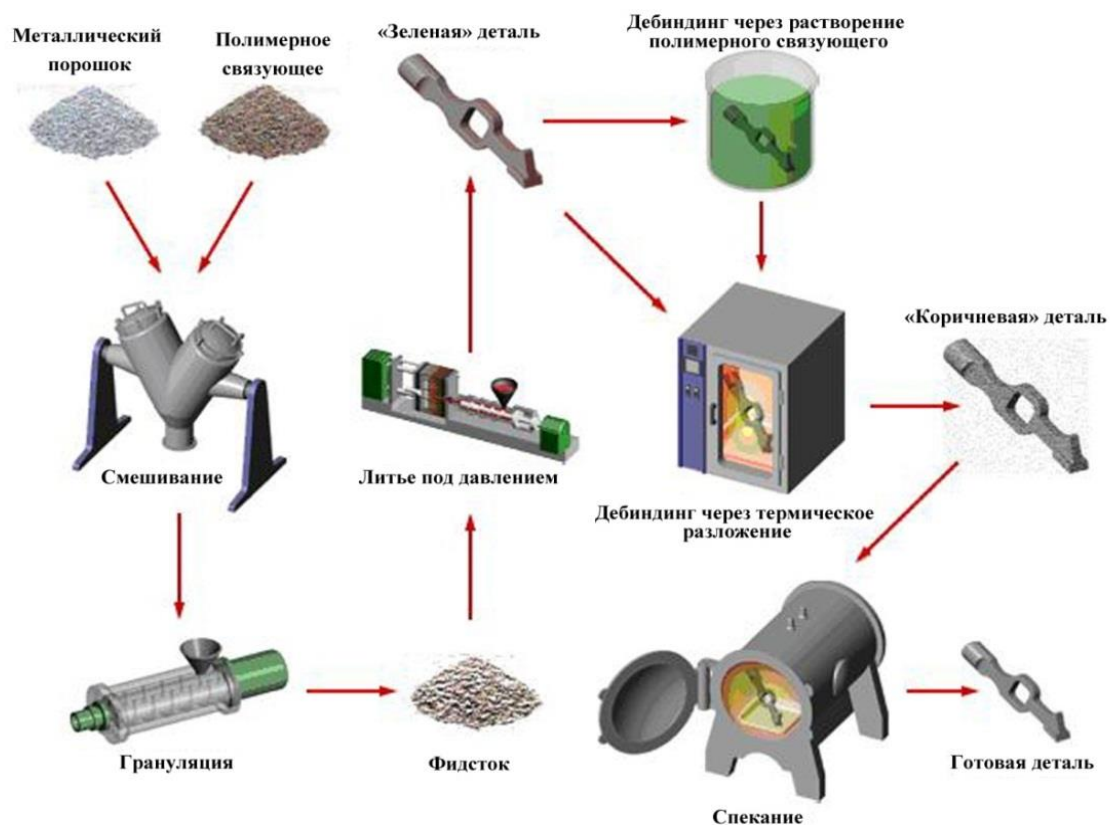


Рис. 2. Схема МІМ процесса с наиболее распространенными вариантами удаления полимерного связующего (дебиндинга)

Современный зарубежный рынок деталей, полученных инжекционным формованием из порошковых композиций, представляет собой сектор заготовительных производств с прогнозируемым к 2017 году объемом продаж изделий более 2 млрд. долларов, этот рынок демонстрирует рост в среднем на 11 % в год, а по отдельным секторам на 40 % в год. В настоящее время, общее число компаний в мире, производящих РІМ изделия, составляет более 400. Распределение долей использования МІМ технологии по секторам зарубежного машиностроения представлено на рис. 3. Так, наибольшие доли зарубежного рынка продукции МІМ технологии занимает производство деталей именно сектора автомобильной промышленности (17,9 %) и потребительских товаров, товаров электроники (совокупно 20,6 %) [3, 4, 5].

