

ИНЖЕНЕР- МЕХАНИК

№ 3 (76)
июль – сентябрь
2017

Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал
Издается с июля 1998 года
Выходит один раз в три месяца

Учредитель: Общественное объединение
«Белорусское общество инженеров-механиков»
(ОО «БОИМ»)

Главный редактор Чижик С.А.

Редакционная коллегия: Андреев М.А., Дашков В.Н.,
Дубовик Д.А., Дюжев А.А., Захарик А.М.,
Колпащиков В.Л., Крупец Л.Н., Лягушев Г.С.,
Мариев П.Л., Медвецкий Е.И., Мелешко М.Г.

Адрес редакции:
220141, Минск, ул. Купревича, 10 (ранее Жодин-
ская, 4)
тел./ факс 203-88-80; 226-73-36
E-mail: mail@boim.by
Свидетельство о регистрации № 1132 от 21.04.1998

Подписной индекс **00139**

Компьютерная верстка Н.В. Побяржина

Подписано в печать 28.09.2017.
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,6. Уч.-изд. л. 4,7.
Тираж 200 экз. Заказ №
Цена номера договорная.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в ЧПТУП
«Колорград»
Лицензия ЛП № 02330/474 от 08.09.2015 г.
220033, г. Минск, пер. Велосипедный, 5, оф. 904.
www.segment.by

СОДЕРЖАНИЕ

Разработки ученых и специалистов

Индустрия 4.0: от информационно-коммуникационных к аддитивным и нанотехнологиям.....2

Высокоэффективная финишная обработка поверхностей изделий.....12

Материалы конференций и семинаров

Аддитивные технологии в производстве изделий из керамики: перспективы и опыт практического использования.....17

Ультразвуковая сварка полимеров.....22

Наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов и изделия из них.....27

Разработка методов повышения качества соединений из стали 40х, полученных электронно-лучевой сваркой.....33

Получение длинномерных изделий из отходов порошковых композиций Al-V.....39

Из истории авиации и кораблестроения

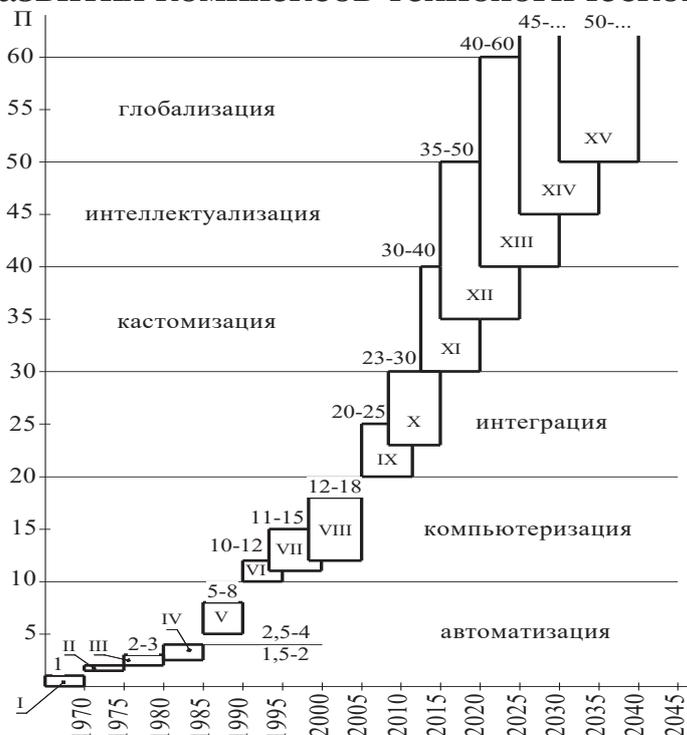
Самолёты МАИ: «Октябрёнок» и другие.....44



ИНДУСТРИЯ 4.0: от информационно-коммуникационных к аддитивным и нанотехнологиям

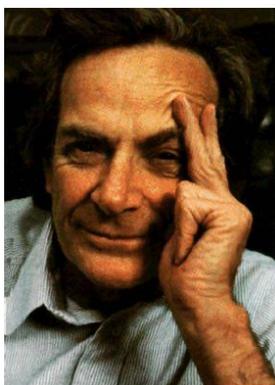
*Чирик С.А.,
Витязь П.А., Президиум НАН Беларуси,
Хейфец М.А. Отделение физико-технических наук*

Этапы развития комплексов технологического оборудования

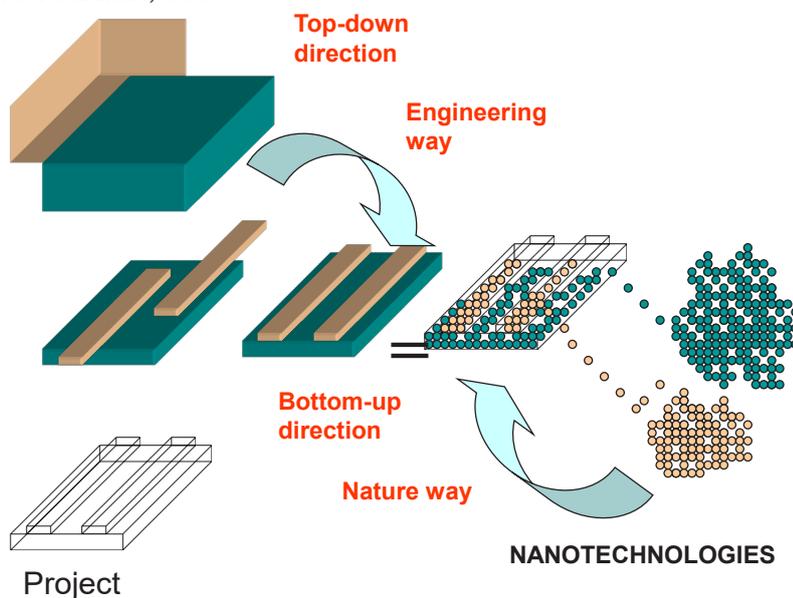


П – производительность оборудования, возрастающая со временем: I – универсальное оборудование с производительностью, принятой за 1, II – оборудование с числовым программным управлением, III – робототехнические комплексы, IV – обрабатывающие центры, V – гибкие производственные системы, VI – компьютерно-управляемое производство, VII – мехатронные технологические комплексы, VIII – компактное интеллектуальное производство, IX – компьютерное сопровождение жизненного цикла изделий, X – виртуальные предприятия, XI – аддитивное производство, XII – интернет вещей, XIII – машинное обучение, XIV – искусственный интеллект, XV – синергия технологий

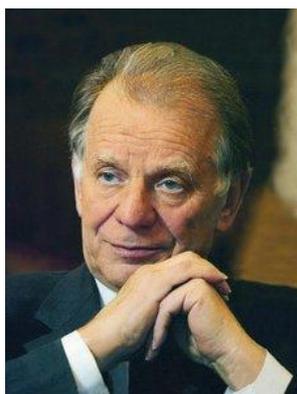
От технологий «сверху-вниз» к технологиям «снизу-вверх»



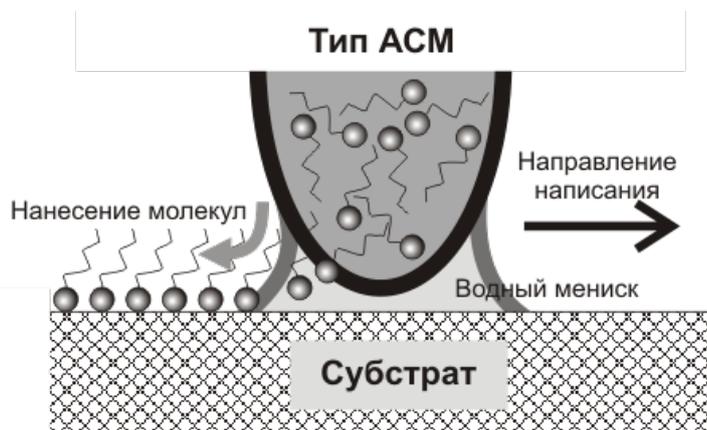
«Внизу много места...»
Р. Фейнман, 1959



Передовые нанотехнологии и аддитивные технологии

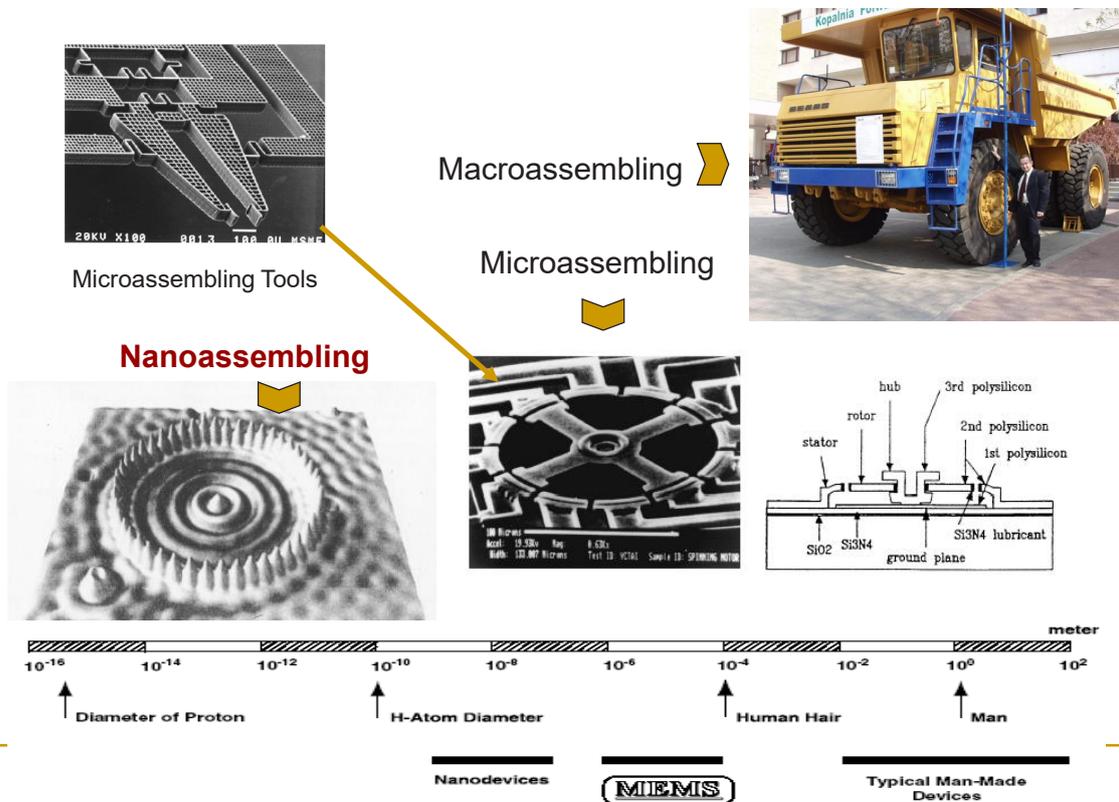


«...зондовая микроскопия,
эпитаксиальный рост пленок на поверхности,
процессы самосборки гетероструктур материала.»
Ж.И. Алферов, 1998



