

УДК 621.74

Технологический процесс изготовления тонкостенных отливок из алюминиевых сплавов со сложными внутренними полостями

Юсипов Равиль Фатегович

ysipov@bmstu.ru
SPIN-код: 1317-1980

Хациев Юрий Харитонович

uhh@bmstu.ru
SPIN-код: 7183-1516

Айрапетян Армен Саакович

ayrapetyanas@bmstu.ru
SPIN-код: 2990-2787

Виноградов Владислав Юрьевич

vin@bmstu.ru
SPIN-код: 6408-7578

Георгиевский Мирослав Георгиевич

geomiros@bmstu.ru
SPIN-код: 3787-0646*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

Аннотация. Представлена технология изготовления керамических стержней на основе гидролизованного этилсиликата с добавками в наполнитель суспензии предварительно прокаленного гипса для изготовления отливок из алюминиевых сплавов со сложными внутренними полостями. Решается комплексная задача обеспечения точности размеров и геометрии внутренних полостей отливок с одновременным обеспечением прочности керамических стержней на этапах изготовления отливок и выбиваемости стержней при очистке отливок.

Ключевые слова: стержень, гипс, этилсиликат, прокаливание, суспензия

Technological process for manufacturing thin - walled castings from aluminum alloys with complex internal cavities

Yusipov Ravil Fategovich

ysipov@bmstu.ru
SPIN-code: 1317-1980

Khatsiev Yuri Kharitonovic

uhh@bmstu.ru
SPIN-code: 7183-1516

Ayrapetyan Armen Saakovich

ayrapetyanas@bmstu.ru
SPIN-code: 2990-2787

Vinogradov Vladislav Yuryevich

vin@bmstu.ru
SPIN-code: 6408-7578

Georgievsky Miroslav Georgievich

geomiros@bmstu.ru
SPIN-code: 3787-0646*BMSTU, Moscow, Russia*

Abstract. The article presents a technology for manufacturing ceramic cores based on hydrolyzed ethyl silicate with additives in the filler suspension of pre-calcined gypsum for manufacturing aluminum alloy castings with complex internal cavities. The article addresses the complex task of ensuring the accuracy of the dimensions and geometry of the internal cavities of

the castings while simultaneously ensuring the strength of the ceramic cores during the casting process and the ease of removing the cores during casting cleaning.

Keywords: core, gypsum, ethyl silicate, calcination, suspension

Изготовление тонкостенных отливок с каналами сложной конфигурации способом литья по выплавляемым моделям не всегда удовлетворяет высоким требованиям, предъявляемым к геометрической и размерной точности этих каналов.

Формирование сложных по конфигурации каналов отливок в литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) осуществляется поэтапно: образование каналов в выплавляемых моделях с использованием карбамидных стержней, удаляемых из модели растворением в воде; изготовление оболочковой формы для оформления внешних и внутренних поверхностей отливки послойным нанесением на модель слоев огнеупорного покрытия с последующим удалением модели из полости формы и термической обработкой формы перед заливкой; охлаждение отливки с последующим удалением керамики из ее полости.

Многоэтапность технологического процесса, отсутствие возможности осуществления контроля качества лицевого слоя формы и размеров стержневых фрагментов формы, длительность и неравномерность сушки элементов формы, оформляющих каналы отливки, деформация оболочковой формы при заливке расплавом и в период затвердевания отливки являются основными причинами искажения конфигурации и накопления погрешностей при формировании размеров внутренних полостей отливок [1].

Использование предварительно изготовленных сплошных керамических стержней, устанавливаемых в выплавляемые модели для оформления каналов в отливках, позволяет осуществлять контроль размерной и геометрической точности стержней, шероховатость их поверхности до заливки форм расплавленным металлом. Это значительно повышает надежность изготовления отливок с требуемыми параметрами внутренних полостей отливок из алюминиевых сплавов. Однако в этом случае керамические стержни должны обладать: достаточной прочностью, выдерживая давление при запрессовке модельного состава, термические напряжения при прокаливании и заливке расплавленного металла.

