

**Якимов В. И.,** Паниван Г. Е., Муравьев В. И., Захарова Е. В., Куриный В. В.  
**V. I. Yakimov, G. E. Panivan, V. I. Muravyev, E. V. Zakharova, V. V. Kuriny**

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОСТАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
НА СТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И НАДЕЖНОСТЬ ОТЛИВОК  
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**THE EFFECTS OF HIGH-TEMPERATURE GAS STATIC PROCESSING ON THE  
STRUCTURE, MECHANIC PROPERTIES AND RELIABILITY OF ALUMINIUM ALLOY  
CASTS**

**Якимов Виктор Иванович** – доктор технических наук, ведущий инженер-технолог научно-производственного отдела филиала ОАО Авиацонная холдинговая компания «Сухой» Комсомольский-на-Амуре авиационный завод» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(4217)52-63-17.

**Mr. Viktor I. Yakimov** – Doctor of Engineering, JSC Yuri Gagarin Aviation Plant; Komsomolsk-on-Amur, Russia; phone: 52-63-17.

**Паниван Галина Евгеньевна** – инженер-технолог филиала ОАО Авиацонная холдинговая компания «Сухой» Комсомольский-на-Амуре авиационный завод» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(4217)52-63-17.

**Ms. Galina Y. Panivan** – process engineer, JSC Yuri Gagarin Aviation Plant; Komsomolsk-on-Amur, Russia; phone: 52-63-17.

**Муравьев Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: VMuravyev@mail.ru.

**Mr. Vassily I. Muravyev** – Doctor of Engineering, Professor, Chief Scientific Officer, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: VMuravyev@mail.ru.

**Захарова Елена Викторовна** – инженер-технолог филиала ОАО Авиацонная холдинговая компания «Сухой» Комсомольский-на-Амуре авиационный завод» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(4217)52-63-17.

**Ms. Yelena V. Zakharova** - process engineer, JSC Yuri Gagarin Aviation Plant; Komsomolsk-on-Amur, Russia; phone: 52-63-17.

**Куриный Владислав Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-Mail: kmtlp@knastu.ru.

**Mr. Vladislav V. Kuriny** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: kmtlp@knastu.ru

**Аннотация.** В статье описываются результаты исследований особенностей изготовления литьём в кокиль отливок «ребешковой» и «рожковой» формы из сплава АМ4,5Кд.

**Summary.** The paper presents the results of a study of the process of chill casting of the “horn” and “scal-  
loped” forms of the AM4,5Kd alloy.

**Ключевые слова:** кокиль, форма, химический состав, Al-Si сплавы.

**Keywords:** chill cast, mould, chemical composition, Al-Si alloys.

УДК 669.714.7



Научно-технический прогресс в машиностроении требует от металлургов решения задач снижения металлоемкости конструкций, повышения срока службы отдельных деталей и изделий за счет улучшения качества металла, изготовления металлических заготовок в форме, максимально приближенной к форме конечной детали, что позволяет достичь наивысших экономических показателей и способствует интенсивному развитию производства [1].

Одним из путей решения последней задачи является использование в конструкциях высокоточных отливок, требующих минимальной механической обработки. Совершенствование прогрессивных методов литья (по выплавляемым моделям, под давлением, штамповкой из жидкого металла и др.) позволило значительно расширить номенклатуру фасонных отливок. Однако решение первых двух из перечисленных выше задач в литейном производстве наталкивается на следующую принципиальную трудность. В отливках, независимо от способа их получения, имеются внутренние поры, усадочные трещины, что приводит к снижению и нестабильности механических свойств. С увеличением массы отливки или толщины ее стенки механические свойства ухудшаются из-за развития усадочной пористости.

Эффективным способом устранения внутренних усадочных пор в отливках является высокотемпературная газостатическая обработка (ВГО), получившая широкое распространение за рубежом и интенсивно развиваемая у нас. Сущность ее состоит в одновременном воздействии на металлическую отливку, помещаемую в газостат, высоких температур и изостатического давления аргоном (до 200 МПа).