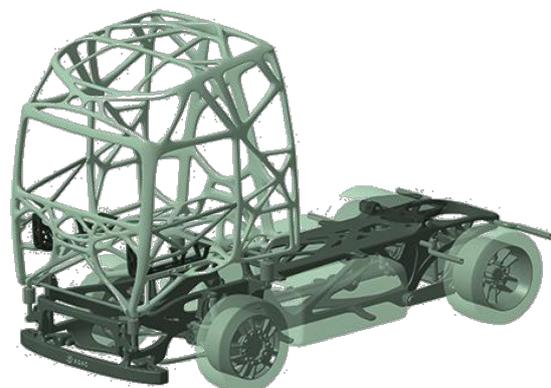
«Перьевая» (dip-pen) литография

Масштабные уровни сборки и самосборки изделий



Новые технологии – новые возможности

- Примерами успешного решения технологических проблем с использованием бионического дизайна и аддитивных технологий являются новые решения Airbus и Autodesk по снижению веса отдельных элементов гражданских самолетов, новые конструкции Toyota и Materialise для автомобилестроения, продукция холдинга «Вертолёты России», предлагающего детали с бионическим дизайном из алюминия и титана для многоцелевого вертолета, произведённые по аддитивным технологиям методом послойного спекания металлических порошков

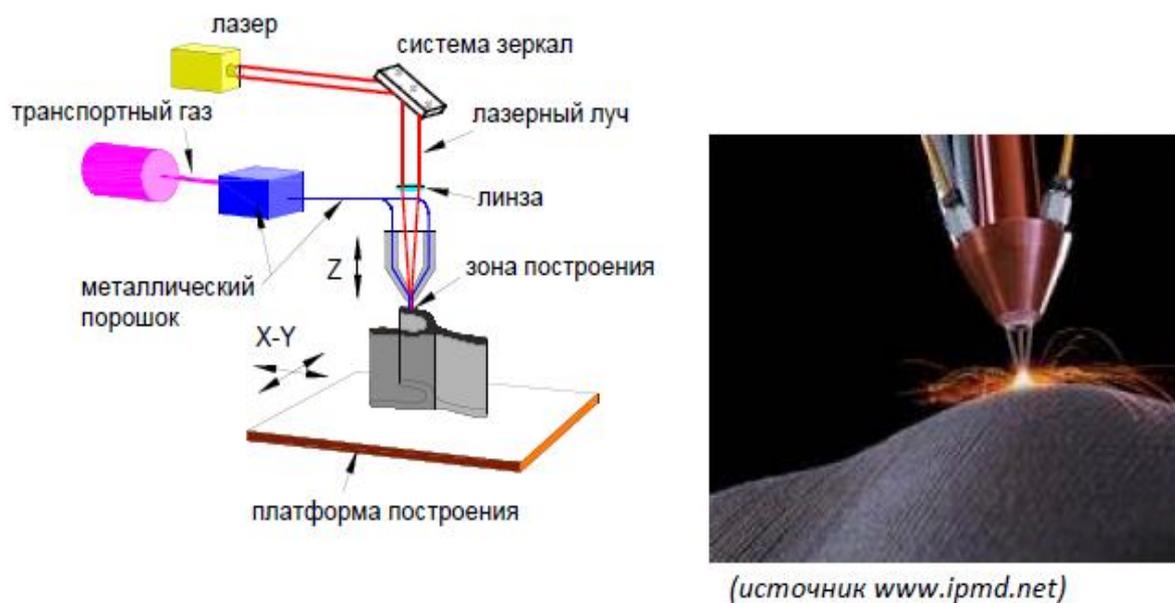


Типовая реализация схемы Bed Deposition



С помощью порошка формируют слой, а затем в этом слое выборочно отверждают «строительный» материал при неизменной плоскости построения, причем часть «строительного» материала остается в созданном слое нетронутой.

Типовая реализация схемы Direct Deposition



Технологические процессы аддитивного производства

- Классификация по ISO/ASTM 52900-15
- Разработки комитета ASTM (F42.91)

- 1. **Vat Photopolymerization** («фотополимеризация в ёмкости»).
- 2. **Material Jetting** («разбрызгивание материала» или «струйные технологии»).
- 3. **Material Extrusion** («выдавливание материала»).
- 4. **Powder Bed Fusion** («плавление материала в заранее сформированном слое»).
- 5. **Binder Jetting** («разбрызгивание связующего вещества»).
- 6. **Sheet Lamination** («соединение листовых материалов»).
- 7. **Directed Energy Deposition** («прямой подвод энергии непосредственно в место построения»).

Технологии послойного синтеза концентрированными потоками энергии

Анализ сущности и особенностей методов получения деталей машин без формообразующей оснастки:

- стереолитографией
(Stereolithography Application – SLA) 1984,

- послойным ламинированием из листового материала
(Laminated Object Manufacturing – LOM) 1985,

- селективным лазерным спеканием
(Selective Laser Sintering – SLS) 1986,

- послойным уплотнением материала
(Solid Ground Curing – SGC) 1987,

- непосредственным созданием литейных форм
(Direct Shell Part Creation – DSPC) 1989,

- послойной заливкой экструдированным расплавом
(Fused Deposition Modeling – FDM) 1990,

и другими процессами, позволяет рассмотреть частные и выделить общие принципы построения технологий послойного синтеза.

Процессы оперативного макетирования и производства изделий



Основные этапы методов послойного синтеза и сборки изделий

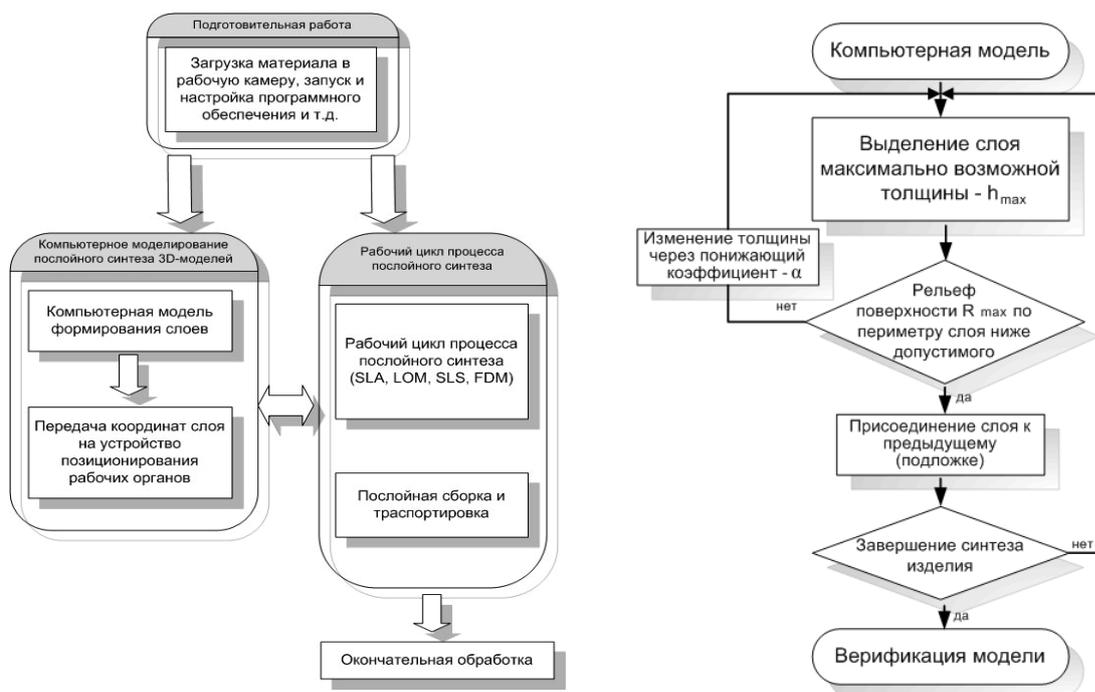
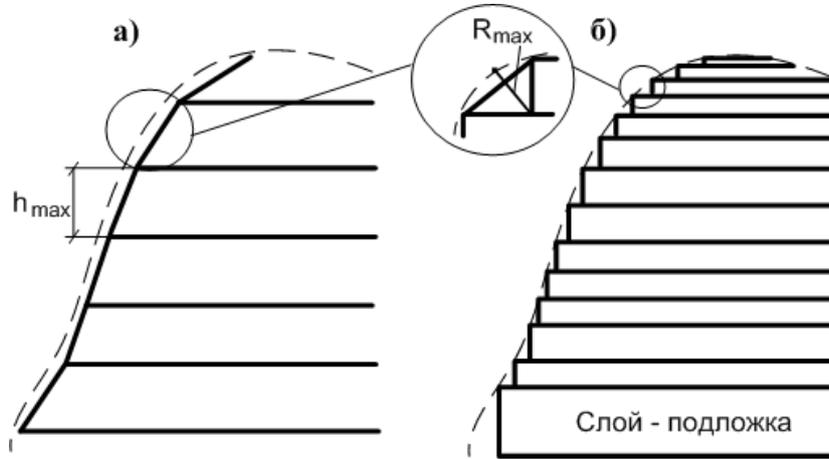
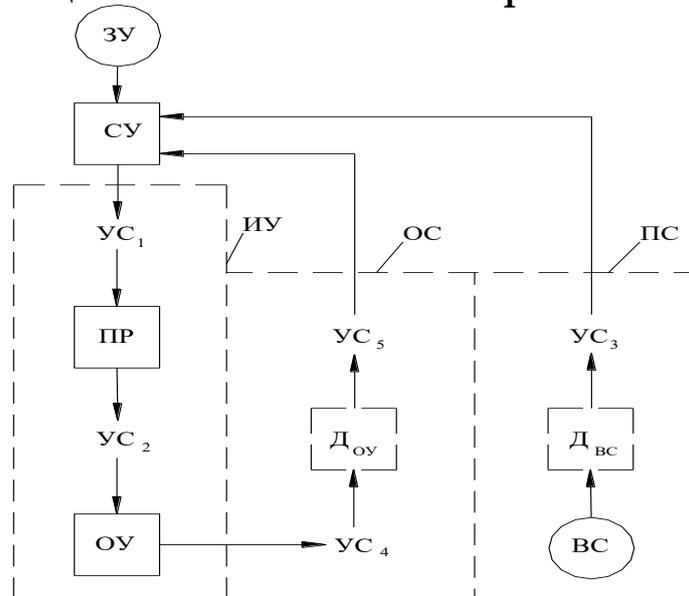