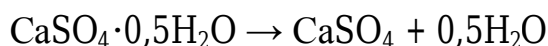
Высокая химическая активность алюминия по отношению к щелочам, а также его малая прочность и твердость не позволяют осуществлять очистку внутренних полостей отливок в щелочных средах и значительно ограничивает применение механических способов очистки. Таким образом, одним из требований к материалам керамического стержня является способность разупрочняться при проведении очистных операций [2].

Для изготовления форм в литейном производстве широко применяют гипс. Гипс — недефицитный, дешевый, обладает достаточной огнеупорностью и способностью растворяться в воде и в слабых растворах соляной кислоты [3].

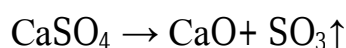
При нагреве в гипсе происходят превращения, связанные с потерей воды. При температуре 170–200 °С происходит дегидратация гипса с образованием полугидрата:



В интервале температур 250–350 °С удаляется оставшаяся гидратная вода с образованием безводного сульфата кальция:



Дальнейшее повышение температуры более 800 °С приводит к диссоциации безводного сульфата кальция:



Превращения гидратированного гипса при нагреве приводит к значительным усадочным процессам. Суммарная усадка может составлять 6,5 %. Это является причиной значительного снижения прочности стержней из гипса. У высокопрочного гипса марки 500 при нагреве от 20 до 800 °С прочность на сжатие уменьшается с 20 до 3 МПа [4].

Сочетание невысокой прочности, малой теплопроводности, значительной усадки при нагреве и охлаждении гипса является причиной образования многочисленных трещин, приводящих к полному разупрочнению стержней из гипса во время их прокаливания и заливки металлом.

Применение гидролизованного раствора этилсиликата в качестве связующего при изготовлении гипсовых стержней обеспечивает повышение их прочности.

На рисунке представлены зависимости линейного расширения керамических образцов, изготовленных с использованием в качестве связующего гидролизованного раствора этилсиликата-40, в качестве наполнителя суспензии использовали пылевидный кварц (кривая 1) и полугидрат гипса (кривая 3).

Применение полугидрата гипса, содержащего 0,5 молекулы воды и гидролизованного раствора этилсиликата, уменьшило усадку при нагреве-охлаждении образцов до 2,5 % (кривая 3).

Таким образом, является очевидным существенное влияние воды в гипсе на его усадку при нагреве-охлаждении: суммарная усадка двугидрата гипса составляет 6,5 %, а полугидрата — 2,5 %.

Однако использование полугидрата гипса в составе керамических стержней не обеспечивает прочность, выдерживающую запрессовку модельного состава. Использование полностью обезвоженного гипса в качестве наполнителя суспензии с этилсиликатным связующим полностью устранила необратимую усадку гипса при нагреве-охлаждении (кривая 2).

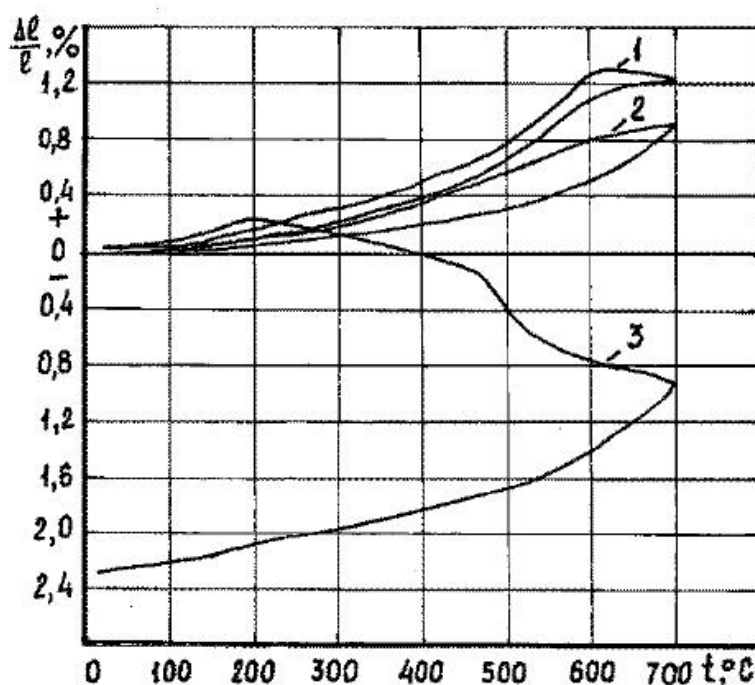
Характер изменения размеров образцов из пылевидного кварца (кривая 1) и из обезвоженного гипса (кривая 2) не имеют необратимой усадки. Температурные коэффициенты линейного расширения-сжатия (ТКЛР) в интервале температур от 20 до 700 °С близки по своим значениям:

$$\text{ТКЛР}_{\text{SiO}_2} = 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}, \text{ ТКЛР}_{\text{CaSO}_4} = (13-15) 10^{-6} \text{ 1/град}.$$

