

УДК 621.7.016.2:669.13

А. П. Ласковнѐв, А. И. Покровский

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск

ФОРМИРОВАНИЕ РЕГЛАМЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ В ИЗДЕЛИЯХ ТИПА ВТУЛОК: МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Предложен технологический подход, позволяющий получать оптимальную микроструктуру (форма, размер и пространственное распределение включений второй фазы) в различных гетерогенных материалах. Разработаны основы технологии, которые включают выбор оптимального состава исходного материала, температурно-силовых параметров горячей пластической деформации и последующей термообработки. Рассматриваемый метод даёт возможность эффективно управлять формой, распределением и ориентацией включений, например графитовых. Исследованы характеристики деталей типа втулок, изготовленных из двух основных групп гетерогенных материалов: чугуна с веретёнообразными включениями графита, алюминиевые сплавы с добавлением порошка графита.

Введение. Получение градиентных структур, регламентированных по объёму изделия, очень востребовано в машиностроении. В качестве типового примера можно привести такую деталь, как толкатель клапана двигателя внутреннего сгорания (рисунок 1), структура которого на рабочей (торцевой) поверхности должна обладать повышенной износостойкостью и твёрдостью (до 550 НВ). В то же время хвостовая (нерабочая) поверхность этих деталей должна легко обрабатываться и, соответственно, иметь пониженную твёрдость. При получении стальных деталей обработкой давлением градиент деформации в большинстве случаев является следствием конструкции деформирующего инструмента, а его величина целенаправленно не задаётся.

Авторами в работах [1], [2], [3], [4] предложена концепция формирования регламентированной структуры для различных классов гетерогенных материалов, которая заключается в том, что помимо оптимального соотношения компонентов в композиции используется воздействие пластической деформации, причём с фиксированной по объёму изделия степенью.

Кроме собственно формообразования изделия, главной целью воздействия пластической деформации является возможность эффективно управлять расположением, ориентацией и формой включений в матричной фазе.

Цель работы — выявление влияния специально задаваемого градиента степени деформации по сечению заготовки из алюминиевых сплавов и различных видов

Рисунок 1 — Пример деталей с градиентной структурой (толкатели клапанов из чугуна), при формообразовании которых использован градиент степени деформации, выраженный в процентах

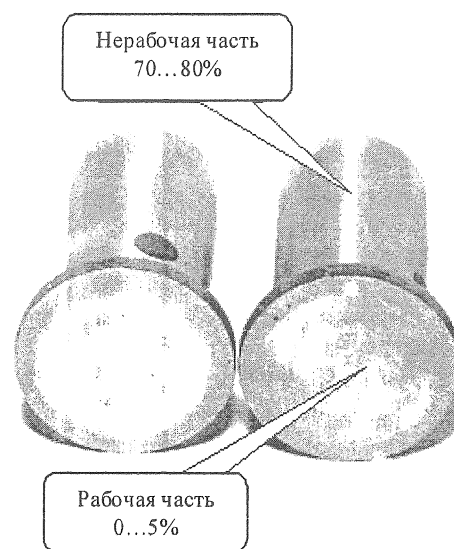


Рисунок 1 — Пример деталей с градиентной структурой (толкатели клапанов из чугуна), при формообразовании которых использован градиент степени деформации, выраженный в процентах

чугунов на износостойкость, механическую обрабатываемость и твердость получаемых деталей, а также разработка технологических приёмов, позволяющих изготавливать из данных материалов изделия типа втулок с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Организация и методы исследования.

Исследовали две группы гетерогенных материалов: 1) на основе алюминиевого сплава, легированного кремнием или медью, с включениями порошкообразного графита; 2) на основе чугуна (таблица 1), с включениями графита регламентированной волокнистой формы.

Легирование (таблица 2) способствовало повышению механических и эксплуатационных свойств.

Заготовки отливали в земляные формы и получали методом намораживания (рисунок 2).