Схема разбиения изделия на слои



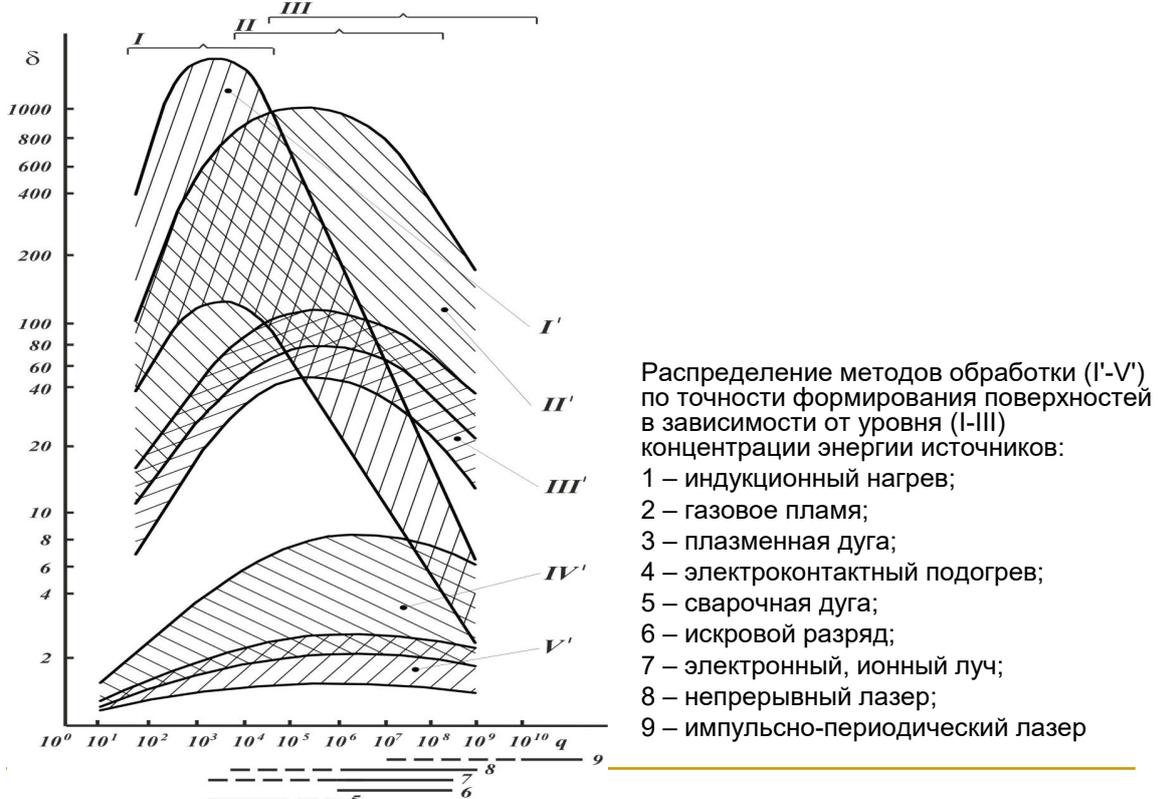
а – для LOM- и FDM-процессов; б – для SLA- и SLS-процессов

Принципиальная схема мехатронной системы

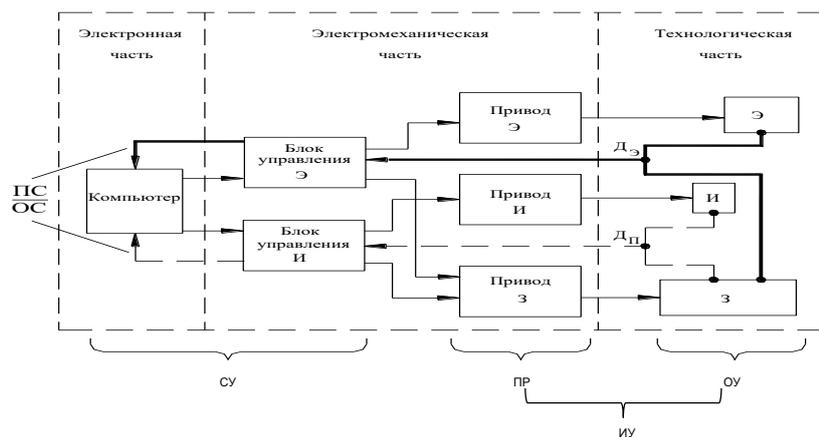


ИУ – исполнительные устройства; ОС – обратная связь; ПС – прямая связь;
 ЗУ – задание на управление; СУ – система управления; УС – устройство сопряжения;
 ПР – приводы; ОУ – объект управления; ДОУ – датчики состояния объекта управления;
 ДВС – датчики состояния внешней среды; ВС – внешняя среда

Концентрированные потоки энергии в процессах обработки

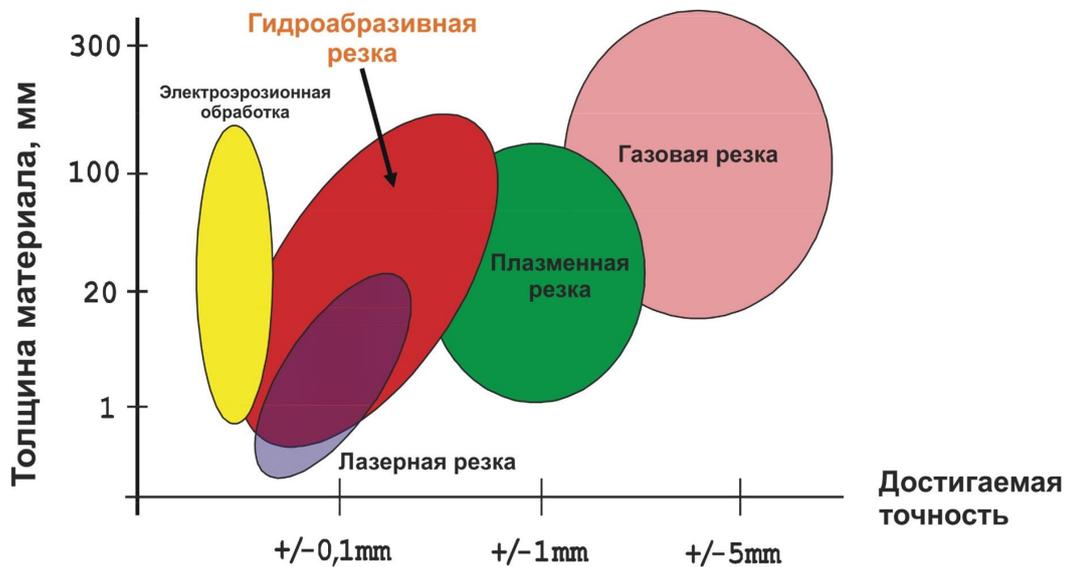


Структурная схема мехатронного технологического комплекса

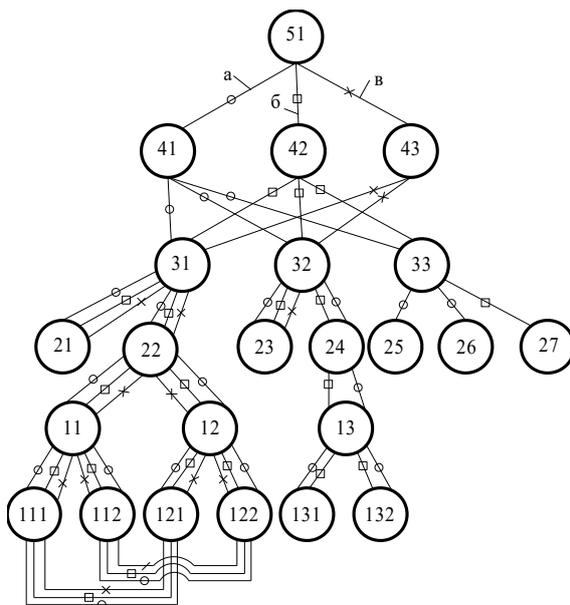


З – заготовка; И – инструмент; Э – концентрированный поток энергии;
 Дп – датчик перемещений; Дэ – датчик интенсивности потока энергии;
 СУ – система управления; ПР – приводы; ОУ – объект управления;
 ИУ – исполнительные устройства; ПС – прямая связь; ОС – обратная связь

Использование концентрированных потоков энергии в раскройном оборудовании



Графы кортежей комплекса для резки листового материала



- а – плазменный раскрой материала,
- б – гидроабразивная резка,
- в – лазерная резка
- 41 – технологический модуль плазменного раскроя материала,
- 42 – технологический модуль гидроабразивной резки,
- 43 – технологический модуль лазерной резки листового материала,
- 31 – рабочая функциональная система,
- 32 – вспомогательная функциональная система,
- 33 – обслуживающая функциональная система,
- 21 – система создания потока концентрированной энергии,
- 22 – система перемещения режущего рабочего органа,
- 11 – главное движение манипулятора (111 – поступательное, 112 – вращательное),
- 12 – главное движение режущей головки (121 – поступательное, 122 – вращательное)
- 23 – устройство автоматической загрузки листов,
- 24 – дополнительное оборудование механической обработки,
- 13 – главное движение инструмента (131 – поступательное, 132 – вращательное),
- 25 – фильтровентиляционная установка,
- 26 – компрессор с осушителем,
- 27 – система фильтрации отработанной воды.