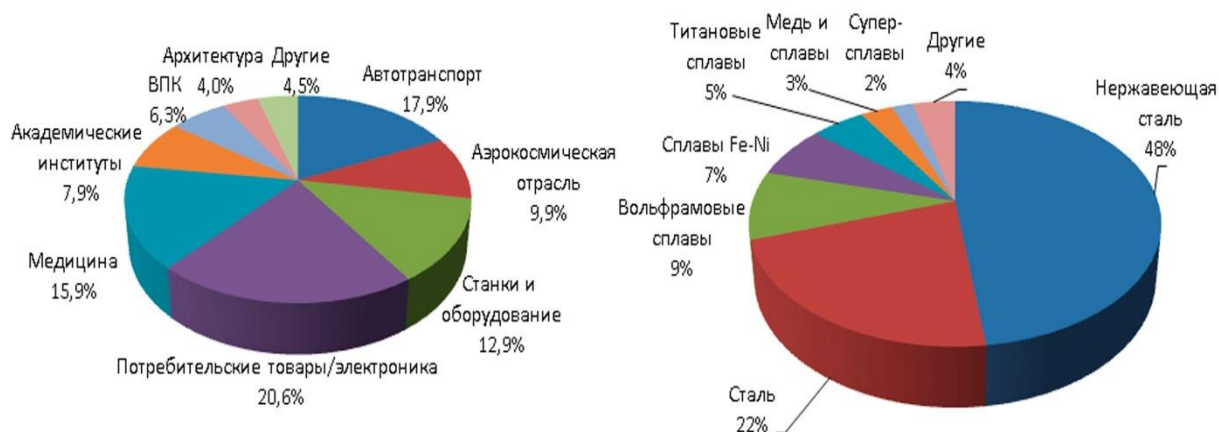


Рис. 3. Использование МИМ технологии в зарубежной промышленности [3]

Широкое использование МИМ технологии в производстве деталей автомобиля началось и продолжается в США. МИМ детали используются в изделиях таких фирм как «Buick» и «Chrysler». Велика доля автомобильных МИМ деталей, производимых в Японии для фирм «Honda» и «Toyota». Европейские производители МИМ-деталей также нашли свою нишу, на пример, в приложениях, связанных с малыми высокопроизводительными двигателями. Передовыми компаниями рынка МИМ технологий являются компании GKN Sinter Metals (международная компания, большая часть производств которой находятся в Германии) и Schunk Sintermetalltechnik GmbH (Германия), развивающих МИМ производство различных автомобильных деталей, некоторые примеры их продукции представлены далее (рис. 4). Производство сырья для МИМ технологий, также сосредоточено в Европе – одним из крупнейших мировых производителей фидстоков является немецкий концерн BASF. Особенно эффективным оказалось использование МИМ технологии для производства деталей турбокомпрессоров, такие крупносерийные производства созданы и функционируют в Венгрии («Advanced Forming Technology») и Корее («P.I.M. Korea Co.») [6].



а) – детали рычагов клапанов, производимые компанией «Schunk Sintermetalltechnik GmbH» (Германия) по заказу BMW



б) – детали турбокомпрессора, производитель – «GKN Sinter Metals»

Рис. 4. Примеры автомобильных деталей, производимых по МІМ технологии в Германии [6]

Существенным достоинством МІМ технологии является возможность изготовления изделий сверхсложной формы, что зачастую не возможно при использовании методов традиционной порошковой металлургии. Традиционные же литейные технологии, такие, как литьё по выплавляемым моделям (ЛВМ), в свою очередь, не в состоянии обеспечить аналогичную размерную точность и прочностные характеристики деталей. Необходимо особо отметить высокое качество

поверхностей деталей, получаемых по МІМ технологии. Шероховатость поверхностей МІМ деталей определяется преимущественно размерами металлического порошка, используемого в фидстоке, так типичная шероховатость поверхностей МІМ деталей составляет менее  $Ra\ 2,5$  [7]. В то же время, для технологии ЛВМ шероховатость  $Ra\ 2,5$  является предельно достижимой, а в общем случае, шероховатость при ЛВМ лежит в диапазоне от  $Rz\ 20$  до  $Rz\ 80$ . Примеры успешного применения МІМ технологии для изготовления автомобильных деталей показаны на рис. 5.