У заготовок, полученных методом намораживания, структуры наружной и внутренней поверхности отливки отличались (рисунок 3). В частности, в литом состоянии микроструктура высокопрочного чугуна представляла перлито-ферритную смесь. Перлит имел мелкодисперсное сорбитоподобное строение с расстоянием между пластинами менее 0,3 мкм. Количество перлита по сечению отливки уменьшалось от 96%

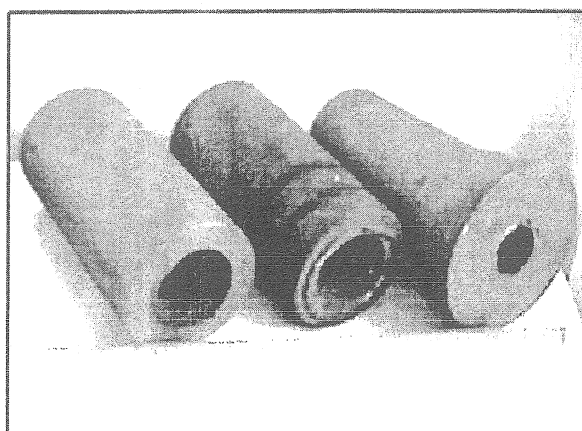


Рисунок 2 — Литые чугунные заготовки для последующего получения втулок с использованием горячего пластического деформирования

снаружи до 70% на внутренней поверхности, где скорость охлаждения была меньше (таблица 3).

В центральной части отливки, занимающей 2/3 всей толщины, структура радиально ориентирована и повторяет ориентацию дендритов аустенита. Шаровидная форма графита ухудшается от наружного к внутреннему диаметру. В этом же направлении, снаружи к центру, возрастает размер графитных включений, а ледебурит приобретает ячеистую структуру (см. рисунок 3, в).

Результаты исследования и их обсуждение. Исследовали технологические параметры обработки алюминиевых сплавов с добавками кремния или меди и определяли

Т а б л и ц а 1 — Химический состав исследуемых чугунов

В массовых процентах

Номер образца	Класс чугуна	Химический состав								
		C	Si	Mn	Mo	Ni	Cu	Cr	S	P
1	Ковкий	2,50	1,14	0,45	0,50	0,10	0,56	0,05	0,07	0,05
2	Высокопрочный	3,80	2,50	0,25	—	0,50	—	0,10	0,04	0,15
3		3,80	2,50	0,25	0,20	0,50	—	0,10	0,04	0,35
4		3,60	2,10	0,25	0,15	0,40	—	0,10	0,04	0,31
5		3,80	2,50	0,25	0,20	0,50	—	0,10	0,04	0,38
6		4,10	2,90	0,50	0,25	0,60	—	0,30	0,05	0,45
7		3,40	2,00	0,20	0,10	0,30	—	0,10	0,04	0,25

Т а б л и ц а 2 — Свойства чугунов после горячей пластической деформации со степенью деформации ϵ , равной 50%

Номер образца	Условный модуль упругости, ГПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Потеря упругости при нагреве до 250°C за 4 ч, %	Коэффициент трения
1	160	1 000	6	0,092
2	170	1 400	6	0,086
3	176	1 300	4	0,068
4	180	1 600	4	0,070
5	185	1 700	3	0,064
6	190	1 800	3	0,060
7	150	1 100	7	0,080
8	155	1 150	7	0,075

Т а б л и ц а 3 — Структура высокопрочного чугуна для последующего изготовления втулок (исходное, литое состояние)

Оцениваемый параметр	Обозначение	Зона отливки		
		наружная	центральная	внутренняя
Форма включений графита	Γ_{ϕ}	13	12...13	12...13
Размер включений графита, мкм	$\Gamma_{\text{раз}}$	15; 25	15; 25; 45	15; 25; 45
Количество включений графита, %	Γ	2...4	6	10
Тип металлической основы	—	Перлит + феррит		
Количество перлита	Π	96	92	70...80
Дисперсность перлита, мкм	$\Pi_{\text{д}}$	< 0,3		
Количество цементита, %	Ц	1	4	4...6
Площадь включений цементита, мкм ²	$\text{Ц}_{\text{п}}$	—	2 000...6 000	6 000...13 000