Оборудование и методы атомно-силовой микроскопии



Нанотомография

«Tuning fork» микроскопия

Осциллирующая трибометрия

Моделирование поверхностей и контакта

Оборудования для контроля в субмикронной электронике

Наносверление

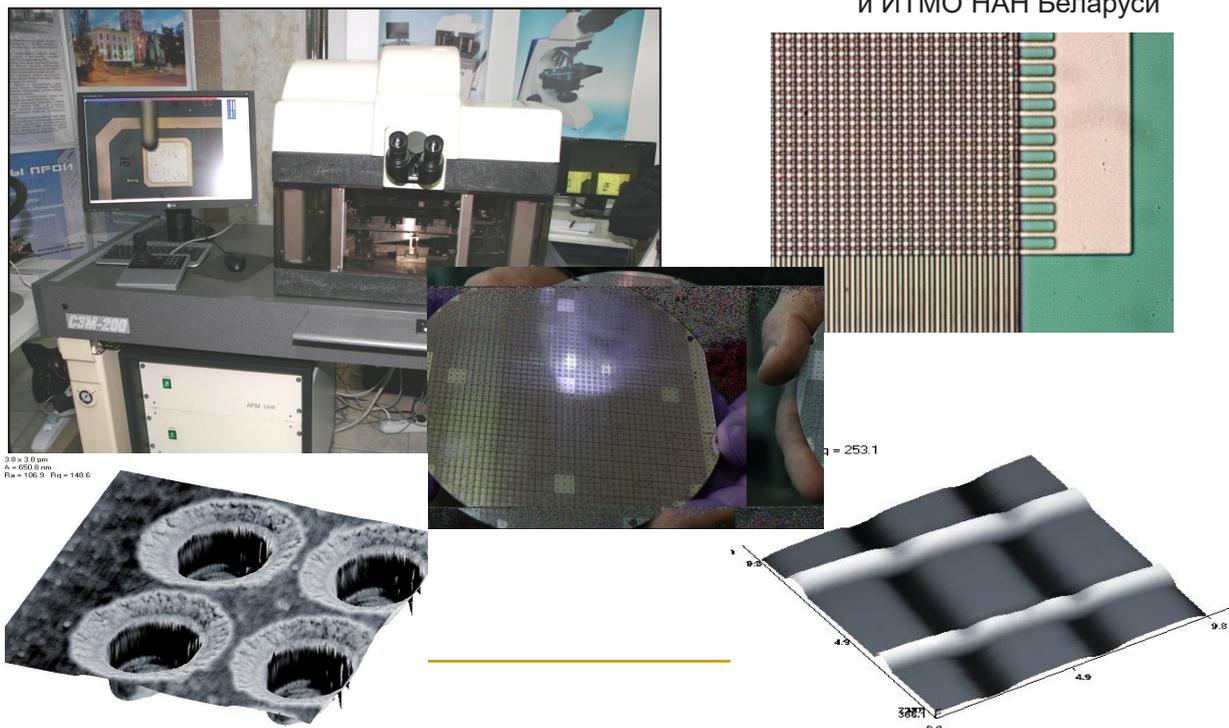
Динамическая силовая и латерально-силовая спектроскопия

Сшивка и совместный анализ многослойных изображений

Оборудование для наноконтроля живых биоклеток

Комплекс СЗМ-200 для контроля изделий субмикро- и наноэлектроники

Совместная разработка НПО «Планар» и ИТМО НАН Беларуси



3.6 x 3.0 μm
A = 150.0 nm
Ra = 100.9 Rq = 140.6

$R_a = 253.1$

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ

*Копейкина М.Ю., Лавриненко В.И. Институт сверхтвердых материалов
им. В.Н. Бакуля НАН Украины,*

*Майборода В.С. НТУ Украины «Киевский политехнический институт
имени Игоря Сикорского», Киев*

Акулович Л.М. Белорусский государственный аграрный технический университет

Лебедев В.Я. Физико-технический институт НАН Беларуси,

Худолей А.Л. Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси, Минск

Ведущая роль в интенсификации развития всех отраслей экономики принадлежит машиностроению, которое призвано обеспечить отрасли конкурентоспособными машинами для реализации технологий, направленных на снижение трудовых, материальных и энергетических затрат. Повышение конкурентоспособности производимой продукции является одной из важнейших задач современного машиностроения. Стремление производителей машиностроительной продукции поддерживать ее конкурентоспособность неизбежно приводит к повышению силовых и скоростных параметров машин, технологического оборудования и оснастки.

Возрастающие требования к надежности машин вызывают необходимость совершенствования технологических процессов их изготовления с применением новых финишных методов обработки. Обеспечение высокого качества поверхностей деталей машин технологическими способами является одной из актуальных задач современного машиностроительного производства.

Одним из параметров, характеризующих конкурентоспособность машин и механизмов, является надежность их работы, который всегда лимитируется той или иной деталью или сборочной единицей. Особенно это актуально, если лимитирующий узел работает в условиях воздействия агрессивных сред, без смазки, в контакте с частицами абразивных материалов и др. Поэтому актуальным является повышение ресурса работы деталей машин путем использования новых материалов и инновационных технологий. Обеспечение

надежности изделий с повышенными скоростными и силовыми характеристиками требует совершенствования технологических процессов, обеспечивающих качество поверхностей при их изготовлении. В условиях конкуренции качество продукции должно расти опережающими темпами, а это возможно обеспечить только на основе научных исследований формирования показателей качества различными технологическими методами.

Долговечность деталей во многом определяется состоянием поверхностного слоя, параметры которого формируются на протяжении всего технологического процесса изготовления и стадий эксплуатации машины. Научные исследования П.И. Ящерицына, А.М. Дальского, Э.В. Рыжова, В.М. Смелянского, их коллег и учеников, а также производственная практика показали, что при правильно назначенных режимах обработки на заключительных стадиях технологического маршрута, устраняющих накопленные дефекты на предшествующих операциях, можно значительно увеличить долговечность деталей машин [1].

Современные процессы лезвийной обработки обеспечивают возможность производительного формообразования изделий из различных конструкционных материалов с широким спектром механических свойств, обеспечивая при этом требуемое качество обработанной поверхности. Созданный во второй половине прошлого века класс синтетических сверхтвердых материалов, их бурное развитие в настоящее время позволили разработать режущие инструменты, обеспечи-

вающие финишную обработку деталей из абразивосодержащих полимерных композитов, цветных сталей и сплавов, кремния и германия, закаленных сталей (рис. 1) и высокотвердых чугунов, жаропрочных сплавов и многих других материалов [2].

Среди финишных методов доминирует абразивная обработка, которая нередко является единственно возможным способом обеспечения требуемого качества поверхности деталей. При финишной абразивной обработке важнейшим фактором является возможность управлять контактным взаимодействием частиц абразивного порошка с обрабатываемой поверхностью заготовки. Для этого создаются абразив-содержащие композиты со специальным комплексом физико-механических свойств и инструменты на их основе (рис. 2). Современные алмазно-абразивные инструменты позволяют производительно и с высоким качеством обрабатывать изделия из различных труднообрабатываемых конструкционных материалов, позволяя использовать их в машинах и механизмах, обеспечивая длительный срок эксплуатации и высокую эффективность.

Технологии финишной обработки свободным абразивом в жидкой смазывающей охлаждающей технологической среде и методы управления магнитным полем этой средой в процессах обработки впервые разработаны в Беларуси и на начальных этапах получили наиболее значимое развитие в России и Украине. Магнитно-абразивная обработка (МАО) была предложена Г.С. Шулевым и Е.Г. Коноваловым и непрерывно совершенствовалась Ф.Ю. Сакулевицем, Л.М. Кожуро, Н.Я. Скворчевским, Ю.М. Бароном, И.А. Сенчило и многими другими.

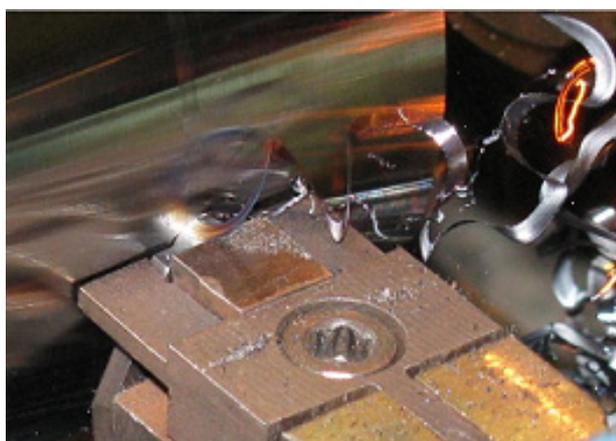


Рис. 1. Обработка детали из закаленной стали резцом с рабочей частью из сверхтвёрдого композита «борсинит»



Рис. 2. Алмазно-абразивные инструменты

Магнитно-абразивная обработка совмещает достоинства процессов резания, электроэрозионной и электрохимической обработки [4]. Для ее реализации не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править. Процесс протекает без прямого контакта инструмента с заготовкой. Под действием магнитного поля частицы незакрепленного абразива ориентируются наибольшей осью перпендикулярно обрабатываемой поверхности. В результате частицы незакрепленного абразива под действием магнитного поля по мере износа переориентируются в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, а процесс микрорезания производится постоянно-обновляющимися острыми кромками (рис. 3).

Разработка магнитореологического полирования начиналась З.П. Шульманом, В.И. Кордонским, Л.К. Глебом, Г.Р. Городкиным и другими, и на настоящий момент, несмотря на повсеместное распространение этой технологии, в Беларуси ведущий центр по производству оборудования.

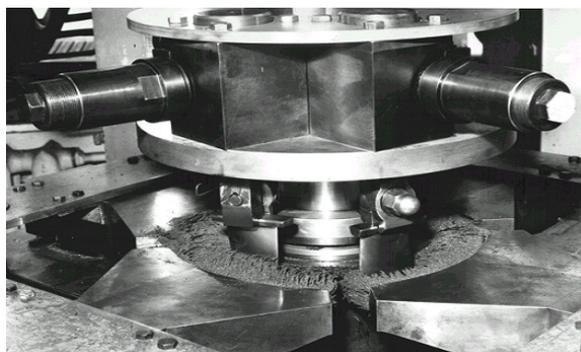


Рис. 3. Установка для МАО лопаток ГТД

Магнитореологическое полирование, используемое в качестве среды магниточувствительные неколлоидные жидкости, является одним из наиболее перспективных направлений прецизионной обработки поверхностей [5]. В его основе лежит эффект левитации немагнитных тел в магнитной жидкости (рис. 4). Магниточувствительную жидкость, в которую вводят частицы абразивного материала, помещают в зону обработки и воздействуют на нее неоднородным магнитным полем с градиентом, направленным от поверхности обрабатываемой детали. Частицы абразивного наполнителя, испытывая магнитное давление, всплывают к движущейся поверхности полируемой детали и прижимаются к ней.

Перспектива методов финишной обработки поверхностей изделий сопряжена со стабилизацией параметров ориентированного абразивного резания и полирования при обработке различных участков. Для этого необходимо решать проблемы управления формообразующими параметрами рабочих технологических сред и целенаправленно изменять давление частиц порошка на обрабатываемую поверхность. При этом, нужно понимать, что набор технологий финишной обработки в каждом случае обусловлен требованиями к обрабатываемой детали с учетом того, что параметры состояния поверхностного слоя, сформированные на предыдущей операции, являются для последующей операции такими же технологическими факторами, как и условия формообра-

зования – режимы резания, параметры физико-технического воздействия, наличие технологической среды и т.д.