Анализ проведенной работы позволяет сделать следующие выводы. В результате ВГО характеристики кратковременной прочности (пределы прочности и текучести) повышаются незначительно (для титановых сплавов практически не меняются), пластичность (относительное удлинение и сужение) увеличивается значительно (на 30...100 %), независимо от сплава и способа его литья повышается мало- и многоцикловая усталостная прочность (прирост напряжения составляет 20...50 %, а число циклов до разрушения при неизменном напряжении возрастает примерно в 10 раз), длительная прочность (на примере титановых и жаропрочных никелевых сплавов) увеличивается на 20...30 %, что соответствует двукратному и более росту среднего времени до разрушения. Кроме того, проведенная работа [1] показывает, что ВГО приводит не только к росту средних значений механических свойств, но и к увеличению их стабильности, оцениваемой разбросом соответствующей характеристики от образца к образцу или от изделия к изделию. Эксперименты показали, что независимо от степени изменения среднего значения любой механической характеристики разброс всех ее значений, оцениваемый по размаху или среднему квадратичному отклонению, после ВГО уменьшается в 3...8 раз. Обычный высокотемпературный гомогенизирующий отжиг не приводит к такой стабилизации уровня свойств. При этом рост абсолютных значений и повышение стабильности усталостной и длительной прочности скажутся на увеличении срока службы фасонных отливок, подвергнутых ВГО, по сравнению с отливками, полученными традиционными способами.

Повышение плотности литого материала в результате ВГО способствует улучшению не только механических, но и целого ряда специальных свойств: свариваемости (особенно для жаропрочных никелевых сплавов), термоусталости, обрабатываемости резанием, вакуумной плотности, равномерности химической обработки. Открывается реальный путь замены ряда неэкономичных штамповок, характеризующихся низким коэффициентом использования металла и высокой трудоемкостью последующей механической обработки, высокоточными фасонными отливками, подвергнутыми ВГО.

В конце 80-х гг. впервые в нашей стране была проведена на предприятии работа по исследованию возможности повышения качества литого материала с помощью ВГО [2]. Параметры ВГО определяли в зависимости от типа сплава, способа литья, толщин стенки отливки. Давление поддерживалось не менее 130 МПа, температура 495...550 °С, изотермическая выдержка 0,25...24 ч. В зависимости от химического состава сплава были использо-

ваны сплавы типа силуминов, медистых силуминов и твердого раствора. Отливки изготавливали фасонным литьем в землю, в кокиль и под давлением.

В результате ВГО повышаются механические свойства материала отливок. В то время как прочность увеличивается незначительно, относительное удлинение возрастает в 2...3 раза. При этом эффект уплотнения более заметен в отливках, полученных литьем в землю. Существенно повышаются ресурсные характеристики материала: долговечность при многоцикло-вой усталости и вязкость разрушения  $K_{1c}$  [2].

На основании проведенных исследований был разработан промышленный технологический процесс, который гарантировал получение отливок со 100%-й технической плотностью. Однако ряд дефектов полностью или частично не устраняется при ВГО: открытая пористость, воздушные пузырьки, окисные пленки, неметаллические включения. Необходимо также предъявлять повышенные требования к чистоте аргона по водородсодержащим примесям.

В работах [3; 4; 6] также говорится, что ВГО широко используется для устранения пористости фасонных отливок из алюминиевых сплавов. Наряду с устранением несплошностей в условиях высоких температур и давлений могут происходить структурные изменения. Кроме того, в работе [4] рассмотрен механизм и кинетика устранения пор в отливках из алюминиевых сплавов при ВГО.

В работе [5] показана схема механизма устранения пористости в отливках из алюминиевых сплавов при ВГО и указывается, что залечивание несплошностей ВГО отливок из алюминиевых сплавов происходит путем пластического сжатия пор, растворения содержащегося в них водорода в матричной фазе и экстракции его в атмосферу газостата. Отмечается, что рабочие режимы ВГО зависят от сплава и габаритов отливок: температура находится в интервале 450...530 °С, давление – 60...130 МПа. Выдержка определяется с учетом содержания водорода, формы и толщины стенки отливки и составляет 0,25...10 ч. Оптимальный режим ВГО должен обеспечивать полное устранение усадочной пористости, прохождение процесса дегазации, отсутствие огрубления структуры.