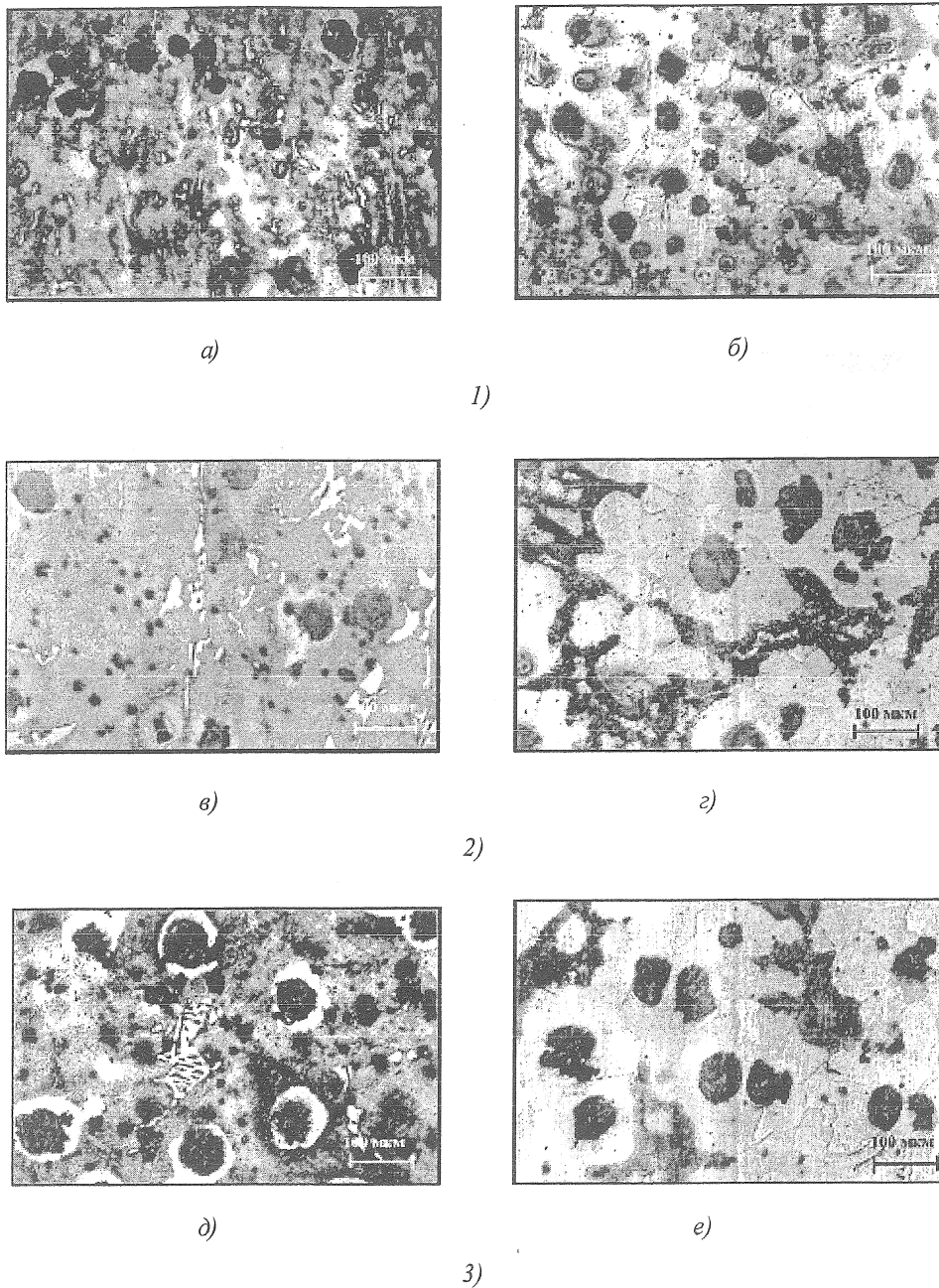
оптимальное количество вводимого графитного порошка. Установлено, что наиболее эффективно содержание графита около 10% с равномерным распределением по сечению.

Изучали два варианта введения графита: 1) при литье графит вводили в расплав в виде специальной графитсодержащей лигатуры для предотвращения его всплывания и выгорания (опробовали литьё под давлением и центробежное литьё); 2) при получении композиции методами порошковой металлургии (использовали установку центробежного распыления, печь, мельницу, смеситель).

Методами пластической деформации из алюмографитового композита изготовлены

втулки различного назначения для автомобильного производства (рисунок 4): подшипники скольжения привода топливного насоса, втулки распределительного вала и шестерёнчатых насосов.

В качестве основного оборудования использовали пресс гидравлический усилием 1 000...3 000 кН, пресс механический кривошипный усилием 1 600...4 000 кН, машину литья под давлением усилием 1 000 кН, нагревательную печь. Для получения алюминиевого порошка использовали установку центробежного распыления, раздаточную печь, мельницу, смеситель. Для обеспечения работы оборудования необходимо до 200 кВт · ч электроэнергии,



1 — наружная поверхность отливки; 2 — центральная часть отливки; 3 — внутренняя часть отливки; а, в, д — в литом состоянии; б, г, е — после отжига

Рисунок 3 — Микроструктура различных зон отливки (маслоты) из высокопрочного чугуна (1, 2, 3) в исходном состоянии. Поперечное сечение отливки (маслоты). Травлено нитралем. $\times 250$