Таким образом, обезвоженный гипс может быть использован в качестве разупрочняющей добавки в наполнителе суспензии в сочетании с пылевидным кварцем — без значительного изменения ТКЛР керамической смеси [5].

Оптимальный интервал термообработки гипса составляет 600–700 °С, когда в основном завершается изменение его кристаллической решетки и он переходит в безводный ангидрит.

Содержание обезвоженного гипса от 40 до 60 % в составе кварцевой керамики обеспечивает начальную прочность на изгиб в пределах 1,4–1,7 МПа, что достаточно для выполнения технологических операций изготовления отливок [5, 7].



Изменение размеров керамических образцов с этилсиликатным связующим:

1 — 100 % SiO₂; 2 — 100 % CaSO₄; 3 — 100 % CaSO₄·0,5H₂O

Обезвоженный гипс содержит щелочные примеси, что позволяет использовать его в качестве мягкого гелеобразователя при изготовлении керамических стержней на этилсиликатном связующем. Равномерность распределения гипса в объеме наполнителя суспензии обеспечивает стабильность процесса гелеобразования. Однако затвердевание суспензии с использованием обезвоженного гипса как гелеобразователя происходит в течение 30–40 минут из-за малой активности обезвоженного гипса. Ускорение и регулирование процесса отверждения суспензии возможно при ее нагреве [6].

Проведенные исследования показали, что нагрев суспензии на основе гидролизованного этилсиликата с добавками обезвоженного гипса до 40–60 °С увеличивает скорость затвердевания суспензии в 4–6 раз. Отверждение суспензии составило 5–10 минут.

Представленный технологический процесс может быть использован при изготовлении тонкостенных отливок из алюминиевых сплавов со сложными внутренними полостями как литьем по выплавляемым моделям, так и литьем в песчано-глинистые формы и литьем в кокиль.

Список источников

- [1] Бернацкий Ф.И., Борщ А.Н., Глотов Е.Б. и др. *Формирование точности стальных отливок, изготавливаемых по выплавляемым моделям*. Владивосток, б. и., 1977, 27 с.
- [2] Лакеев А.С., Щегловитов Л.А., Кузьмин Ю.Д. *Прогрессивные способы изготовления точных отливок*. Киев, Техника, 1984, 160 с.
- [3] Шкленник Я.И., Озеров В.А. *Литье по выплавляемым моделям*. Москва, Машиностроение, 1984, 408 с.
- [4] Кестнер О.Е., Бараданьянц В.К., Лапидевская Л.А. *Точное литье цветных сплавов в гипсовые и керамические формы*. Москва, Машиностроение, 1968, 290 с.
- [5] Юсипов Р.Ф., Коробейников К.А. *Использование гипса в составе легкоудаляемых керамических стержней при получении алюминиевых отливок по выплавляемым моделям*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990, 3 с.
- [6] Матусевич И.С. Керамические стержни и формы. *Литейное производство*, 1972, № 1, 3 с.
- [7] Юсипов Р.Ф., Коробейников К.А. *Разработка технологического процесса легкоудаляемых керамических стержней для получения сложных разветвленных полостей в алюминиевых отливках литьем по выплавляемым моделям*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990, 8 с.