Результаты испытаний отливок из алюминиевых сплавов, подвергшихся ВГО, показали, что механические свойства образцов, вырезанных из газостатированных отливок, при испытании на разрыв выше, чем литых. Заметно увеличивается ресурс материала. ВГО обеспечивает полную герметичность детали. Надежность, оцениваемая по числу циклов до разрушения, при стендовых испытаниях повышается в среднем в 1,8 раза.

Положительное влияние ВГО на свойства кокильного литья имеет общий характер для различных сплавов. В частности, для деталей гидроагрегатов из сплава АЛ9М предел прочности повышается с 255 до 280...300 МПа, относительное удлинение с 1,5 до 2,0...2,5 %. Во всех случаях ВГО обеспечивает практически полное устранение пористости, уровень которой при оценке по макроструктуре и рентгенодефектоскопии лучше первого балла.

В результате ВГО крупногабаритных (максимальный размер до 700 мм) корпусных отливок гидроагрегатов из сплава АК7ч, полученных литьем в землю, характеризующихся повышенными требованиями по герметичности, пористость на контролируемых поверхностях практически отсутствует. Одновременно возрастают механическая прочность на разрыв и ресурсные характеристики. Можно отметить повышение после ВГО качества и надежности крупногабаритных массивных отливок из сплава АЛ4, полученных литьем в землю, и отливок гидроагрегатов автоматики, полученных литьем в кокиль. Материал отливок после ВГО имеет 100%-ю техническую плотность.

Положительное влияние ВГО на свойства отливок снижается при наличии в структуре интерметаллидов скелетообразной морфологии, содержащих железо, кремний, марганец. Если объемная доля интерметаллидов (независимо от состава и морфологии) существенно превышает объемную долю пор, то первые оказывают превалирующее влияние на механические свойства. В этом случае несмотря на уплотнение металла механические свойства после ВГО могут остаться без изменения.



Из вышесказанного можно сделать вывод, что наряду с улучшением комплекса механических свойств сплавов повышаются характеристики эксплуатационной надежности: вязкость разрушения  $K_{Ic}$ , сопротивление МНЦУ, герметичность при пневмо- и гидроиспытаниях. Закономерности влияния ВГО на качество и свойства отливок соблюдаются независимо от вида литья (в землю, кокиль, по выплавляемым моделям).

На «КнААЗ им. Ю. А. Гагарина» совместно с ОАО «УМПО» (г. Уфа) проведена работа по выявлению влияния газостатирования на механические свойства отливок из алюминиевых сплавов и с ОАО «Композит» (г. Королев) – по выявлению влияния газостатирования на механические свойства отливок из стали ВНЛ-3.

Для изучения влияния газостатического прессования на механические свойства, структуру алюминиевых сплавов и исправление внутренних дефектов в отливках были подобраны наиболее дефектные отливки из алюминиевых сплавов АМ4,5Кд (2 наименования по 1 шт.), АК8л (3 наименования по 1 шт.), 18 стандартных образцов из сплавов АК7ч, АК8л и АМ4,5Кд и 3 отливки из стали ВНЛ-3.

Газостатическую обработку алюминиевых отливок на «КнААЗ» проводили по технологическому процессу, разработанному «ВИЛС» (г. Москва) и «УМПО», для собственных отливок из алюминиевых сплавов АЛ-4, АЛ-5, АЛ-9 по следующим режимам:

- температура газостатирования 525...520 °С;
- начальное давление 66,87 МПа;
- окончательное давление 44,58 МПа;
- время выдержки 2 ч.

После проведения газостатирования (горячее газостатическое прессование – ГИП) отливки подвергались визуальному осмотру с составлением акта и возвращались на «КнААЗ» для проведения дальнейших исследований.

На «КнААЗ» проводили рентген-контроль отливок, разметку тонкостенных отливок на соответствие геометрических размеров чертежам после ГИП.

Согласно проведенным исследованиям, геометрические размеры отливок соответствовали литейным и серийным чертежам.