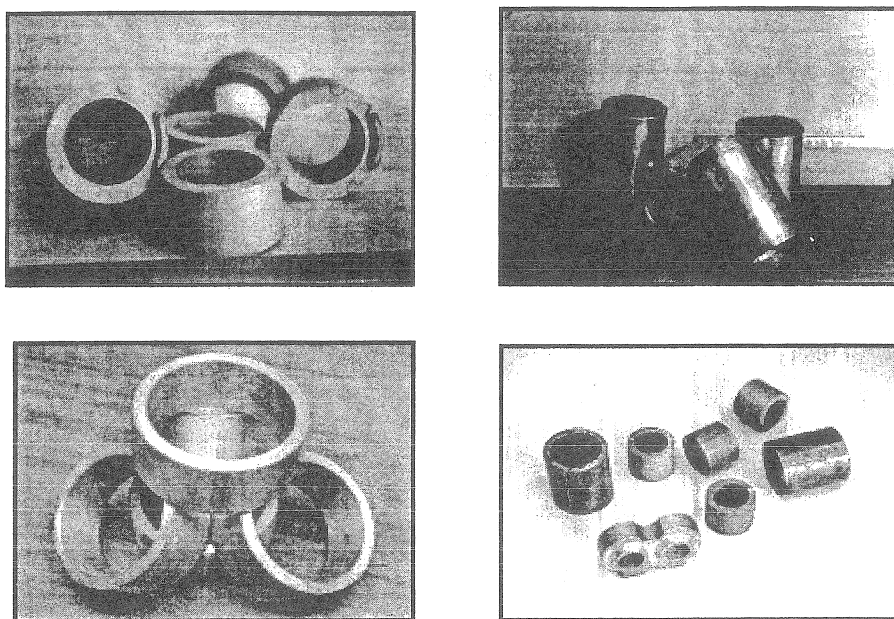


Рисунок 4 — Детали типа втулок различных типоразмеров, полученные с использованием пластической деформации из алюмографитового композита

расход воздуха — $60 \text{ м}^3 / \text{ч}$, техническое давление воздуха в магистрали — 5 атм, подача воды — из расчёта $1,3 \dots 2,0 \text{ м}^3 / \text{ч}$.

Технические характеристики алюмографитового композита следующие: твёрдость — $30 \dots 140 \text{ НВ}$, предел прочности — $150 \dots 400 \text{ МПа}$, относительное удлинение — $0,2 \dots 10\%$, плотность — $2,5 \dots 2,7 \text{ г} / \text{см}^3$, коэффициент трения в паре со сталью при ограниченной подаче смазки — $0,007 \dots 0,020$.

Важной особенностью процесса является возможность использования вторичных отходов алюминия в виде стружки. Получаемые детали дешевле аналогичных, выполненных из бронз, латуней, баббитов.

Изготовленные таким образом детали позволили увеличить ресурс работы объекта техники, повысить эксплуатационные характеристики, снизить массу.

Технология внедрена в Республике Беларусь для серийного производства ряда деталей (втулка распределительного вала дизельных двигателей, подшипник привода топливного насоса, антифрикционные втулки шестерёнчатых насосов). Годовой экономический эффект от

внедрения только на Минском моторном заводе — 100 000 дол. США.

Разрабатывали технологию получения втулок различного назначения с градиентной структурой из чугунов с различной формой графита и металлической матрицей. Исследовали различные режимы отжига отливки для распада эвтектического цементита и улучшения последующей горячей деформируемости чугуна. Установили оптимальный режим отжига отливки, который заключается в нагреве до 920°C , выдержке в течение 1 ч, охлаждении с печью до 200°C , а далее на воздухе. При этом структура металлической матрицы состоит из приблизительно равного соотношения перлита и феррита (таблица 4), а твёрдость составляет 195 НВ, что вполне приемлемо для токарной обработки.

Установлено, что дальнейшее снижение твёрдости до 90 НВ можно обеспечить замедленным охлаждением отливки в интервале температур $900 \dots 600^\circ\text{C}$, а затем вместе с печью. Это происходит за счёт увеличения доли феррита в металлической матрице до $80 \dots 90\%$ (таблица 5).

Исследовали способность чугунов подвергаться горячей пластической деформации.

