

УДК 621.74.045

*О.Г. Оспенникова,¹ Л.В. Пикулина¹, В.Ю. Орлова¹***МОДЕЛЬНЫЕ КОМПОЗИЦИИ
НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.
ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-37-44

Получение литых деталей с высокой геометрической точностью методом литья по выплавляемым моделям в основном зависит от качества модельных композиций и их компонентов, так как отливка полностью повторяет конфигурацию модели. На основании проведенных исследований разработаны и сформулированы требования к модельным композициям, отработана технология изготовления модельных композиций, разработана методика контроля качества, а также предложена методика отработки технологических режимов изготовления моделей деталей различной номенклатуры по показателю текучести расплава (ПТР) и вязкости модельных композиций.

Ключевые слова: модельные композиции, литье по выплавляемым моделям, модели, отливки, показатель текучести, вязкость.

*O.G. Ospennikova¹, L.V. Pikulina¹, V.Yu. Orlova¹***MODEL COMPOSITIONS ON THE BASIS OF SYNTHETIC MATERIALS.
PECULIARITY OF PHYSICAL AND MECHANICAL
AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES**

Reception of cast details with high geometrical accuracy a moulding method on melted models in mainly depends on quality of model compositions and their components as casting completely repeats model configuration. On the basis of the conducted research were developed and formulated requirements to model composition, the manufacturing technology is fulfilled, the method of quality control is developed and also the method of adjustment of technological modes of manufacturing models of parts of different nomenclature on a fluidity indicator of melt and viscosity of model compositions is proposed.

Keywords: model compositions, moulding on melted models, models, moulding, fluidity indicator of melt, viscosity.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Технология литья по выплавляемым моделям (как способ получения литых деталей) занимает особое место благодаря точности воспроизведения геометрических размеров детали, так как отливка полностью повторяет геометрическую форму. В настоящее время значительно усложнилась конфигурация отливок, увеличились их габариты, при этом повысились требования к размерной точности и качеству поверхности отливки, поэтому технология процесса литья продолжает развиваться и совершенствоваться. Получение литых деталей с высокой геометрической точностью методом

литься по выплавляемым моделям возможно благодаря высокотехнологичным модельным композициям (МК), позволяющим воспроизвести детали самой высокой сложности и больших габаритов. Особенно это важно при литье деталей рабочих сопловых лопаток ГТД из современных жаропрочных сплавов. С разработкой и производством подобных жаропрочных материалов непосредственно связано развитие отечественного авиационного двигателестроения [1–12].

С 1999 г. возобновилась разработка отечественных МК. Однако теперь стали применяться не природные компоненты, как в МК марок ВИАМ-102, ЗГВ-101, МВС-3А, а синтетические материалы отечественного производства. Так, были разработаны МК марок Салют-1, Салют-3, Салют-4, Салют-7 [13–22].

Возросшие требования к качеству изготавливаемых деталей заставляют продолжить поиск новых материалов и разработку МК нового поколения с улучшенными технологическими и физико-механическими характеристиками, способных заменить такие импортные модельные составы, как А7-FR/70 фирмы Blayson, КС3898NRR фирмы Paramelt, Remet GTW фирмы Remet, которые используются в серийном производстве ряда машиностроительных предприятий. Решением поставленных задач занимаются специалисты ФГУП «ВИАМ». Следует отметить, что новое поколение МК адаптировано к прессованию как на современных автоматических шприц-машинах производства Cleveland Tool and Machine Inc., так и на гидравлических прессах типа PUE. Модельные композиции отличаются не только более стабильными физико-механическими и технологическими характеристиками, но и отсутствием специфического запаха, имеют гранулированный вид вместо плит, а также разнообразную цветовую гамму.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.6. «Технологии изготовления лопаток ГТД с высокоэффективным охлаждением, включая керамические формы и стержни для лопаток из новых перспективных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [3].

Материалы и методы

Все перечисленные достоинства нового поколения МК целиком и полностью зависят от параметров технологического процесса их изготовления.

Технологический процесс изготовления МК включает четыре основные стадии:

- 1 – входной контроль исходных материалов;
- 2 – подготовка пластификатора на основе парафина с различным содержанием сополимера этилена с винилацетатом;
- 3 – изготовление МК, т. е. смешивание пластификатора с остальными компонентами в требуемом соотношении [13–15];
- 4 – входной контроль изготовленной МК.