Проводились также механические испытания образцов до и после газостатирования. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Как видно из таблицы, механические свойства алюминиевых сплавов после ГИП изменились:

- у сплава АК8л временное сопротивление разрыву не изменилось, а относительное удлинение увеличилось в 3 раза;
- у сплава АК7ч временное сопротивление разрыву увеличилось на единицы, а относительное удлинение увеличилось на 30 %;
- у сплава АМ4,5Кд временное сопротивление разрыву не изменилось, а относительное удлинение увеличилось на 25 %.

В результате исследований выявлено: при ГИП геометрия отливок не изменяется; временное сопротивление изменяется незначительно, а относительное удлинение увеличивалось в 2...3 раза; на двух отливках внутренние дефекты вышли на поверхность, на остальных отливках на поверхность вышла только часть дефектов, а оставшаяся часть (газовая пористость) сгруппировалась в крупные раковины.

Газостатическую обработку отливок из стали ВНЛ-3 проводили на заводе ОАО «Композит» (г. Королев) по технологическому процессу со следующими режимами:

- температура газостатирования  $1050 \pm 10$  °С;
- начальное давление 159 МПа;
- окончательное давление 161,4 МПа;
- время выдержки 2,5 ч.

После проведения газостатирования отливки (см. рис. 1) подвергались визуальному осмотру с составлением акта и возвращались на «КнААЗ» для проведения дальнейших исследований.

Таблица 1

Механические свойства алюминиевых сплавов

Марка материала	Номер протокола	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , Мпа, (кг/мм <sup>2</sup> )	Относительное удлинение $\delta$ , %	Примечание
АК8л до ГИП	2136	330, (33,0) 315, (31,5) 330, (33,0)	3,3 2,0 4,3	Соответствует ГОСТ 1583-93
АК8л после ГИП без термообработки (т/о)	2217	140, (14,0) 145, (14,5) 135, (13,5)	3,0 2,8 2,9	Не соответствует ГОСТ 1583-93
АК8л после ГИП с т/о	2221	320, (32,0) 320, (32,0) 315, (31,5)	9,5 10,0 9,5	Соответствует ГОСТ 1583-93
АК8л	ГОСТ 1 583-93 Т5	300, (30,0)	2,0	
АК7ч до ГИП	2142	205, (20,5) 210, (21,0) 205, (20,5)	6,2 7,9 7,9	Соответствует ГОСТ 1583-93
АК7ч после ГИП без т/о	2217	150, (15,0) 150, (15,0) 150, (15,0)	13,0 15,0 16,0	Не соответствует ГОСТ 1583-93
АК7ч после ГИП с т/о	2221	220, (22,0) 225, (22,5) 225, (22,5)	8,5 9,0 8,5	Соответствует ГОСТ 1583-93
АК7ч	ГОСТ 1 583-93 Т4	18	4	
АМ4,5Кд до ГИП	М6877	460, (46,0) 470, (47,0) 460, (46,0)	8,0 8,0 7,0	Соответствует ГОСТ 1583-93
АМ4,5Кд после ГИП без т/о	2218	200, (20,) 210, (21,0) 205, (20,5)	16,0 16,5 16,5	Не соответствует ГОСТ 1583-93
АМ4,5Кд после ГИП с т/о	М1 0032	440, (44,0) 440, (44,0) 430, (43,0)	10,0 7,0 10,0	Соответствует ГОСТ1583-93
АМ4,5Кд	ГОСТ 1583-93	40	7	

На «КнААЗ» проводили рентген-контроль, разметку тонкостенных отливок на соответствие геометрических размеров отливок после ГИП чертежам, химический анализ, микроструктурный анализ до и после газостатирования и механические испытания образцов до и после газостатирования.

Как видно из рис. 2, на отливках все внутренние дефекты вышли на поверхность и могут быть легко исправлены подваркой, а если есть припуск – то дефекты удаляются при механической обработке отливок.

Согласно проведенным исследованиям после разметки отливки соответствуют литейным и серийным чертежам.

Проводились также механические испытания образцов до и после газостатирования. Результаты испытаний механических свойств приведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что механические свойства стали ВНЛ-3 после ГИП изменились:

- временное сопротивление разрыву увеличилось на 5 %;
- относительное удлинение увеличилось на 25 %;
- относительное сужение практически не изменилось;
- ударная вязкость увеличилась на 25...30 %.