Т а б л и ц а 4 — Структура высокопрочного чугуна для последующего изготовления втулок (после отжига при 920°C, 1 ч с охлаждением на воздухе)

Оцениваемый параметр	Обозначение	Зона отливки		
		наружная	центральная	внутренняя
Форма включений графита	Г _ф	13	13	12...13
Размер включений графита, мкм	Г _{раз}	25	25...45	25...45
Количество включений графита, %	Г	2...4	6	10
Тип металлической основы	—	Пт1		
Количество перлита	П	100		
Дисперсность перлита, мкм	П _д	< 0,3		
Количество цементита, %	Ц	0		

Т а б л и ц а 5 — Характеристики структуры высокопрочного чугуна в зависимости от скорости охлаждения после отжига

Режим охлаждения	Тип структуры	Твёрдость, НВ
На воздухе	Т + М	540
До 600°C с печью, затем на воздухе	С + П	375
С печью до 100...200°C, далее на воздухе	50% Ф + 50% П	195
Замедленное охлаждение с печью	80% Ф + 20% П	90

Предварительные исследования при выдавливании осесимметричных прутков показали, что наиболее яркая особенность структуры деформированного чугуна — формирование графитных включений необычной ориентированной волокнистой формы, степень вытянутости которых зависит от степени деформации (рисунок 5).

После отжига до твёрдости 195 НВ из чугунных втулок (маслот) вытачивали втулки наружным диаметром 113,5 мм, внутренним — 90 мм и высотой 72 мм. Нагрев заготовок до температуры 980°C осуществляли токами высокой частоты в течение 30...60 с, с тройным подогревом. Для этого по достижении указанной температуры индуктор отключали на 10...15 с, что способствовало выравниванию температуры по сечению, а затем производили подогрев.

Горячую штамповку втулок проводили на кривошипно-шатунном прессе марки К9534А, усилием 250 тс с использованием специально спроектированного и изготовленного

штампа модели ГВ 1339-4013. При деформировании происходило существенное уменьшение толщины стенки втулки со стороны наружного диаметра и в меньшей степени — изнутри. За счёт этого втулка увеличивалась по высоте.

Некоторые технологические операции нагрева и последующего деформирования проиллюстрированы фотографиями (рисунок 6).

Была изготовлена опытная партия штампованных маслот, представляющих собой втулки наружным диаметром 100 мм, внутренним — 89,5 мм, высотой 150 мм (рисунок 7, а).

Средняя степень деформации, определённая как соотношение разницы площадей сечения литой и деформированной заготовок к площади литой заготовки, составила 58%. Однако фактически степень деформации существенно отличалась по толщине стенки втулки и составляла 30...40% во внутренней зоне поковки и 70...90% — в наружной зоне. Схема вырезки шлифов для металлографических исследований показана на рисунке 7, б.

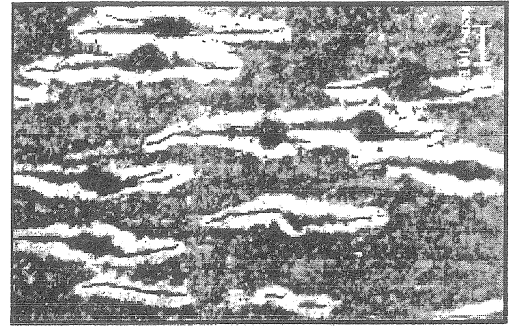
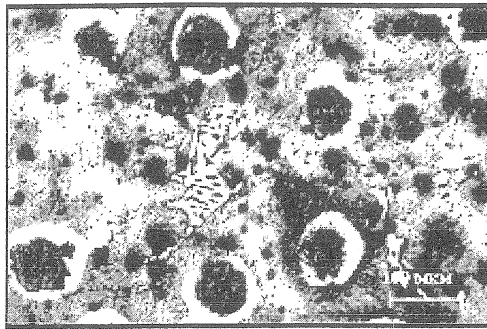
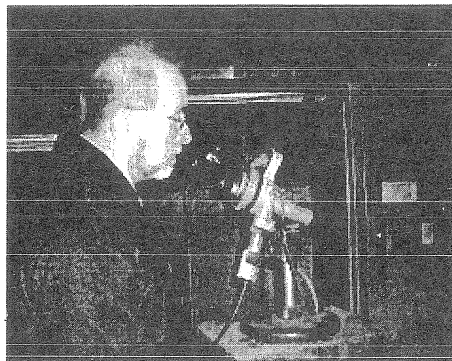
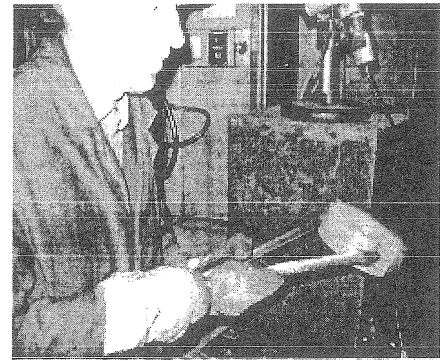