Такой порядок приготовления МК основан на том, что при расплавлении сополимер этилена с винилацетатом образует непрерывный ряд твердых растворов с парафином, которые затем смешиваются с синтетической смолой и остальными компонентами. Таким образом, достигается высокая однородность структуры МК [15]. Разработан также целый ряд технологических приемов, позволяющих гарантировать высокую стабильность их физико-механических и технологических характеристик:

- относительно невысокую температуру плавления (75–97°C);
- хорошую текучесть;
- минимальную усадку (<0,7%);
- инертность к материалам керамической формы;
- достаточно высокую прочность при статическом изгибе (не менее 7,5 МПа) и теплоустойчивость (не менее 40°C);
- минимальную зольность;

- трещиностойчивость;
- высокую теплопроводность и узкий интервал затвердевания;
- безопасность для людей и окружающей среды.

Многолетние исследования и применение в серийном производстве различных марок МК показали, что все физико-механические и технологические свойства МК – это совокупность тесно связанных между собой параметров, обеспечивающих необходимый уровень качества МК. При этом каждый измеряемый параметр – это носитель определенной информации о модельном составе. Традиционно в технических условиях на МК как импортного, так и отечественного производства указывают такие физико-механические характеристики, как:

- предел прочности при статическом изгибе при 20°C;
- температура каплепадения или температура размягчения;
- теплоустойчивость;
- массовая доля золы.

Данные показатели, безусловно, достаточно информативные: показатель предела прочности МК характеризует способность образца определенного размера сопротивляться прилагаемой нагрузке. Это значит, что модельные составы, обладающие пределом прочности <3 МПа, слишком хрупкие, модели из такой МК сломаются, не выдержав дальнейших операций по зачистке и сборке модельных блоков. С другой стороны, предел прочности >10 МПа свидетельствует о том, что МК, скорее всего, содержит в своем составе вязкие тугоплавкие материалы, которые и обеспечили ей столь высокую прочность, но при этом и температура каплепадения будет тоже значительно выше оптимального значения. Таким образом, значение предела прочности МК в интервале от 7,0 до 9,5 МПа считается достаточным.

Следующий физико-механический показатель – температура каплепадения. Это показатель температуры, при которой происходит падение первой капли расплавленной МК, данный показатель можно также назвать температурой плавления. Методика определения температуры каплепадения выполняется в соответствии с ГОСТ 6793. Иностранные производители модельных составов в паспортах качества на свою продукцию указывают не температуру каплепадения, а температуру размягчения МК. Определение температуры размягчения производят по кольцу и шару в соответствии с ГОСТ 32054. За температуру размягчения принимают то значение температуры, при которой стальной шарик перемещается вниз на 25 мм сквозь слой размягченной МК. В числовом выражении значение температуры каплепадения приблизительно на 10–15°C выше температуры размягчения. Оба показателя указывают на температуру, при которой происходит плавление МК, а это необходимо знать при расплавлении модельного состава перед подачей в пресс.

Теплоустойчивость – следующий физико-механический показатель, измеряемый в градусах Цельсия и указывающий на температуру, при которой образец МК определенного размера не прогибается под собственной массой ниже 2 мм. Методика определения теплоустойчивости МК разработана в ОАО «НИИТавтопром». Теплоустойчивость можно отнести к одному из важнейших показателей качества МК с учетом того, что далеко не на всех машиностроительных предприятиях возможно разместить климатическое оборудование в литейных цехах. Соответственно, чем выше показатель теплоустойчивости, тем лучше, т. е. если теплоустойчивость МК составляет, например, 48°C (модельная композиция «ВИАМ МК-2»), то это означает, что модели деталей, изготовленные из данной МК, не будут подвержены самостоятельному изменению геометрических размеров при температуре до 48°C включительно.

Еще один физико-механический показатель – это массовая доля золы или зольность модельной композиции. Измеряют данную величину в процентах в соответствии

с ГОСТ 11512. Суть метода состоит в том, что навеску МК сжигают в муфельной печи при температуре $775 \pm 25^\circ\text{C}$ до полного озоления, затем взвешивают и рассчитывают зольность. Соответственно, чем ниже показатель зольности, тем выше качество МК. Поскольку в технологии литья по выплавляемым моделям предусмотрена операция прокаливания керамических форм после удаления модельной массы, то, если модельная композиция обладает высокой зольностью, зола МК останется внутри керамической формы после прокаливания и отливка будет с таким браком, как «засор».