Основа для разработки новых и совершенствования существующих технологий – изучение процессов обработки, как с точки зрения создания материалов для инструментов и самих инструментов, исходя из понимания закономерностей в зоне обработки, так и управления закономерностями процесса обработки для обеспечения высокой производительности, длительной работоспособности инструмента, ресурсосбережения, состояния поверхностного слоя на основе представлений о структуре и свойствах инструментального и обрабатываемого материалов, изучение их неизбежной трансформации и структурной приспособляемости под воздействием термобарических факторов, сопровождающих процесс формообразования деталей.

Современные технологии механической и физико-технической обработки – неотъемлемая часть промышленного производства, потенциальные возможности которых изучены и используются недостаточно. В процессе обработки можно, зная основные закономерности протекающих в зоне обработки процессов, не только сохранить свойства обрабатываемых материалов, и, используя принципы технологического обеспечения качества и технологической наследственности, усилить их, обеспечивая тем самым требуемые свойства деталей машин.

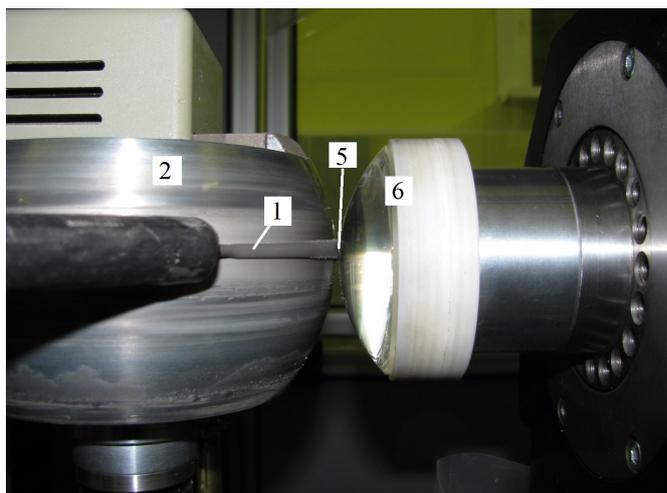
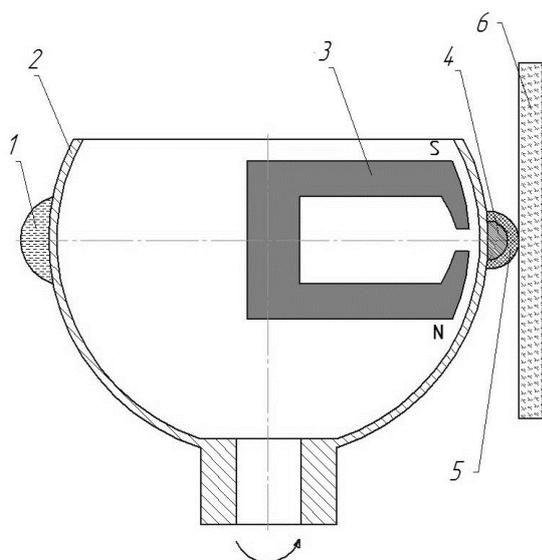


Рис. 4. Схема модуля полирования:

1 – жидкость вне действия магнитного поля; 2 – опорная поверхность; 3 – магнитная система; 4 – жидкость в магнитном поле; 5 – абразив; 6 – обрабатываемая деталь

Совершенствование технологий механической и физико-технической обработки нуждается в объединении материаловедческих представлений об эффективных структурах и оптимальных свойствах инструментальных и обрабатываемых материалов с развитием представлений о закономерностях процессов вдавливания припуска и формообразования. Основу такого подхода составляют современные знания о механике, теплофизике, кинетике, термодинамике и физикохимии контактного взаимодействия в зоне обработки с учетом действия окружающей среды. Они базируются на положениях теории резания, высокотемпературного структурообразования, вычислительной термодинамики, представлениях о возможностях управления технологическими параметрами, диагностики *in situ*, анализе состояния поверхностного слоя обработанных изделий. К анализу целесообразно привлечь современные синергетические представления о сложных процессах в открытых системах.

Количественное описание текущего физико-химического и механического состояния инструментального и обрабатываемого материалов в

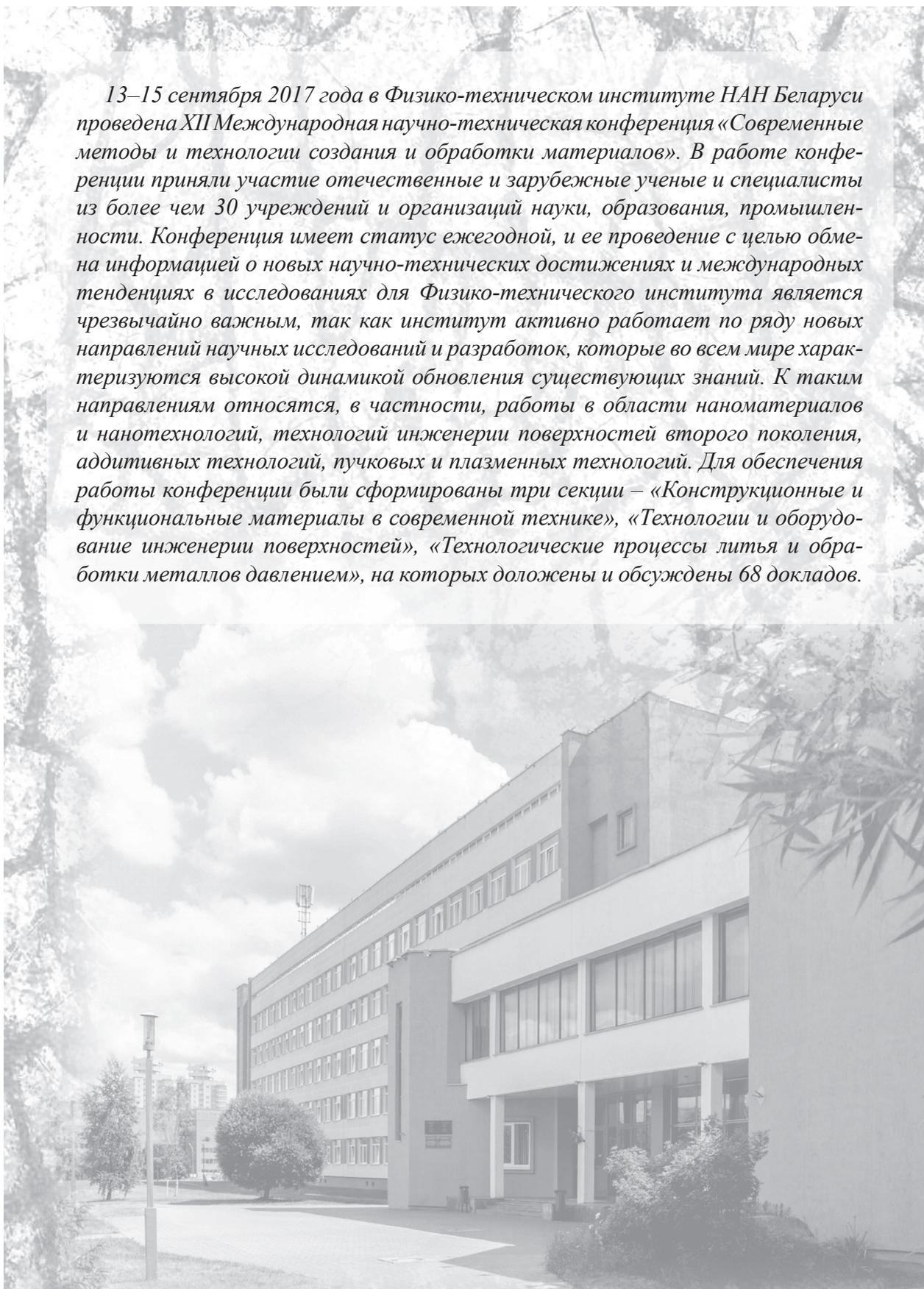
контактной зоне для конкретных условий процесса обработки, изучение эволюции и возможности трансформации поверхностей инструмента в контактной зоне под действием термобарических условий, характерных для каждой конкретной технологии формообразования, составляют фундаментальную основу совершенствования рабочих инструментов и процессов механической и физико-технической обработки, используется в мотивации выбора или создания инструментальных материалов, конструкций инструментов.

Знание основных закономерностей процессов, имеющих место в зоне обработки, с учетом принципов технологического обеспечения качества и технологической наследственности, позволяет использовать в деталях машин самые современные конструкционные материалы с высокими потенциальными свойствами, формировать в поверхностном слое деталей требуемое состояние, обеспечивая тем самым их эксплуатационные свойства. Для этого, прежде всего, нужно рассматривать проблему создания технологий механической и физико-технической обработки как актуальную задачу современного материаловедения.

Список использованных источников

1. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / Под общ. ред. П.А. Витязя. – Мн.: Беларус. наука, 2010. – 110 с.
2. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под. ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
3. Лавриненко, В.И. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки / В.И. Лавриненко, В.Ю. Солод. – Каменское: ДГТУ, 2016. – 529 с.
4. Акулович, Л.М. Основы профилирования режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2014. – 279 с.
5. Высокоточная обработка поверхностей материалов с использованием магнитореологических жидкостей / А.Л. Худoley [и др.] // Наука и инновации. – 2015. – № 6. – С. 20–23.

13–15 сентября 2017 года в Физико-техническом институте НАН Беларуси проведена XII Международная научно-техническая конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». В работе конференции приняли участие отечественные и зарубежные ученые и специалисты из более чем 30 учреждений и организаций науки, образования, промышленности. Конференция имеет статус ежегодной, и ее проведение с целью обмена информацией о новых научно-технических достижениях и международных тенденциях в исследованиях для Физико-технического института является чрезвычайно важным, так как институт активно работает по ряду новых направлений научных исследований и разработок, которые во всем мире характеризуются высокой динамикой обновления существующих знаний. К таким направлениям относятся, в частности, работы в области наноматериалов и нанотехнологий, технологий инженерии поверхностей второго поколения, аддитивных технологий, пучковых и плазменных технологий. Для обеспечения работы конференции были сформированы три секции – «Конструкционные и функциональные материалы в современной технике», «Технологии и оборудование инженерии поверхностей», «Технологические процессы литья и обработки металлов давлением», на которых доложены и обсуждены 68 докладов.