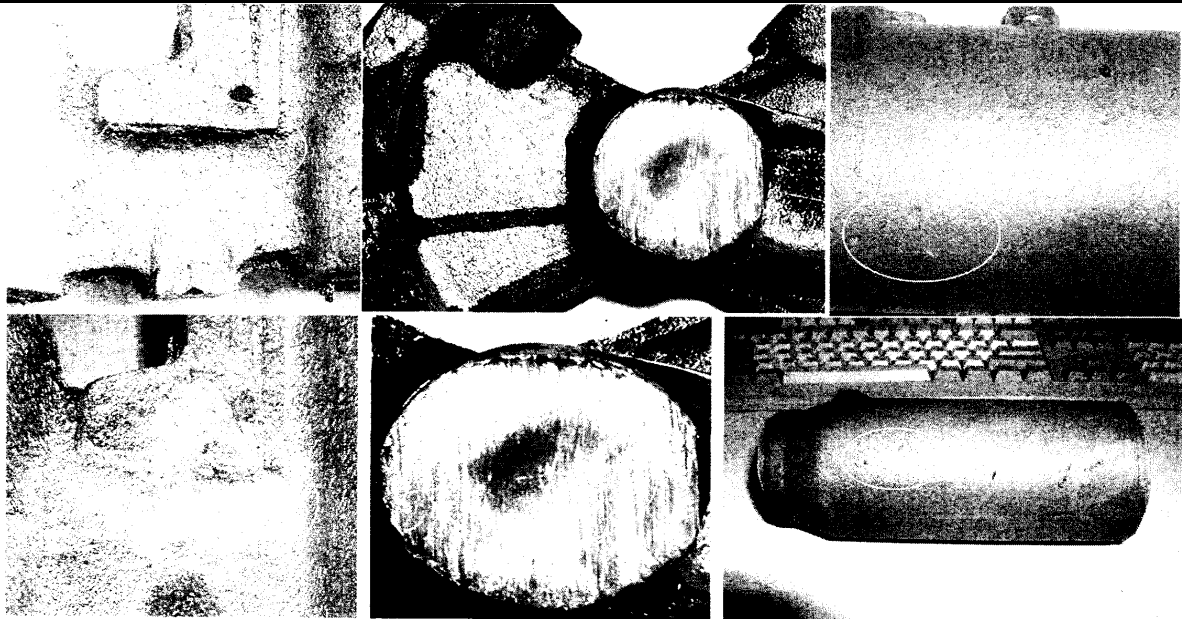


Рис. 1. Отливки и образцы после проведения газостатирования

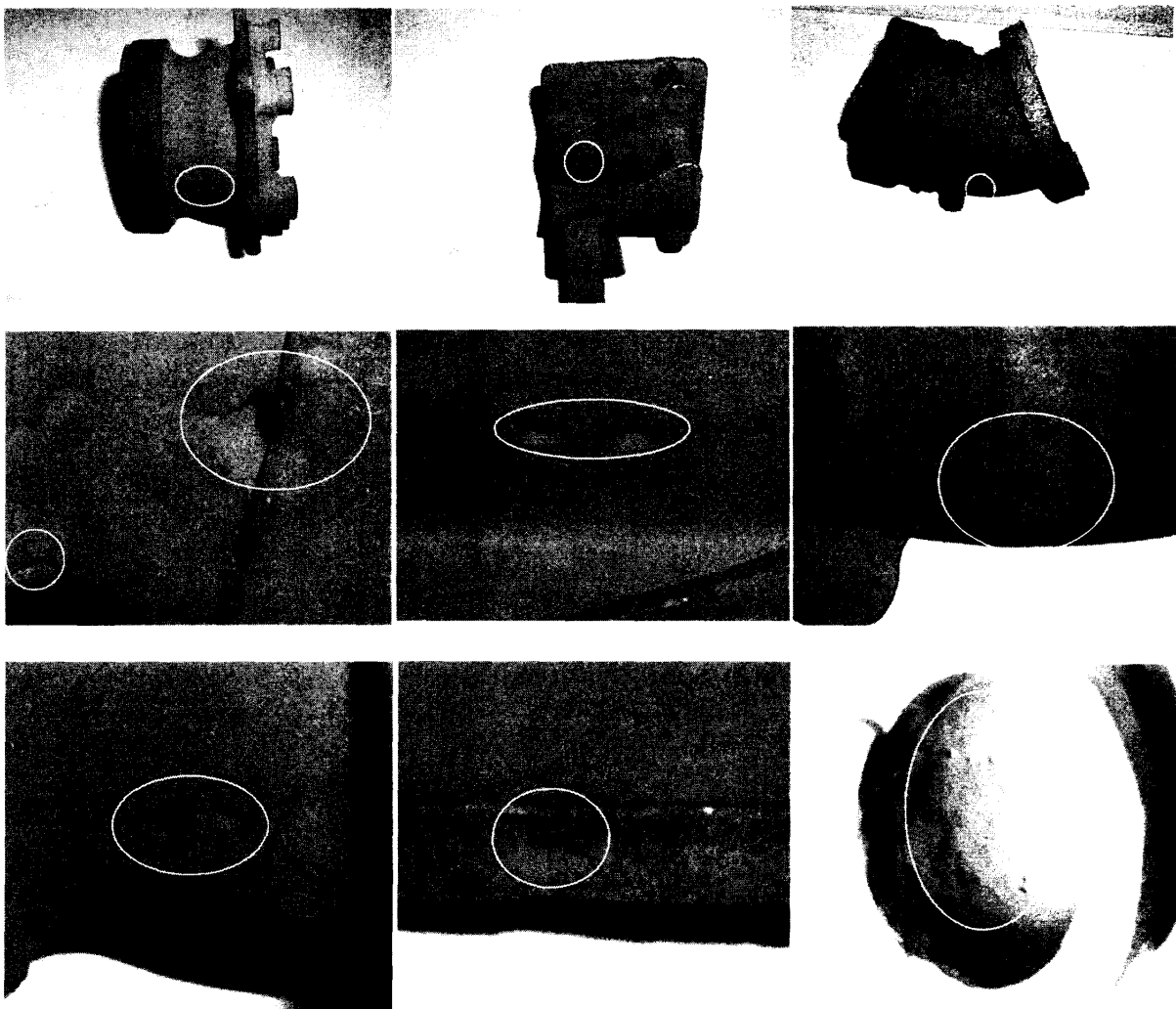


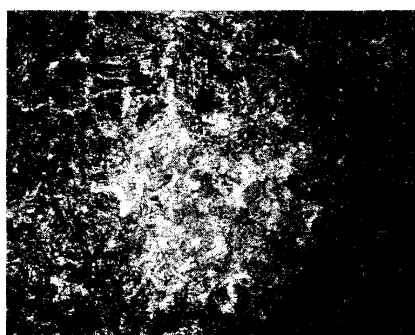
Рис. 2. Отливки из стали ВНЛ-3 после газостатирования и фрагменты отливок с внутренними дефектами, вышедшими на поверхность

Механические свойства стали ВНЛ-3

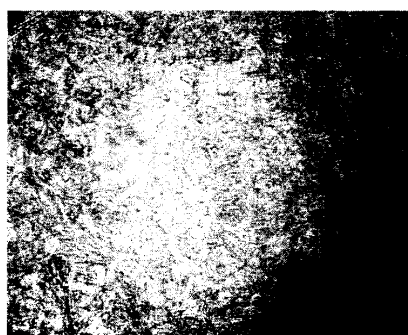
Марка материала	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа, (кг/мм <sup>2</sup> )	Относительное сужение $\Psi$ , %	Относительное удлинение $\delta$ , %	Ударная вязкость $a_n$ , кгс/см <sup>2</sup>	Примечание
ВНЛ-3 до ГИП	1260, (126,0) 126, (126,0)	60,0 56,0	16,0 16,0	12,5 10,3	Соответствует ОСТ 1.90093-82
ВНЛ-3 после ГИП	1370, (137)	19,0 15,0	8,0 10,0	11,7 14,8	Не соответствует ОСТ 1.90093-82
ВНЛ-3 после ГИП и т/о	1280, (128,0) 1280, (128,0) 1280, (128,0)	57,0 59,0 62,0 57,0	18,0 20,0 20,0 18,0	15,2 13,4 13,8 13,7	Соответствует ОСТ 1.90093-82
ВНЛ-3 ОСТ 1.90093-82	1250, (125,0)	35,0	12,0	4	

На рис. 3 показана микроструктура стали ВНЛ-3 до газостатирования и после газостатирования.