Содержание

Секция 1. Материаловедение и новые материалы в машиностроении	5
<i>Баженов Е.О., Галкин В.В., Гаврилов Г.Н., Дербенев А.А., Вашурин А.В.</i> К вопросу оценки разнородности микроструктуры при построении диаграмм рекристаллизации	7
<i>Базиненков А.М., Шелковый М.А., Фадеев К.В.</i> Количественная оценка скорости седиментации магнитореологической жидкости с тиксотропными свойствами	15
<i>Богданов А.И., Кулевич В.П., Шморгун В.Г.</i> Формирование покрытий системы Ti-Cu-Ni методом сварки взрывом с последующей лазерной обработкой	21
<i>Губанов О.М.</i> Некоторые аспекты повышения свойств электротехнических сталей	27
<i>Ким Е.Д., Попова В.С., Ри Э.Х.</i> Синтез высокоэнтропийного интерметаллического сплава системы AL-TI-NI-CR-V-ZR методом СВС-металлургии	34
<i>Ким Е.Д., Борец М.И., Ри Э.Х.</i> Влияние амплитуды наносекундных электромагнитных импульсов на структурообразование и свойства алюмоматричных композиционных сплавов Al- Mg ₂ Si	39
<i>Кулевич В.П., Богданов А.И., Шморгун В.Г., Новиков Р.Е.</i> Формирование алюминидного покрытия на поверхности титана с использованием сварки взрывом, обработки давлением и термообработки	47
<i>Кунавин С.А., Скоробогатых В.Н., Нахабина М.С., Хаймин С.В., Мельников А.П.</i> Сопротивление разрушению трубной стали типа 15ХМ при механическом нагружении в условиях воздействия повышенных температур	52
<i>Лазаренко Н.К., Смирнов М.О., Корзун Е.Л.</i> Исследование дефекта «белое пятно» в слитках ВДП жаропрочного сплава ВЖ718 полученного методом триплекс-процесса	56
<i>Лыскович А.А., Баженов В.Е., Баранов И.И.</i> Влияние термической обработки на механические свойства и теплопроводность литейных сплавов системы Al-Zn-Ca-Sc-Hf	61
<i>Манаев О.И., Шевченко С.Ю.</i> Выбор материалов и упрочняющих технологий в машиностроении	66
<i>Наумова Е.А., Бобрышева А.О., Беликов П.И., Качанова М.А.</i> Исследование влияния титана на структуру и свойства кальцийсодержащих алюминиевых сплавов	71
<i>Пахомова С.А., Манаев О.И., Головачев Е.А.</i> Исследование развития усталостных трещин при помощи метода диагностики акустической эмиссии	77
<i>Поляков С.А., Ширяев Е.А., Хрящев И.И.</i> Влияние размера и характера распределения карбидных включений на свойства порошкового сплава системы Co-Cr-Mo	82
<i>Самойлова М.А., Лукин Е.И., Севальнев Г.С.</i> Влияние температуры закалки на структуру и механические свойства коррозионностойкой мартенситно-аустенитной криогенной стали	88

<i>Смирнов А.Е., Фомина Л.П., Сапронов И.Ю., Али Али.</i> Анализ технологии изготовления деталей кулачкового механизма	94
<i>Сушков В.С., Зотов В.В.</i> Исследование микроструктуры и влияния степени деформации и глубины вдавливания на микротвердость алюминиевого материала	101
<i>Сушков В.С., Зотов В.В.</i> Математические модели влияния процесса осаждения прессованием на свойства образцов дюралюминия	106
<i>Третьяков А.Ф., Курганова Ю.А.</i> Повышение качества соединения проволок сеток в процессе изготовления листовых пористых сетчатых материалов из стали 12Х18Н10Т	110
<i>Худнев А.А., Хаткевич В.М., Гусев А.А., Краснова Е.К., Плохих А.И.</i> Сравнительный анализ стойкости к водородному охрупчиванию сталей для бесшовных труб	116
<i>Чавдаров А.В.</i> Заметки о применении алюминия в технике	124
Секция 2. Технологии и оборудование заготовительных производств в машиностроении (литейное, кузнечно-штамповочное, прокатно-волочильное производства)	132
<i>Алдунин А.В., Половинко В.Э.</i> Анализ условий формирования структуры и механических свойств углеродистой полосовой стали на литейно-прокатном комплексе	133
<i>Алленов М.Г., Шитиков А.А., Белокуров О.А.</i> Моделирование вскрытия осевой полости при поперечно-клиновой прокатке свинца в QForm	138
<i>Белов Н.А., Черкасов С.О., Мотков М.М.</i> Структура и механические свойства прессованных прутков сплава системы Al-Zn-Mg-Ni-Fe, полученного литьем в электромагнитный кристаллизатор	144
<i>Белокуров О.А., Драценко Ю.Е., Крамаренко О.Ю., Романова А.Р.</i> Разработка технологического процесса изготовления детали «Коллектор» из профильной трубы прямоугольного сечения	149
<i>Белокуров О.А., Лавриненко В.Ю., Смирнов М.О., Ключева И.В., Анисимов А.И.</i> Разработка математических моделей паровоздушных молотов с массами падающих частей 10 и 13 т в программном комплексе QForm	155
<i>Бровман Т.В., Гулийев И.М., Горченков К.С.</i> Деформации тонкостенных цилиндрических труб в условиях продольного изгиба	161
<i>Васильев М.Г., Заикин Я.И.</i> Упругопластическая деформация при изгибе заготовок	166
<i>Гарибов Г.С., Карашаев М.М., Лавриненко В.Ю., Карягин Д.А., Востриков А.В.</i> Взаимосвязь структуры и механических характеристик жаропрочных никелевых сплавов с технологическими параметрами производства заготовок дисков, получаемых методом металлургии гранул («as-HP»)	171
<i>Денисов М.С.</i> Автоматизация процесса производства автомобильных литых дисков методом литья с кристаллизацией под давлением на гидропрессовом оборудовании	176
<i>Долгий К.С., Евсюков С.А., Артюховская Т.Ю.</i> Исследование прессования рамного профиля через комбинированную матрицу	183