а) – распылитель системы каталитического восстановления



б) – детали форсунок охлаждения поршня [6]

Рис. 5. Примеры автомобильных МІМ деталей

В итоге, за последнее время, применение МІМ технологии расширилось от области производства сложнопрофильных корпусных деталей до области ответственных деталей исполнительных механизмов. Гибкость технологических возможностей, которую обеспечивает МІМ,



не только повышает экономическую эффективность производства, но и способствует повышению качества конечной продукции, что предопределяет настоящее и будущее распространение и развитие этой технологии.

В целом, развиваются именно технологии, обеспечивающие повышение качества материалов, что достигается лишь за счет возможности многомасштабного управления их структурой; технологии, реализующие восходящий процесс создания материала и детали, когда деталь и материал формируются одновременно. Примером такой технологии, объединяющей известные традиционные подходы литейного производства и обработки давлением, является технология тиксоформинга.

Тиксоформинг – это группы процессов, в которых формообразование осуществляется в твердожидком состоянии сплавов с помощью давящего на металл инструмента. Как и в случае с РИМ технологией, формирование структуры продукта осуществляется в несколько стадий [8]:

- синтез жидкого сплава требуемого состава;
- управляемая кристаллизация с частичным отверждением металла и с обеспечением требуемых размеров, задаваемой недендритной морфологией и термодинамическим потенциалом частиц твердой фазы, влияющих на способность первичных кристаллов и окружающей их жидкости к относительным перемещениям и деформированию, пригодностью к формированию новых структур в очаге деформации;
- переработка на прессах, экструдерах, машинах ЛПД для формирования фасонных изделий или профильных полуфабрикатов с ранее недоступной структурой и свойствами.

Процессы тиксоформинга (Рис. 6), уже коммерциализованные в зарубежном машиностроении, – это основанные на управлении фазовым превращением и текучестью новые технологии переработки металлов и металломатричных композитов, в которых внутренние структурные

изменения также осуществляются на различных пространственно-временных шкалах внутри интервала температур фазового превращения.



Рис. 6. Две схемы тиксоформинга при производстве фасонного изделия из твердожидкого металла

Высокая текучесть суспензий позволяет получать детали сложной геометрической формы и снизить или совсем устранить необходимость их дальнейшей механической обработки, а также дает возможность управления структурообразованием материала детали на микронном масштабном уровне, что соответствует масштабам дисперсной фазы. В совокупности, два эти фактора позволяют изготавливать высококачественные детали сложной геометрической формы. Примером успешного применения технологии тиксоформинга в двигателестроении может служить одновременное повышение пластичности и твердости поршневых сплавов, при сохранении прочностных характеристик, что ведет к повышению качества поршней и повышению надежности двигателей внутреннего сгорания. Сравнительная таблица характеристик

сплава АЛ25 в фасонных заготовках, изготовленных различными литейными методами приведена далее (Таблица 2).

Таблица 2

Механические свойства сплава АЛ25 в фасонных заготовках, изготовленных различными литейными методами и тиксопрессованием [9]

№ п/п	Технология получения фасонной заготовки	Свойства			
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
1	Литье в кокиль (ГОСТ 1583-93)	186	-	-	90
2	Литье в кокиль	220	220	0,5	107
3	Жидкая штамповка ( $P = 150$ МПа)	250	240	0,85	120
4	Жидкая штамповка, ГИП, Т6	310	290	1,2	121
5	Тиксопрессование, Т6	$298 \pm 9$	$277 \pm 7$	$6,5 \pm 0,4$	$150 \pm 13$