УДК 666.3:681.9

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИКИ: ПЕРСПЕКТИВЫ И ОПЫТ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

¹М.М. Киселев, ²В.И. Путляев, ²П.В. Евдокимов, ¹М.А. Вартамян

¹Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева,
г. Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Москва, Россия

Обсуждаются современные технологии послойного создания трехмерных объектов (аддитивные технологии). На примере лабораторной технологии биокерамики из фосфатов кальция рассмотрена возможность их применения для получения керамических изделий сложной формы.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, горячее литье, фосфаты кальция

ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES IN CERAMICS PRODUCTION: PROSPECTS AND PRACTICAL EXPERIENCE

¹M.M. Kiselev, ²V.I. Putlyayev, ²P.V. Evdokimov, ¹M.A. Vartanyan

¹D.Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The paper describes present techniques for layered 3D-objects production (additive manufacturing processes). Possible applications of these processes in manufacturing of complex-shape ceramic items are discussed based on a laboratory technique for calcium phosphate bioceramics production.

Keywords: additive technologies, 3D-printing, hot casting, calcium phosphates

E-mail: mariavartanyan@mail.ru

Технологии формирования трехмерных объектов путем постепенного наращивания (добавления) материала или изменения фазового состояния вещества в заданной области пространства получили интенсивное развитие с 1980-х гг. Эти технологии получили название аддитивных, в отличие от субтрактивных технологий производства, подразумевающих удаление вещества из заготовки [1]. Аддитивное производство нашло свое

применение в тех отраслях промышленности, где реализуется принцип «сжатых сроков разработки» (Time-Compression Engineering) — атомной индустрии, авиационной и аэрокосмической области, медицине и приборостроении, — и где характерным является производство изделий сложной формы, которые не могут быть изготовлены с помощью традиционных производственных технологий, либо необходимы в малых объемах [2, 3].

Суть аддитивных технологий заключается в соединении материалов для создания объектов из данных 3D-модели слой за слоем. На данный момент значительного прогресса достигли методики послойного формирования трехмерных объектов по их компьютерным образам, также известные как «быстрое прототипирование» (Rapid Prototyping) или фаббер-технологии [4]. Аддитивные технологии классифицируют по используемым материалам (жидким, сыпучим, полимерным, металлопорошковым); по наличию лазера; по способу фиксации слоя построения (тепловое воздействие, облучение ультрафиолетом или видимым светом, связующим составом); также предложена классификация по способу образования слоя [4, 5]:

- 1) экструзия (метод моделирования наплавлением; робокастинг);
- 2) фотополимеризация (метод лазерной стереолитографии);
- 3) формирование слоя на выровненном слое порошка (электронно-лучевая плавка; селективное лазерное спекание; селективное термическое спекание; прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering));
- 4) подача проволочного материала (метод электронно-лучевого свободного формования (Electron-Beam Freeform Fabrication));
- 5) ламинирование;
- 6) точечная подача порошка (метод направленной подачи энергии (Directed Energy Deposition));
- 7) струйная печать (3D-печать; метод многоструйного моделирования).

При анализе аддитивных технологий, выбирая в качестве критерия характеристики системы, предназначенной для формования, следует выделить два подхода: формование из дисперсных систем «твердое – газ» (порошок) и «твердое – жидкость» (суспензия). Для консолидации систем первого типа применяют (лазерное) спекание или вводят жидкость затворения, что вызывает протекание реакций химического связывания. Процессы, обеспечивающие консолидацию систем второго типа, определяются составом суспензии или природой жидкости — дисперсионной среды, при этом завершение консолидации происходит в результате спекания при обжиге. Аддитивные схемы получения изделий из неорганических материалов с регулярной пористостью или заданной морфологической архитектурой можно разделить на три группы [6]:

- 1) изготовление сложной полимерной формы,

являющейся прототипом порового пространства заданной геометрии (методами термоэкструзионной печати, стереолитографической печати или с использованием лазерного спекания);

- 2) изготовление неорганического материала из порошка в результате консолидации вследствие протекания реакции химического связывания (с использованием порошкового принтера);

- 3) изготовление полуфабриката, консолидация которого обеспечивается воздействием на компоненты временного технологического связующего, удаляемого в дальнейшем при термообработке (методами стереолитографической печати из суспензий, содержащих мономер и неорганический порошок, или робокастинга (печати из высококонцентрированных суспензий с использованием экструзии)).

Формование керамических деталей непосредственно методами быстрого прототипирования имеет существенные ограничения. Наиболее распространенный метод включает в себя последовательное нанесение связующего вещества на слой сыпучих керамических частиц для прецизионного формования керамического объекта (3D-печать). Объект, полученный таким способом, как правило, является пористым, поскольку частичная упаковка свободных частиц ограничена. Пористость также появляется в результате послойного дотраивания, используемого в большинстве подобных способов, в частности тех, которые опираются на применение липких слоев для связывания частиц порошка в единое целое. Плотность упаковки частиц может быть увеличена с помощью вибрационной обработки или тщательного подбора гранулометрического состава, но этот процесс довольно сложно контролировать. Кроме того, мелкие частицы способствуют появлению пыли, которая может стать причиной проблем с оборудованием. Керамика, произведенная с помощью 3D-печати, зачастую требует последующей обработки, чтобы изделие имело необходимую плотность [7]. Следует отметить, что для материалов, консолидация которых осуществляется путем спекания, особую важность приобретает подбор связующего вещества, с тем, чтобы обеспечить его полное удаление при обжиге без разрушения заготовок.

Альтернативным способом получения изделий из керамики является применение аддитивных технологий для изготовления полимерных форм и прототипов порового пространства с заданной геометрией для технологии шликерного литья, подобный подход обсуждается в работах [7, 8]. Его несомненным достоинством, по срав-

нению с существующими приемами (литье из водных шликеров в гипсовые и полимерные формы, литье термопластичных шликеров (горячее литье) в обогреваемые металлические формы), является возможность создавать полностью неразъемную «жертвенную» форму, удаляемую путем растворения либо при обжиге, что существенно расширяет доступную геометрию изделий. В процессе печати такой формы могут быть запроектированы и выполнены любые необходимые технологические элементы (каналы для подачи теплоносителя, ребра жесткости и пр.).

В настоящей работе выполнена оценка возможности создания методом 3D-печати модельной формы для горячего литья остеокондуктивной керамики сложной формы из фосфатов кальция (октакальциевого ОКФ и трикальциевого ТКФ). В качестве рабочих использовали модели в виде тиглей, имевших в днище отверстия различного диаметра (0,5–3,0 мм с шагом 0,5 мм), а также ретикулированный вариант структуры Кельвина, представляющей собой объемноцентрированную кубическую решетку из усеченных октаэдров (рис. 1 а и б). Отверстия малого диаметра зачастую получались несквозными, поэтому перед заполнением формы прочищали.

Предварительно разработанные трехмерные модели форм распечатывали на принтере-экструдере. Через раздаточную головку на охлаждаемую платформу-основу подавали капли разогретого термопластика, которые быстро застывали и слипались друг с другом, формируя слой будущего объекта. При этом головка совершала движение по двум координатам, заполняя термопла-

стом сечение создаваемого образца (рис. 1). При работе данного принтера использовали проволоку из термопластичного полимерного материала.

Для приготовления шликера применяли синтезированный в лаборатории фосфат кальция (ФК) определенной модификации (ТКФ или ОКФ), а также парафин в качестве дисперсионной среды. Синтез фосфатов кальция заданной модификации осуществляли в соответствии с методиками, описанными в работах [9, 10], с использованием 4-водного нитрата кальция ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) и гидрофосфата аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$). Кроме того, для улучшения смачивания твердых частиц парафином, особенно при приготовлении высококонцентрированных композиций, в шликер добавляли поверхностно-активные вещества (ВУК W 969, ВУК Additives&Instruments; олеиновая кислота) в соотношении ПАВ : ФК = 1 : 100 по массе.

На основе ТКФ готовили композиции с объемной долей твердой фазы 30, 40 и 50 %. Это связано с тем, что недостаточное количество твердой фазы может привести к чрезмерной усадке при обжиге, а слишком большое — к плохому смешению твердой и жидкой фазы, что в свою очередь ухудшит литьевые свойства шликера. В силу того, что структура ОКФ не позволяет создать устойчивый шликер с высоким содержанием твердой фазы, использовали композицию с наибольшим возможным содержанием твердой фазы без потери литьевых свойств, содержание ОКФ в полученном шликере составляло 9–10 об.%. В процессе приготовления шликеры термостатировали при температуре около 70 °С для поддержания парафина в жидком состоянии.

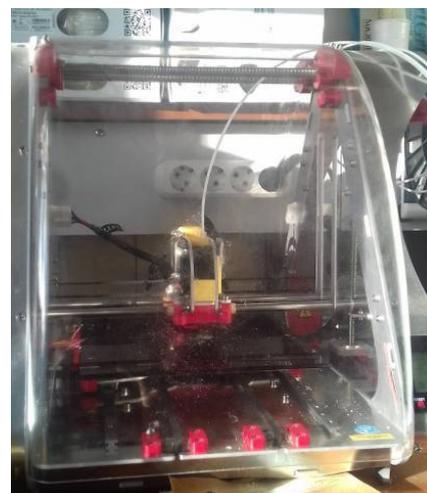
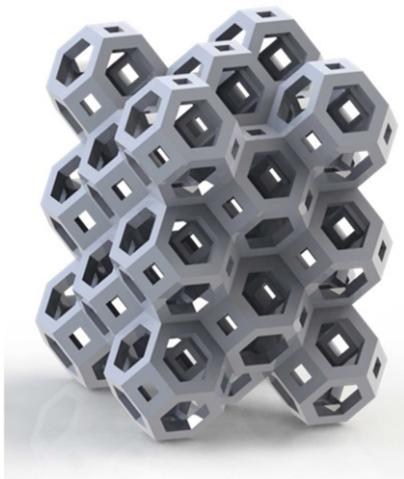


Рис. 1. Модельные формы для горячего литья:
а — тигли; б — структура Кельвина (по [6])

Рис. 2. Установка для печати модельных форм

Изделия сложной формы получали на лабораторной установке на базе контрпресса модели Corver Model C. При формовании образцов изменяли следующие параметры:

- температура литья (60–80 °С с шагом 10 °С);
- давление прессования (8 и 14 МПа);
- состав и соотношение компонентов в шликере: полиморфная форма ФК, содержание твердой фазы, наличие и вид ПАВ.

Обжиг образцов проводили по описанному в работе [11] режиму, подобранному с учетом данных термогравиметрического анализа, при температуре 1100 °С с выдержкой 3 ч. Первоначально образцы обжигали вместе с формами, предполагая, что при обжиге произойдет удаление полимера, так же как и парафина. Однако в результате разрушения формы нарушалась целостность образца, поэтому в ходе дальнейшей работы формы перед обжигом удаляли органическим растворителем. В качестве растворителя были рассмотрены полярная и неполярная жидкости (ацетон и гептан соответственно), продолжительность выдержки заготовок составила от 1 ч до 1 сут. Установлено, что в результате выдержки в гептане происходило разрушение образцов за счет частичного вымывания парафина. Полное удаление формы было достигнуто после выдержки образцов в ацетоне в течение суток. Внешний вид обожженных образцов показан на рис. 3.