Есть также такие характеристики МК, которые, как правило, не указываются в технических условиях, но имеют немаловажное значение для оценки качества МК. Эти характеристики носят справочный характер. К таким свойствам модельных составов можно отнести линейную усадку и пенетрацию. Усадка модельного состава выражается в процентах. Образец для определения усадки МК изготавливают прессованием в пресс-форме, после запрессовки образец извлекают из пресс-формы и охлаждают на воздухе при температуре $18\text{--}20^\circ\text{C}$ в течение 2–3 ч на ровной поверхности, после чего образец измеряют штангенциркулем. Величину линейной усадки рассчитывают по формуле

$$U_{\text{лин}} = (l_{\text{п/ф}} - l_{\text{обр}} / l_{\text{п/ф}}) 100\%,$$

где $U_{\text{лин}}$ – свободная линейная усадка, %; $l_{\text{п/ф}}$ – длина рабочей полости пресс-формы, мм; $l_{\text{обр}}$ – длина образца, мм.

Величину линейной усадки необходимо знать при проектировании и изготовлении пресс-формы, а также при переходе с одной марки МК на другую.

Пенетрация МК измеряется в соответствии с ГОСТ 11501 и характеризует ее твердость. Измерение пенетрации производят на пенетрометре типа ПН-1М или «Игла» или любом другом, который соответствует требованиям ГОСТ 1440. За единицу пенетрации принимают глубину проникновения калиброванной иглы в МК под воздействием груза определенной массы в течение заданного времени. Единица пенетрации равна 0,1 мм. Чем выше значение пенетрации, тем мягче или, другими словами, излишне пластична МК. С другой стороны, если показатель пенетрации, например, составляет от 5 до 7 ед., то такая МК слишком жесткая и, скорее всего, обладает повышенной склонностью к трещинообразованию.

Результаты и обсуждение

В таблице приведены физико-механические свойства различных марок МК.

Физико-механические свойства композиций различных марок

Модельная композиция	Температура каплепадения, °C	Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Массовая доля золы, %	Теплоустойчивость, °C	Свободная линейная усадка, %
ВИАМ-102	77–85	4,8	0,15	40	0,8
МВС-3А	75–80	5,0	0,03	20	1,0
Р-3	77–80	3,5	0,03	34	1,0
ЗГВ-101	85–95	5,5	0,1	38	1,0
Салют-3	80–90	7,0	0,02	40	0,65
Салют-7	80–90	7,5	0,02	44	0,6
Remet GTW (фирма Remet)	89	5,9	0,05	40	0,65
A7-FR/70 (фирма Blayson)	77	4,5	0,03	48	0,64
КС2683 (фирма Paramelt)	82	9,7	0,01	46	0,57
ВИАМ МК-1	80–90	7,0	0,02	42	0,68
ВИАМ МК-2	85–95	8,0	0,02	48	0,65

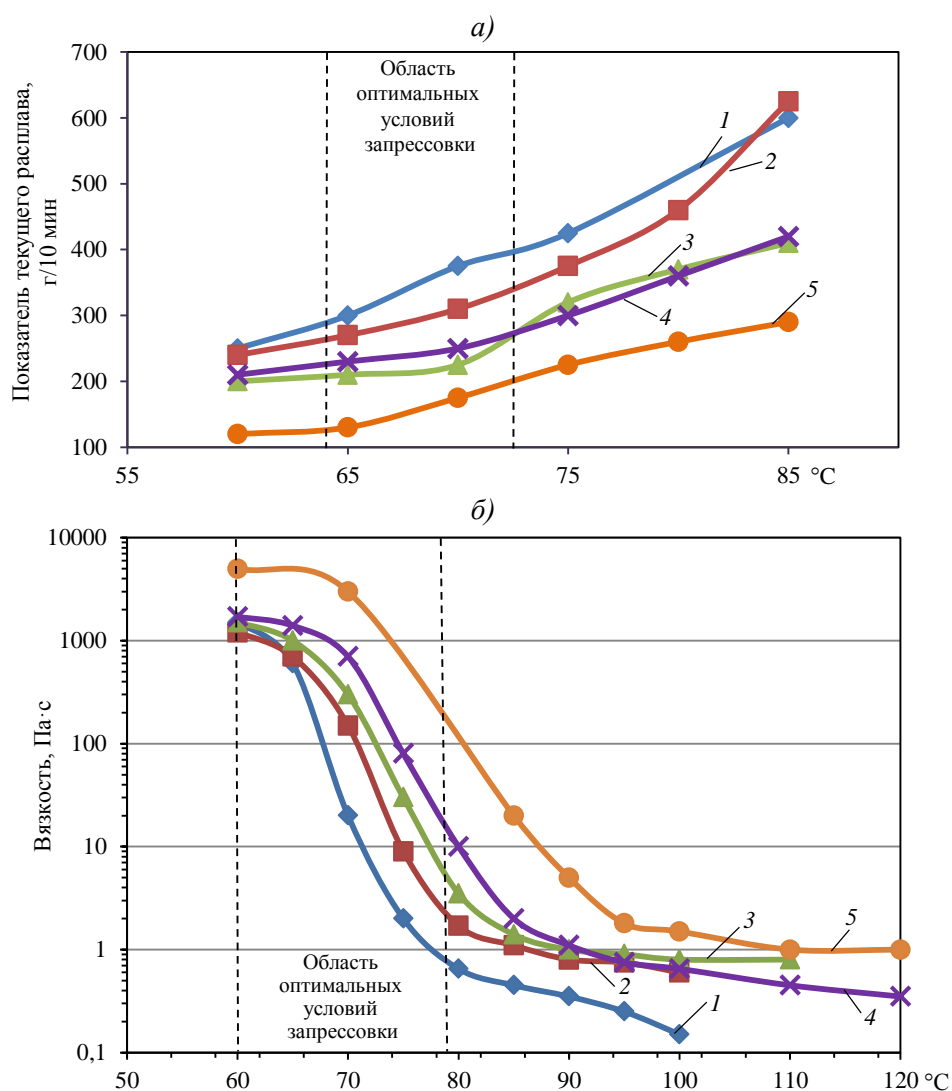
Помимо физико-механических параметров, МК обладают рядом технологических свойств, оказывающих решающее влияние на качество изготовленной модели. К таким показателям можно отнести показатель текучести расплава (ПТР), вязкость и трещиностойкость.