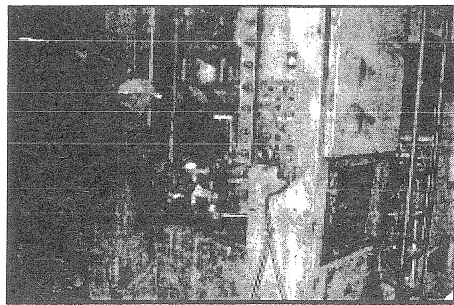
Рисунок 5 — Видоизменение формы графита (от шаровидной к волокнистой) по мере увеличения степени деформации



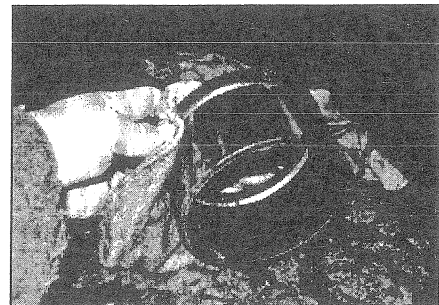
а)



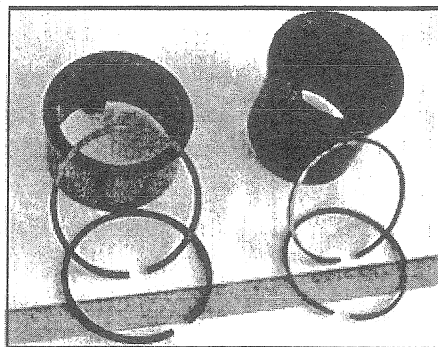
б)



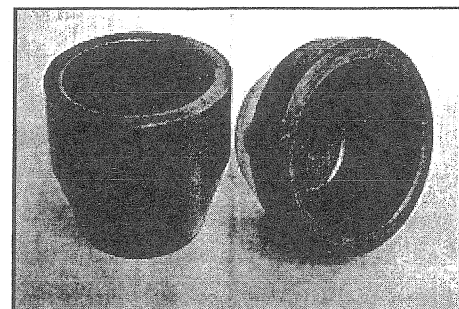
в)



г)

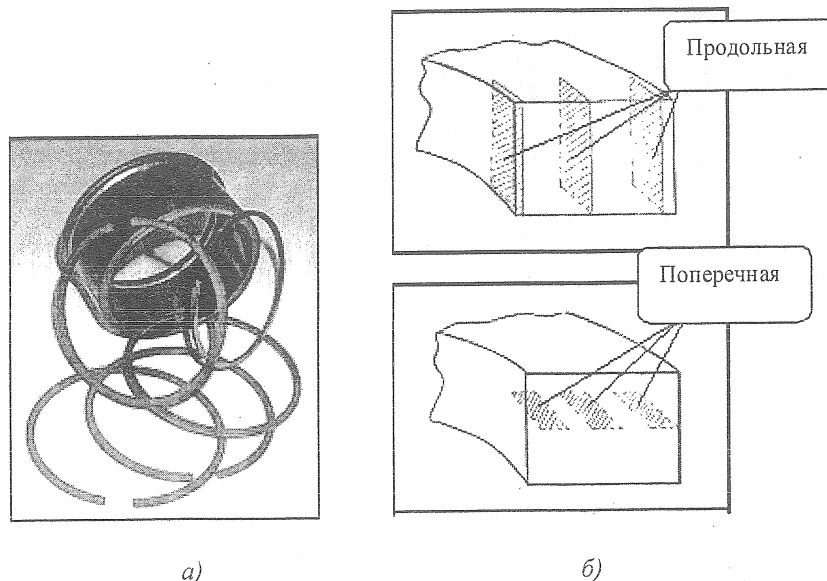


д)



е)

Рисунок 6 — Технологические операции горячей пластической обработки литой чугунной втулки (а—г) и полученные после штамповки готовые поковки (д и е), из которых в дальнейшем изготавливали уплотнительные кольца (е)



a — полученная горячим выдавливанием чугунная заготовка и изготовленные из неё уплотнительные кольца трансмиссии тягача МЗКТ диаметром 98 мм; *б* — схема вырезки шлифов для металлографического анализа из кольца: продольная, поперечная

Рисунок 7 — Штамповальная втулка (маслота)

В структуре поковки количество перлита возросло до 80...90% за счёт охлаждения на воздухе. Как в продольном сечении маслота, так и в поперечном формировалась текстура деформации (рисунок 8).