### Заключение и выводы

Обеспечение высоких технико-экономических показателей перспективных двигателей внутреннего сгорания основано на оптимизации их конструкции и режимов работы, использовании передовых методов проектирования, применении новых материалов и технологий переработки в изделия. Так, активно развиваются технологии, обеспечивающие повышение качества материалов, что достигается за счет возможности многомасштабного управления их структурой; технологии, реализующие восходящий процесс создания материала и детали, когда деталь и материал формируются одновременно. Примером такой технологии, объединяющей известные традиционные подходы литейного производства и обработки давлением, является технология тиксоформинга, данная технология активно применяется в зарубежной автомобильной промышленности и позволяет получать фасонные металлические детали с высокими физико-механическими характеристиками. Области производства металлических изделий максимальной сложности занимают технология аддитивного производства (АМ) и технология инжекционного литья порошковых композиций (РІМ).

Гибкость технологических возможностей, которую обеспечивает МІМ технология, не только повышает экономическую эффективность производства, но и способствует повышению качества конечной продукции. МІМ технология широко применяется для изготовления сложнопрофильных деталей, накоплен богатый зарубежный опыт МІМ производства ответственных деталей. Создаются стандарты качества автомобильных МІМ деталей, например, стандарт ISO/TS 16949, что позволяет снизить расходы производителей и еще больше расширить область применения МІМ технологии. Все это позволяет ожидать дальнейшего роста применения МІМ технологии для изготовления деталей автомобильного и иных секторов.

В России промышленное производство изделий тиксо- и МІМ-методами практически отсутствует, а сами методы не известны большинству специалистов и серьезно отстают в развитии от зарубежного уровня, а аддитивное производство изделий из конструкционных металлических материалов находится на уровне поисковых исследований. Всё это предопределяет не только высокий потенциал внедрения, но и риски освоения указанных технологий в отечественной промышленности без соответствующей подготовки специалистов.

## Литература

- [1] Особенности системного подхода к оценке точности изготовления деталей двигателей внутреннего сгорания / Г. С. Гамидов, З. И. Адеев, К. А. Кучув // Обработка металлов резание. – 2008. – Т. 2, № 44. – С. 16-18.
- [2] Н. Д. Чайнов, Л.Л. Мягков,  
Ю. П. Москвичев [и др.]. Новые конструкционные материалы – гранульные композиты и эффективность их применения в двигателестроении // Сборник научных трудов международной конференции Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н. Э. Баумана / Под редакцией Н. А. Иващенко, В. А. Вагнера, Л. В. Грехова. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2010. – С. 67-70.
- [3] Б. И. Семенов, А. Б. Семенов, А. Н. Муранов. Переработка и свойства суперсплавов, пригодных для MIM // Современные жаропрочные деформируемые никелевые и интерметаллидные сплавы, методы их обработки: сборник материалов конференции. – Москва, 13 ноября 2015 г. – М.: ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, 2015. С. 10.
- [4] Hausnerova V. Powder Injection Moulding – An Alternative Processing Method for Automotive Items // PIM International. – 2011. – No 3. –P. 129-146.
- [5] Ramakrishnan P. Automotive applications of powder metallurgy // Advances in powder metallurgy. – 2013.– No 7. P. 493-519.
- [6] Williams N. Metal Injection Moulding: Past successes and future opportunities in the automotive industry // PIM International. – 2015. – Vol. 9, No. 4. – P. 33-47.
- [7] Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» в технологиях селективного лазерного

сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками / Е. Н. Каблов [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – Т. 9, № 678. – С. 62-80.

- [8] Тиксоштамповка и тиксолитье – современные технологии формообразования алюминиевых и других сплавов в твердожидком состоянии / Б. И. Семенов, Ю. А. Бочаров [и др.]. // Технология легких сплавов. – 2010. – Т. 1. – С. 129-150.
- [9] Тиксоформуемость и свойства литейного поршневого сплава АЛ25 / Т. Б. Нго, А. Б. Семенов, Б. И. Семенов// Технология легких сплавов. 2014.– Т. 2. – С. 78-87.