При отработке технологических параметров прессования моделей ориентируются на ПТР модельного состава или на вязкость МК – величину, обратную показателю текучести.

Исследование текучести МК проводили согласно ГОСТ 11645, который устанавливает метод определения ПТР термопластов [16, 17].

Исследование вязкости проводили методом хроматографии на реометре AR2000ex в соответствии с ASTM D 4473-03.

На рисунке представлены температурные зависимости ПТР и вязкости различных марок МК.



Температурные зависимости показателя текучести расплава (а) и вязкости (б) модельных композиций марок KC2683 (1), A7-FR/70 (2), KC3898NRR (3), ВИАМ МК-2 (4) и Салют-7 (5)

С учетом того, что текучесть или вязкость МК являются одними из наиболее эффективных технологических параметров, характеризующих качество изготовления моделей, в том числе тонкостенных, а также качество удаления модельного состава из полости керамической формы, приведенные зависимости позволяют определить температурный режим прессования моделей различной номенклатуры, а также полноту удаления модельного состава – чем быстрее плавится МК, а значит, выше текучесть и ниже вязкость, тем лучше заполняется пресс-форма и легче происходит удаление модельного состава из керамической формы [21, 23, 24].

Трещиностойкость – это не измеряемая в числовом выражении характеристика модельных составов. Склонность к трещинообразованию МК исследуют на моделях деталей, имеющих сложную конфигурацию, чаще всего это сложные тонкостенные модели [13]. Проблеме повышения трещиностойкости серийно выпускаемых модельных составов посвящен патент РФ 2162386. Суть изобретения заключается в том, что в серийно выпускаемые модельные составы добавляют от 1 до 20% поливинилбутилового эфира [21]. Данное решение помогло существенно повысить качество моделей, изготавливаемых из таких модельных составов, как ЗГВ-101, МВС-3А, Р-3.