В отличие от выдавливания прутков, где включения приобретали вид осесимметричных веретён, графит не только вытягивался в продольном направлении (см. рисунок 8, *a, в, д*), но и сдавливался в поперечном, параллельно стенкам матрицы (см. рисунок 8, *б, г, е*). Таким образом, форма графита походила на вытянутый эллипсоид, сплюснутый по бокам.

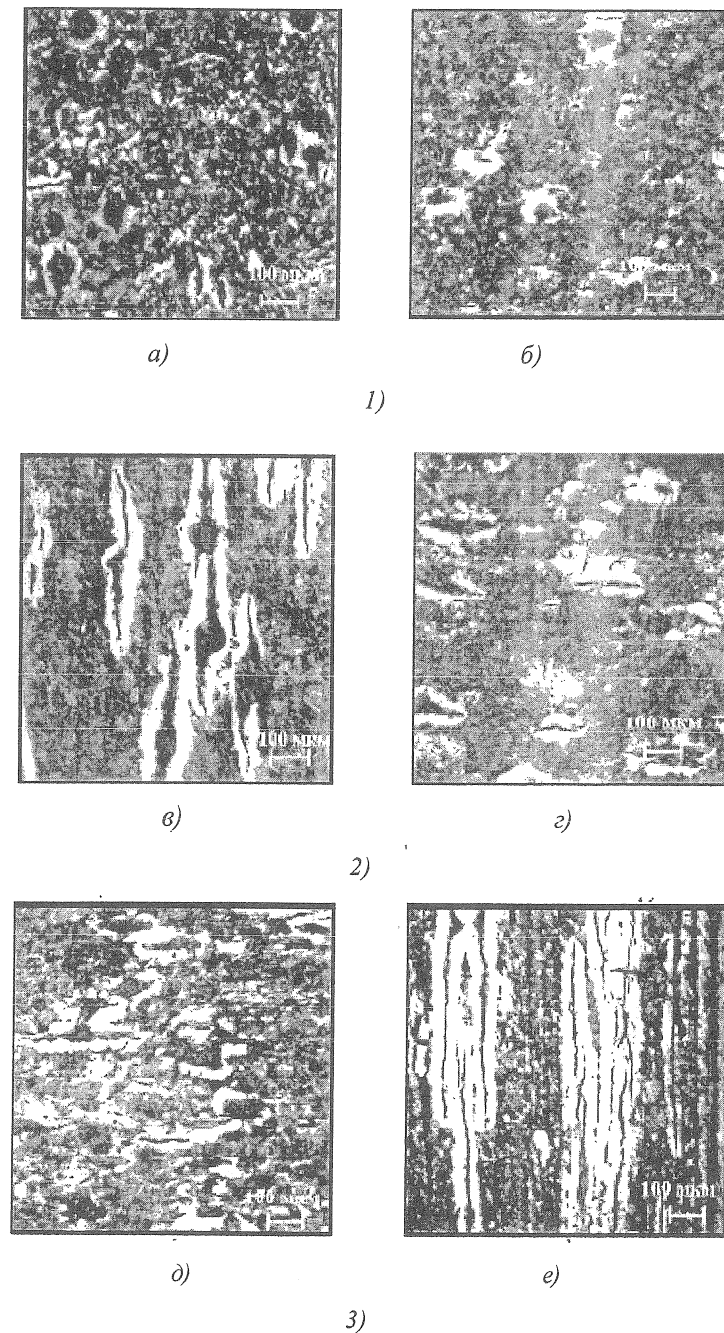
Полученные деформацией маслота подвергали закалке в масло с 950°C и отпуску при температуре 630°C в течение 1 ч для снижения твёрдости до 98...112 HRB и улучшения обрабатываемости. Затем производили торцовку маслота, а последующую механическую обработку вели в соответствии с серийным технологическим процессом.

Установлено повышение комплекса характеристик чугуна после деформации в 1,5...2 раза.

Наработки по деформированию чугуна включают конкретные схемы легирования, режимы предварительной термообработки для улучшения деформируемости, конструкции штамповой оснастки, температурно-силовые параметры деформирования, режимы окончательной термообработки.