<i>Евдокимов Д.В., Тарасов И.С., Евсюков С.А.</i> Совершенствование способа определения скорости подачи оправки во время раскатки	189
<i>Зарубина О.А., Зарубин А.М.</i> Снижение негативного воздействия на окружающую среду смазочных материалов пресс-форм при литье под давлением алюминиевых сплавов	195
<i>Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н.</i> Взаимосвязь между конструктивными параметрами электроэрозионного текстурирования и частотным параметром шероховатости	199
<i>Исангулов Д.А., Масликов И.С., Морозов С.В.</i> Исследование температурного разогрева при изотермической штамповке заготовок лопаток ГТД	203
<i>Карашаев М.М., Лаптев М.С., Шпагин А.С., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В.</i> Модернизация опытного производства поковок из коррозионностойкой стали марки ВНС32–ВИ в условиях НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ	209
<i>Карнов С.М., Катунина Т.А.</i> Теоретическое исследование процесса листовой штамповки изделий типа «Переходник» совмещенным способом «обжим-раздача»	212
<i>Коняшкин И.А., Белелюбский Б.Ф., Морозов Ю.А., Татарников Н.Н.</i> Исследование режимов прокатки тончайшей ленты из никелида титана с использованием компьютерного измерительного комплекса	217
<i>Коровин В.А., Леушин И.О., Гейко М.А., Маслов К.А., Гарченко А.А.</i> Влияние основных факторов на состояние изложниц	222
<i>Коротченко И.А., Коротченко А.Ю.</i> Литье под давлением тонкостенных протяженных отливок	228
<i>Лавриненко В.Ю.</i> Разработки кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана в области современных технологий кузнечно-штамповочного производства	233
<i>Мазур И.П., Черный В.А., Мелихова Э.Н.</i> Однократная прокатка электротехнической анизотропной стали	238
<i>Морозихина И.К., Гулийев И.М., Горченков К.С.</i> Вариационные методы решения задач обработки металлов давлением	243
<i>Мышечкин А.А., Боровик Т.Н., Скрипник С.В.</i> Исследование цифровым моделированием технологического процесса горячей объемной штамповки полых поковок с целью повышения стойкости инструмента	247
<i>Опенкова Е.А., Петров П.А.</i> Исследование теплового эффекта пластической деформации углеродистых сталей	253
<i>Пчельников А.В.</i> Моделирование эволюции микроструктуры жаропрочных сплавов на никелевой основе	259
<i>Резнюк К.Д.</i> Технология изготовления пластин теплообменников с увеличенной глубиной каналов методом локальной формовки эластичным инструментом	264
<i>Рижский А.А., Баженов В.Е., Базлова Т.А., Анищенко А.С.</i> Применение новых огнеупорных наполнителей для 3D-печати литейных форм по технологии Inkjet	269
<i>Рулин С.П., Петров П.А.</i> Применение ДСК-анализа для исследования технологических смазок для холодного выдавливания	274