а)



б)



в)

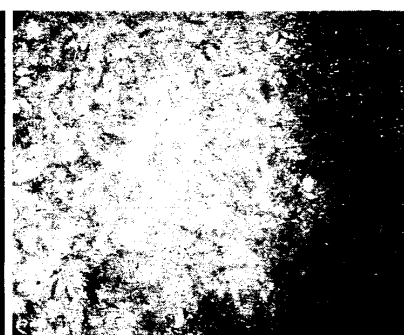


Рис. 3. Микроструктура образцов стали ВНЛ-3:  
 а – образец из ВНЛ-3 до ГИП с т/о, б – образец из ВНЛ-3 после ГИП без т/о,  
 в – образец из ВНЛ-3 после ГИП с т/о

При изучении образцов на микроскопе при увеличении в 500 раз видно, что после газостатирования произошло выравнивание кристаллической структуры, т.е. прошел процесс гомогенизации. Толщина обезлегированного слоя образца после ГИП составила 80...90 мкм, толщина обезлегированного слоя образца после ГИП и т/о – 70...80 мкм. Аустенитной оторочки в структуре ВНЛ-3 не наблюдается. Это связано с тем, что перед газостатированием отливки прошли полную термообработку.

Химический состав стали ВНЛ-3 после ГИП был проанализирован на растровом электронном микроскопе с окисной поверхности образца и с окислов.

Анализ показал, что при газостатировании происходит выгорание хрома с образованием окислов хрома. Обезлегированный слой и окисленная корочка удаляются пескоструйной очисткой, так же как и на отливках, не проходивших ГИП.



Выводы: Процесс газостатирования увеличивает прочность и пластичность материала, повышает надежность и эксплуатационные свойства, полностью исключает случаи попадания деталей с внутренними дефектами на изделия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белов, А. Ф. Повышение качества и надежности фасонных отливок путем высокотемпературной газостатической обработки / А. Ф. Белов, С. С. Хаюров // *Авиационная промышленность*. – 1986. – № 4. – С. 40-42.
2. Воробьева, И. Ф. Высокотемпературная газостатическая обработка литейных алюминиевых сплавов / И. Ф. Воробьева, Б. А. Копелиович, С. С. Хаюров // *Авиационная промышленность*. – 1988. – № 7. – С. 63.
3. Воробьева, И. Ф. Формирование структуры фасонных отливок из алюминиевых сплавов при газостатической обработке / И. Ф. Воробьева, Б. А. Копелиович, Г. А. Соковик // *Авиационная промышленность*. – 1988. – № 3. – С. 59-60.
4. Копелиович, Б. А. Исследование механизма и кинетики устранения пор в отливках из алюминиевых сплавов при высокотемпературной газостатической обработке / Б. А. Копелиович, И. Ф. Воробьева // *Авиационная промышленность*. – 1988. – № 9. – С. 50-52.
5. Влияние высокотемпературной газостатической обработки на качество крупногабаритных отливок из алюминиевых сплавов / Б. А. Копелиович, И. Ф. Воробьева, Г. А. Шарапова, В. Н. Ларионов, Л. М. Патрушев, В. Н. Шкроб, А. Л. Сквирчак // *Авиационная промышленность*. – 1989. – № 10. – С. 61-63.
6. Сравнительный анализ определения однородности химического состава образцов, отлитых в кокиль «рожковой» и «гребешковой» форм сплава АМ4,5кд / В. И. Якимов, Г. Е. Паниван, В. И. Муравьев, Е. В. Захарова, В. В. Куриный // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике*. – 2013. – № 1-1(13). – С. 85-89.