Проведённые исследования микроструктуры чугуна на разных стадиях его обработки позволили предложить технологию изготовления деталей типа втулок, например, для уплотнительных или поршневых колец (рисунок 9), которая включает получение литой заготовки, предварительную термическую обработку для снижения твёрдости и повышения пластичности, механическую обработку, нагрев заготовки, горячую пластическую деформацию в специальной оснастке на серийном кузнечно-штамповочном оборудовании, окончательную термическую обработку и окончательную механическую обработку (шлифовку).

Установлено, что для различных деталей целесообразно иметь особое расположение вытянутых графитных включений относительно сопрягаемой детали, например: на поверхности



1 — внутренняя поверхность кольца; 2 — центральная часть кольца; 3 — наружная поверхность кольца; а, в, д — продольные шлифы; б, г, е — поперечные шлифы

Рисунок 8 — Микроструктура чугуна в различных зонах (1, 2, 3) уплотнительного кольца трансмиссии. Высокопрочный чугун после деформации. Охлаждение на воздухе. Травлено нитралем. $\times 100$

трения уплотнительных колец — поперечное расположение графитных включений округлой формы, а на поверхности трения поршневых колец — продольное, вытянутой формы.

Доказан факт ускорения протекания ряда фазовых превращений после деформирования чугуна. На основе этого предложена идея специально создаваемого градиента степени

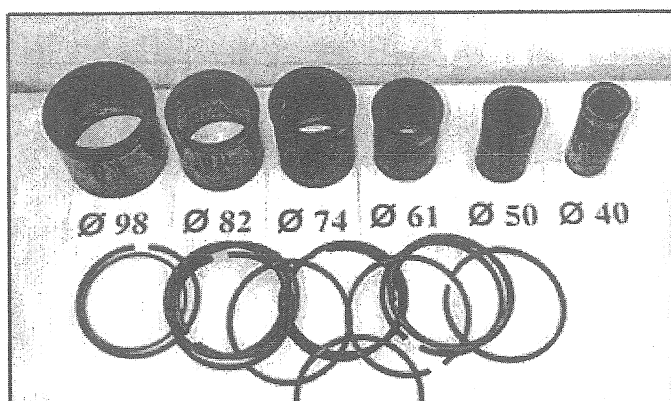


Рисунок 9 — Заготовки в виде втулок из деформированного чугуна для уплотнительных и поршневых колец

деформации по сечению заготовки при выдавливании, т. е. формирования в различных зонах изделия структур с разной формой и ориентацией графитных включений и различной металлической матрицей.

Заключение. На основании полученных результатов исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Использование пластической деформации при обработке гетерогенных материалов помимо собственно формообразования изделия позволяет эффективно управлять формой, расположением, ориентацией включений в матричной фазе.

2. Для ряда изделий пластическая деформация служит эффективным инструментом получения слоистой анизотропной структуры. Продольное или поперечное расположение волокон оказывает эффективное влияние на свойства изделий.

3. Помимо получения ориентированной структуры во всем объеме изделия для ряда деталей целесообразно, основываясь на разной скорости фазовых превращений после пла-

стической деформации, создавать градиентные (различные в объеме детали) структуры, соответствующие прилагаемым к ним нагрузкам.

Список цитируемых источников

1. Ласковнѐв, А. П. Композиционные материалы на основе порошковых сплавов алюминия / А. П. Ласковнѐв. — Гомель : ИММС НАНБ, 2002. — 144 с. : ил.
2. Ласковнѐв, А. П. Производство алюминиевых поршней для высокофорсированных двигателей внутреннего сгорания / А. П. Ласковнѐв, В. В. Овчинников, О. Е. Жданович. — Минск : Экоперспектива, 2004. — 190 с. : ил.
3. Покровский, А. И. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы / А. И. Покровский. — Минск : Беларус. навука. — 2010. — 256 с.
4. Покровский, А. И. Структурообразование чугуна при горячей пластической деформации (научные и технологические основы получения изделий из чугуна с использованием горячего выдавливания и штамповки) / А. И. Покровский. — Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2012. — 344 с.

Материал поступил в редакцию 22.10.2012 г.

A technological approach is put forward which allows to obtain an optimal microstructure (shape, size and spatial distribution of inclusions of a second phase) in different heterogeneous materials. The developed technological concept involves selecting an optimum composition and shape of a billet, plastic deformation with a preset strain and strain rate, and subsequent heat treatment. This method allows to control the shape effectively, distribution and orientation of second-phase (graphite) inclusions. Two basic groups of heterogeneous materials produced by this method are studied: (1) cast iron with spindle-shaped graphite inclusions, (2) aluminum alloys with the addition of graphite powder. Several technologies are developed for the fabrication of bush-shaped machine parts with an improved performance of the materials.