<i>Рябичева Л.А., Бабич И.Н., Белозир И.И.</i> Термомеханический режим штамповки деталей из порошкового медно-титанового материала	279
<i>Свинооров Ю.А.</i> Функциональный подход при разработке новых материалов на основе технического лигнина	284
<i>Свинооров Ю.А., Рябичев В.Д.</i> Смеси холодного отверждения на основе технического лигнина для производства отливок	289
<i>Семенов К.Г., Батышев К.А., Свинооров Ю.А.</i> Газосодержание бескислородной меди при плавке в индукционных канальных печах	296
<i>Семенов К.Г., Константин А.Б., Свинооров Ю.А.</i> Теоретические основы окислостойкости низколегированных сплавов на основе меди для фасонных отливок	300
<i>Семенов К.Г., Чернов В.В., Батышев К.А., Панкратов С.Н.</i> Моделирование процессов изготовления фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом	305
<i>Серезжин М.А., Новгородова М.В.</i> Исследование влияния параметров печати на прочность FDM штампов	311
<i>Смирнов М.О., Солнцев М.А., Лазаренко Н.К.</i> Исследование особенностей процессаковки прутков из сплава на основе железа и никеля	317
<i>Стулов В.В., Шафиев О.М., Беленикина А.Ф.</i> Расчет напряжений в корочке стальной цилиндрической заготовки и усилие ее вытягивания из кристаллизатора. Часть 1. Для кристаллизатора с медной стенкой	323
<i>Стулов В.В., Иванов А.В., Шафиев О.М.</i> Расчет первого контура кристаллизатора с испарительно-конденсационной системой охлаждения	333
<i>Сурков И.А., Кравцов Н.С.</i> Разработка и внедрение комплекса научно-производственных решений для увеличения количества и повышения качества продукции на примере прессы усилием 100 МН УЗТМ	342
<i>Третьяков М.А.</i> Обеспечение точности измерения деталей, изготовленных ротационной вытяжкой на операционном контроле	354
<i>Узлов М.Г., Коротченко А.Ю.</i> Различие газотворности смеси в технологиях 3D-печати и литья в песчаные формы	358
<i>Ушаков А.В.</i> Экспериментальные исследования теплового эффекта при пластическом деформировании сталей 10 и 41Х1	363
<i>Хилков Д.Э.</i> Исследование влияния отработанной песчано-глинистой смеси на газопроницаемость и прочность форм	368
<i>Цыганков К.М., Лагошина Е.В.</i> Моделирование процесса прошивки на стане ТПА 73-273, исследование температуры и напряжений	374
<i>Шагалеев Р.Р.</i> Практические рекомендации по совершенствованию технологических процессов гибки ответственных деталей авиационной техники на листоштамповочных молотах	381
<i>Шаталов Р.Л., Медведев В.А., Типалин С.А., Бирик П.Ю.</i> Влияние изменения направления прокатки листов из сплава АМг2 на формирование твердости и электропроводности	385
<i>Шумилова Ю.А., Лагошина Е.В.</i> Лабораторный трубоволоочильный стан	390

<i>Юсипов Р.Ф., Хациев Ю.Х., Айрапетян А.С., Виноградов В.Ю., Георгиевский М.Г.</i> Номограмма для определения количества жидкой и твердой фаз в суспензии (шликере) при изготовлении керамических литейных форм	395
<i>Юсипов Р.Ф., Хациев Ю.Х., Айрапетян А.С., Виноградов В.Ю., Георгиевский М.Г.</i> Технологический процесс изготовления тонкостенных отливок из алюминиевых сплавов со сложными внутренними полостями	400

Научное издание

Инновационные технологии,
оборудование и материалы
машиностроительных
производств
(МашТех-2025)

II Международная
научно-техническая конференция
(Москва, 26–28 ноября 2025 года)

Сборник материалов

Том 1

Художник *Э.Ш. Мурадова*
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 17.10.2025. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 33,31. Тираж 70 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
<https://press.bmstu.ru>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.