Важным свойством МК является также возможность регенерации модельного состава, т. е. применение модельного состава повторно, после удаления его из керамических форм. Однако далеко не все модельные составы подлежат регенерации. Суть регенерации МК заключается в очистке вытопленного модельного состава от всех загрязнений, удалении влаги из него и введении от 10 до 30% свежей модельной композиции. Влагу удаляют выпариванием в термостате при температуре 110–120°C не менее 3 ч в зависимости от объема термостата или в специальной установке для регенерации. После удаления влаги модельный состав освежают. Загрязнения удаляют механически перед загрузкой МК в установку, а также процеживанием через сито. Следует отметить, что если в литейном производстве применяют одну и ту же МК и на модели деталей, и на модели литниково-питающей системы (ЛПС), то регенерированную МК можно использовать на моделях ЛПС и деталей неотчетливого назначения. Если же в литейном производстве для изготовления моделей ЛПС и моделей деталей применяются разные марки МК, то при удалении из керамических форм модельные составы, естественно, смешиваются. Такую смесь МК также возможно регенерировать. Но использовать регенерированную МК следует только на модели ЛПС, поскольку применение разных марок МК обусловлено, скорее всего, производством деталей сложной конфигурации ответственного назначения, таких, например, как детали ГТД. Для изготовления моделей таких деталей требуется МК высокого качества, поэтому для изготовления моделей с высокой геометрической точностью регенерированная МК не рекомендуется. Освежать модельный состав после удаления влаги необходимо свежей МК, применяемой для изготовления ЛПС. Следует отметить, что в этом случае регенерация возможна, только если обе марки МК изготовлены с применением синтетических материалов высокого качества, так как в процессе выпаривания влаги может произойти расслоение модельного состава. Данный процесс будет иметь необратимый характер.

Применение регенерированной МК в литейном производстве чрезвычайно выгодно с экономической точки зрения – снижение себестоимости литья за счет экономии МК и, как следствие, повышение рентабельности литейного производства в целом.

Заключения

Таким образом, в результате проведенных исследований сформулированы основополагающие требования к физико-механическим и технологическим характеристикам МК. Показаны возможность, необходимость и эффективность регенерации МК.

Получены результаты текучести и вязкости различных марок МК в зависимости от температуры. Полученные результаты показали (см. рисунок) идентичные температурные интервалы, которые характеризуют область оптимальных условий запрессовки. Методики определения текучести и вязкости МК подтвердили эффективность и достоверность данных для подбора технологических параметров изготовления моделей различной номенклатуры деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Современные литые никелевые жаропрочные сплавы // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение». М., 2006. С. 39–55.
2. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н. Основные направления развития литья лопаток газовых турбин // Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. М.: Наука, 2006. С. 609–623.
5. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Демонис И.М., Фоломейкин Ю.И. Монокристаллические лопатки с транспирационным охлаждением для высокотемпературных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2003. №1. С. 24–33.
6. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Каблов Д.Е. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 20–25.
7. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 105–117.
8. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой // Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
9. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А. Новое в технологии производства лопаток ГТД // Аэрокосмический курьер. 1999. №2. С. 60–62.
10. Каблов Е.Н., Кишкин С.Т. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД // Газотурбинные технологии. 2002. №1. С. 34–37.
11. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы нового поколения // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 27–44.
12. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
13. Оспенникова О.Г. Модельные композиции на основе синтетических материалов для литья по выплавляемым моделям деталей ГТД: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Салют, 2000. 32 с.
14. Оспенникова О.Г., Хаютин С.Г. Структура модельных композиций для литья по выплавляемым моделям // Материаловедение. 2009. №10. С. 46–51.
15. Ospennikova O.G., Shutov A.N., Pikulina L.V., Dushkin A.M. Pattern compounds based on synthetic materials for casting gas-turbine engine blades // Литейное производство. 2003. №1. С. 21–29.

16. Оспенникова О.Г. Исследование и разработка параметров технологического процесса изготовления моделей из модельных композиций на основе синтетических восков // *Авиационные материалы и технологии*. №3. 2014. С. 18–21. DOI: 10.18577/2017-9140-2014-0-3-18-21.
17. Оспенникова О.Г. Исследование влияния наполнителей на свойства и стабильность модельных композиций, выбор оптимальных составов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №3. С. 14–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-14-17.
18. Композиция для изготовления выплавляемых моделей: пат. 2447968 Рос. Федерация; заявл. 14.12.10; опубл. 20.04.12.
19. Композиция для изготовления выплавляемых моделей: пат. 2447969 Рос. Федерация; заявл. 14.12.10; опубл. 20.04.12.
20. Композиция для изготовления выплавляемых моделей: пат. 2182057 Рос. Федерация; заявл. 31.05.00; опубл. 10.05.02.
21. Композиция для изготовления выплавляемых моделей: пат. 2162386 Рос. Федерация; заявл. 17.03.10; опубл. 27.01.01.
22. Композиция для изготовления выплавляемых моделей: пат. 2177387 Рос. Федерация; заявл. 31.05.00; опубл. 27.12.01.
23. Репах С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006. 1056 с.
24. Каблов Е.Н., Деев В.В., Нарский А.Р., Бондаренко Ю.А. Технология удаления модельных масс из керамических форм для литья по выплавляемым моделям // *Литейное производство*. 2005. №3. С. 20–22.