По результатам оценки воспроизводимости заданной формы изделий, а также исходя из данных о величине линейной усадки обожженных материалов можно заключить, что при использовании «жертвенных» полимерных форм наибольшее значение среди рассмотренных технологических факторов имеют полиморфная форма ФК и содержание твердой фазы (шликеры на основе ТКФ). Так, образцы, полученные на основе ТКФ, имели заметно большее число дефектов по сравнению с таковыми из ОКФ, особенно для форм в виде тиглей с отверстиями (рис. 3). Образцы, отлитые из шликеров с содержанием ТКФ 30 и 40 об. %, разрушались при обжиге, причем чем ниже содержание твердой фазы, тем меньше был выход обожженных изделий. В то же время спекшиеся образцы на основе ОКФ, четко воспроизводящие заданную форму, удалось получить из шликеров, содержащих 10 об. % твердой фазы.

Следует отметить, что основным явлением, влияющим на качество керамического изделия, является так называемая пресс-фильтрация — нарушение сплошности отливки за счет локального фазового разделения, вследствие чего про-



Рис. 3. Образцы керамики на основе ТКФ (слева) и ОКФ (справа)

исходит «закупоривание» поперечного сечения формы дисперсной фазой и выдавливание дисперсионной среды наружу. Это явление возникает при определенных скоростях сдвига шликера и, следовательно, определяется величинами усилия при формовании, а также вязкости шликера. Эти характеристики сложным образом зависят от температуры, давления и скорости формования; физико-химических свойств шликера (доли дисперсной фазы, распределения ее частиц по размерам, агрегативной устойчивости шликера), геометрии формы для литья. Так, полученная величина линейной усадки образцов, отформованных при давлении 14 МПа и температуре 80 °С, практически совпадает с таковой образцов, отформованных при 8 МПа и 60 °С (13,5 и 12,8 % соответственно). Вид используемого ПАВ также практически не влияет ни на литьевые свойства шликеров, ни на свойства конечных изделий.

Заключение

1. Применение аддитивных технологий в производстве керамики дает возможность существенно сократить количество технологических операций при формовании, а, следовательно, уменьшить продолжительность изготовления изделия, создавать изделия сложной геометрической структуры. Технологии послойного нанесения предусматривают возможность внесения оперативных изменений на этапе проектирования, а также значительное снижение производственных отходов на этапе формования, также отпадает необходимость в проектировании форм и штампов.

2. Реализация методами аддитивных технологий вспомогательных функций при использовании традиционных приемов формования (шликерного литья) существенно расширяет доступ-

ную геометрию изделий, давая возможность создавать полностью неразъемную «жертвенную» форму, удаляемую путем растворения либо при обжиге. При этом характеристики получаемых изделий зависят только от параметров процесса формования.

3. Использование форм из растворимых полимеров открывает возможность для возврата материала формы в технологический цикл, тем самым уменьшая нагрузку на окружающую среду и способствуя повышению ресурсоэффективности производства изделий из керамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mota, C. et al. Additive Manufacturing Techniques for the Production of Tissue Engineering Constructs / Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine, 2012, DOI: 10.1002/term.1635.
2. Шишковский, И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий / И. В. Шишковский. — Москва: Физматлит, 2009.
3. Duc-Truong Pham, Dimov, S. Rapid Prototyping. A Time Compression Tool / Ingenia, 2003, iss. 17, P. 43–48.
4. Слюсар, В. И. Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования / Электроника: наука, технология, бизнес / В. И. Слюсар. — 2003, № 5. — С. 54–60.
5. Chua C. K., Leong K. F., Lim C.-S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd Edition / World Scientific Pub Co, 2010.
6. Ievlev, V. et al. Additive Technologies for Making Highly Permeable Inorganic Materials with Tailored Morphological Architectonics for Medicine / Inorganic Materials, 2015, vol. 51, iss. 13, pp. 1295–1313. DOI: 10.1134/S0020168515130038.
7. Deisinger, U. Generating Porous Ceramic Scaffolds: Processing and Properties / Key Engineering Materials, 2010, vol. 441, pp. 155–179.
8. Крахматова, В. Ю. Формовочные массы для аддитивного производства керамических изделий / В. Ю. Крахматова, А. И. Захаров. — Успехи в химии и химической технологии. — 2016. Т. 30, № 7 (176). — С. 53–54.
9. Putlyaev, V. et al. Features of Octacalcium Phosphate Thermolysis / Refractories and Industrial Ceramics, 2014, vol. 54, no. 5, pp. 420–424. DOI: 10.1007/s11148-014-9624-0.
10. Safronova, T. et al. Calcium Phosphate Powders Synthesized from Solutions with $[Ca^{2+}]/[PO_4^{3-}] = 1$ for Bioresorbable Ceramics / Central European Journal of Chemistry. 2009. vol. 7, no. 2, pp. 184–191. DOI: 10.2478/s11532-009-0016-0.
11. Евдокимов, П. В. Двойные фосфаты $Ca_{(3-x)}M_{2x}(PO_4)_2$ ($M = Na, K$) как основа макропористой биокерамики со специальной архитектурой. Дисс. к.х.н. — Москва: МГУ, 2015.

УДК 621.791.16

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА ПОЛИМЕРОВ

В.В. Клубович, В.А. Клушин, В.И. Марусич, Е.В. Хрущёв
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Приводятся результаты исследований возможности ультразвуковой сварки некоторых полимерных материалов, изготавливаемых в Республике Беларусь и Российской Федерации. Установлено влияние увеличения шероховатости поверхности свариваемых поверхностей на качество сварного соединения за счет концентрации напряжений в зоне сварки.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, полимер, свариваемость, технологические режимы, шероховатость

ULTRASONIC POLYMER WELDING

V.V. Klubovich, V.A. Klushin, V.I. Marusich, E.V. Khrushchov
Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus

The results of investigations of the possibility of ultrasonic welding of some polymer materials manufactured in the Republic of Belarus and the Russian Federation are presented. The effect of an increase in the surface roughness of the welded surfaces on the quality of the welded joint due to stress concentration in the weld zone is established.

Keywords: ultrasonic welding, polymer, weldability, technological regimes, roughness

E-mail: nil_p@bntu.by

Ультразвуковая сварка (УЗС) полимеров — это один из наиболее перспективных способов получения неразъемных соединений, получивший в последние годы большое развитие, как в нашей стране, так и за рубежом.

С помощью ультразвука можно сваривать как однородные, так и разнородные материалы различной толщины. Свариваемость отдельных видов полимерных материалов зависит от физико-механических свойств материалов, от содержания в них наполнителей, а также от размеров свариваемых заготовок, способа их изготовления и др. Оптимальное время сварки для каждого вида изделия определяется при отработке технологических режимов. Время ультразвукового воздействия от долей секунды до нескольких секунд.

При УЗС полимеров электрические колебания ультразвуковой частоты, вырабатываемые генератором, преобразуются в механические колебания

сварочного инструмента — волновода и вводятся в свариваемый материал, при этом часть энергии механических колебаний переходит в тепловую энергию локальной направленности, происходит нагрев зоны контакта свариваемых деталей до температур вязкотекучего состояния.

Вначале сварки образуется физический контакт поверхностей и происходит активация полимерных молекул за счет разрыва химических связей, затем начинается химическое взаимодействие соединяемых материалов, переходящее в объемное взаимодействие в зоне соединения. При температурах высокоэластичного состояния полимера происходит диффузия отдельных сегментов макромолекул свариваемых полимеров, а в некоторых случаях — и перемешивание вязкотекучего полимерного материала. При соединении двух термопластов различных марок возникают химические превращения.

Основной целью настоящих исследований являлось установление возможности сваривания группы полимерных материалов (табл. 1), изготавливаемых в Республике Беларусь и Российской Федерации. Определение оптимальных режимов УЗС полимеров одной марки, в том числе с разной шероховатостью поверхности, полимеров разных марок одного класса и разнородных полимеров.

Предметом исследования были образцы в виде пластин с поперечным сечением 10×4 мм и длиной 100 мм, полученных экструзией из расплава следующих полимеров: полиэтилены низкой и высокой плотности (ПЭНП и ПЭВП, соответственно), полипропилен (ПП), полиамиды (ПА6 и ПА66) и полиэтилентерефлат (ПЭТ).

Одним из критериев свариваемости разнородных термопластов является их совместимость по акустическим свойствам. Акустические свойства полимерных материалов определяются их механическими свойствами, такими как: плотность, вязкость, модуль упругости и коэффициентом затухания (погашения) колебаний.

В зависимости от вязкоупругих свойств различают жесткие, полужесткие и мягкие пластмассы.

Жесткие пластмассы — это твердые, упругие материалы аморфной структуры, имеющие

модуль упругости более 1–10 ГПа. Они хрупко разрушаются с незначительным удлинением при разрыве. Примерами жестких пластмасс являются фенопласты, аминопласты, глифталевые полимеры. В нашем случае к жестким пластмассам относится полиэтилентерефлат.

Полужесткие пластмассы — это твердые вязкоупругие материалы кристаллической структуры, имеющие модуль упругости более 400 МПа и высокое относительное удлинение при разрыве. Остаточные деформации их обратимы и полностью исчезают при нагревании. Примерами служат полипропилен и полиамиды.

Для мягких пластмасс характерны низкий модуль упругости (20...100 МПа) и высокое относительное удлинение при разрыве. Остаточные деформации обратимы и медленно исчезают при нормальной температуре. К таким пластмассам относятся поливинилацетат, полиэтилен и др.

Для сравнительной оценки акустических свойств полимерных материалов выполняли расчеты скоростей и интенсивности распространения продольных волн (табл. 1), а также оценили влияние механических свойств материалов и параметров колебательной ультразвуковой системы на затухание (погашение) колебаний по рекомендациям авторов [1, 2].

Табл. 1

Физико-механические характеристики исследуемых полимеров

Полимер	Сокр. назв. Марка	$T_{пл.}, ^\circ\text{C}$	Плотность, ρ , кг/м ³	Вяз-кость, кДж/м ²	$E, 10^3$ МПа	Скор. распр. волн c , м/с	Интенсив. звуковых колебаний I , Вт/см ²	Производитель
Полиэтилен низкой плотности	ПЭНП 109	109 102–105	920 910–930	—	0,2 0,15–0,24	150	61	Полимир, ОАО «Нафтан»
Полиэтилен высокой плотности	ПЭВП 277	127 125–138	950 940–960	—	0,8 0,55–1,0	293	122	ОАО «Ставролен», РФ
Полипропилен	ПП 21030	165 165–170	910 900–920	—	1,5 1,2–1,7	410	164	Уфа оргсинтез
Полиамид 6	ПА6 210/310	220	1130 1100–1150	100–120	1,4 1,2–1,5	355	177	Гродно Азот
Полиамид 66	ПА66 210/310	267	1140	90–95	—	—	—	Полипластик, РФ
Полиэтилентерефлат	ПЭТ 8200	253	1050 1020–1080	10–30	2,3 1,7–2,9	473	218	Химволокно, Могилев

Скорость распространения продольных волн в упругом твердом материале определяли по формуле:

$$c = \sqrt{E/\rho}, \quad (1)$$

где E — модуль упругости материала стержня; ρ — его плотность.

Из уравнений (1) видно, что скорость продольных ультразвуковых волн зависит от плотности и упругих констант полимеров.

Интенсивность звуковых колебаний для плоской волны, в которой форма и площадь поверхности волнового фронта не изменяются, можно определить по формулам:

$$I = 2 \pi^2 \cdot \rho \cdot c \cdot f \cdot A^2, \quad (2)$$

или

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho c}, \quad (3)$$

где f — частота колебаний, A — амплитуда колебаний, P_A — амплитуда звукового давления.

Амплитуда звукового давления

$$P_A = \rho \cdot c \cdot \omega \cdot A. \quad (4)$$

Произведение плотности среды на скорость распространения звука ρc определяет акустическое сопротивление полимерного материала прохождению ультразвуковой продольной волны.

Таким образом, интенсивность звука прямо пропорциональна квадрату амплитуды звукового давления и обратно пропорциональна волновому сопротивлению среды.

Коэффициент затухания (поглощения) энергии звуковой волны характеризуется падением интенсивности звука и зависит от вязкости и теплопроводности свариваемых пластмасс. Значения коэф-

фициентов затухания материалов прямо пропорциональны коэффициентам вязкости и теплопроводности и квадрату частоты [2].

Коэффициенты затухания, обусловленные вязкостью α_1 и теплопроводностью α_2 , определяют по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{2\eta\omega^2}{3\rho c^2};$$

$$\alpha_2 = \frac{2\pi^2 K}{\lambda^2 \rho c c_p} \left(\frac{c_p}{c_v} - 1 \right), \quad (5)$$

где η — коэффициент вязкости,

K — коэффициент теплопроводности,

c_v, c_p — удельные теплоемкости при постоянном объеме и давлении.

Исследования проводили на экспериментальной установке для ультразвуковой сварки полимеров конструкции Института технической акустики НАН Беларуси, включающей генератор ультразвуковых колебаний, пневматический пресс с пьезокерамическим преобразователем колебаний и волноводом-концентратором (пуансоном-волноводом) и компрессор (рис. 1).

Пьезокерамический преобразователь смонтирован на ползуне прессы и подключается к ультразвуковому генератору. Необходимое усилие прижима обеспечивается пневмосистемой прессы, в которой источником сжатого воздуха служит компрессор.

Преобразователь колебаний, волновод, пуансон-волновод установлены в составных частях волноводного звена с акустической развязкой колебательной системы от корпуса установки. Составные части жестко закрепляются на ползуне прессы.



Рис. 1. Экспериментальная установка для ультразвуковой сварки полимеров: а — генератор ультразвуковых колебаний; б — пневматический пресс с пьезокерамическим преобразователем и пуансоном-волноводом; в — компрессор

Ультразвуковая колебательная система, включающая преобразователь колебаний, пуансон-волновод, матрицу, отражатель, свариваемые заготовки, составлена из резонансных, кратных полуволне звеньев с расположением очага деформаций в пучности смещений.

Рабочий цикл сварки определяется последовательностью приложения статического давления $P_{ст}$, включения и прохождения ультразвукового импульса, выдержки изделия под давлением и снятия давления с последующим удалением сварного соединения из матрицы.

Установка ультразвуковой сварки полимеров работает следующим образом. В исходном положении, когда ползун прессы находится в крайнем верхнем положении, производят укладку свариваемых заготовок в матрицу (на опору), после чего включают рабочий цикл ультразвуковой сварки.

Статическое давление $P_{ст}$ на свариваемые заготовки осуществляют при рабочем ходе ползуна прессы до включения ультразвуковых колебаний.

Затем включают генератор ультразвуковых колебаний, который вырабатывает электрические колебания ультразвуковой частоты 20–50 кГц, преобразуемые ультразвуковой колебательной системой в механические колебания пуансона-волновода и вводятся в свариваемый материал. Часть энергии механических колебаний переходит в тепловую энергию, что приводит к нагреву зоны контакта соединяемых деталей до температур вязкотекучего состояния.

Сварку образцов производили внахлест на длине 30 мм, что было связано с размерами concentra-

тора. Основные параметры ультразвуковой сварки в процессе проведения исследований: амплитуда колебаний рабочего торца волновода $A = 23,6$ мкм; частота колебаний $f = 22$ кГц ± 10 %; продолжительность ультразвукового импульса $t = 3$ с; сварочное статическое давление $P_{ст} = 5-6$ Бар, усилие прижатия волновода к материалу $F = 50$ Н; выдержка свариваемого изделия под давлением 1–10 с; вводимая энергия 800–1600 Вт · с.

Результаты исследований показали, что свариваемость полимеров ультразвуком определяется их физико-механическими свойствами при температуре сварки, а так же состоянием поверхности свариваемых полимеров (табл. 2).

На первом этапе исследований производили сварку полос без предварительной обработки свариваемых поверхностей.

В результате удалось сварить лишь однородные (одноименные) полимеры, кроме ПЭНП, а так же ПА6 с ПА66 и с ПЭТ и ПП с ПЭВП.

При дальнейших исследованиях изучали влияние шероховатости поверхностей на свариваемость образцов. Изменение шероховатости свариваемых поверхностей путем нанесения точечных или вафельных рифлений значительно расширяет технологические возможности УЗС.

Однако нанесение точечных или вафельных рифлений достаточно трудоемкий процесс, требующий использования специальных штампов.

Нами был предложен способ сварки, при котором на свариваемую поверхность нижней пластины насыпают частицы (крошку) полимера с невысокой температурой плавления для созда-

Табл. 2

Свариваемость различных полимеров

	ПЭНП 109	ПЭВП 277	ПП 21030	ПА6 210/310	ПА66 210/310	ПЭТ 8200
ПЭНП 109	+	+	+	–	–	–
ПЭВП 277	+	+	+	–	–	–
ПП 21030	+	+	+	+	+	–
ПА6 210/310	–	–	+	+	+	+
ПА66 210/310	–	–	+	+	+	+
ПЭТ 8200	–	–	–	+	+	+

*(знак «+» – полимеры свариваются)

ния искусственных концентраторов напряжения заменяющих увеличение шероховатость поверхности. В наших экспериментах частицы полимера объемом до 2 мм^3 получали рубкой из одного из свариваемых материалов.

Использование частиц (крошки) полимера ПЭНП позволило осуществить сварку образцов одноименных полимеров ПЭНП, а так же образцов из разнородных полимеров ПЭНП с ПЭВП и с ПП (табл. 2, обозначение – «+*»).

При сварке полужестких полимеров ПП и ПА6, близких по плотности и температуре плавления, с использованием крошки полимера ПЭНП не дало положительного результата. Надлежащее качество сварки было получено при применении крошки из ПП и с очередностью расположения свариваемых образцов: из ПП, как более легкоплавкого, снизу, а из ПА6, как более плотного и с меньшим коэффициентом затухания колебаний — сверху (табл. 2, обозначение – «+*»).

Одним из критериев свариваемости разнородных термопластов является их совместимость по акустическим свойствам. В связи с этим важно при сварке двух разнородных полимеров оптимизировать температурные режимы нагрева каждого из них для возможности одновременного достижения ими вязкотекучего состояния, а так же определить целесообразную очередность расположения свариваемых разнородных полимеров под волноводом.

При сварке полужестких полимеров ПП с ПА66, значительно отличающихся по плотности и температуре плавления, качественная сварка была получена с предварительным нагревом зоны сварки полимера ПА66 до $90\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$, что примерно соответствовало разнице их температур плавления. Расположение полимеров при сварке: ПП — снизу, ПА66 — сверху. Для увеличения концентрации напряжения на свариваемые поверхности насыпали крошку полимера ПП (табл. 2, обозначение – «+*»).

Механизм образования сварного соединения в технологическом плане обусловлен интенсивностью звуковых колебаний, контактным давлением и временем сварки. После приложения статического давления $P_{ст.}$ к свариваемым деталям вступают в соприкосновение микронеровности их поверхностей, обусловленные предшествующей технологией изготовления, или вершины (зубцы) рифленых поверхностей деталей или, как в нашем случае, соприкосновение через мелкие частицы (крошку) полимера и подвергаются пластической деформации. Последующее включе-

ние ультразвуковых колебаний вызывает локальное выделение теплоты в зоне сварки, что приводит к расплавлению микронеровностей (частиц полимера) и растеканию расплава по всей свариваемой поверхности. Динамическое усилие F , возникающее в результате колеблющегося волнового движения, приводит к дробной деформации расплава свариваемого материала, сопровождаемого внедрением одного материала в другой, диффузией и перемешиванием макромолекул полимеров. Механические колебания и давление в этом случае действуют по одной линии перпендикулярно к свариваемым поверхностям.

Таким образом, установлена свариваемость некоторых разнородных полимеров (табл. 2) и не удалось сварить полиэтиленовые и полиэтилен-терефталатные полимеры с полипропиленовыми и полиамидными полимерами.

По мнению авторов статьи [3], необходимо учитывать физическое состояние пластмасс, поскольку на различных его стадиях механизм теплообразования неодинаков. Предлагается разделить процесс УЗС на три стадии, которые характерны для трех физических состояний пластмасс (применительно к аморфным полимерам: стеклообразным, высокоэластичным и вязкотекучим). Механизм теплообразования зависит от физического состояния полимера к моменту начала сварки. Так, при температуре начала сварки $20 \text{ }^\circ\text{C}$ для полистирола или полиметилметакрилата характерны все три стадии УЗС, а для полиэтиленовых или полиэтилен-терефталатных материалов первая стадия отсутствует. Если же полиэтиленовый материал охладить в жидком азоте, то и для нее будут характерны все три стадии сварки. Такой механизм образования сварного соединения при УЗС разнородных полимерных материалов позволяет исключить влияние различия физико-механических свойств свариваемых пластмасс. Выбор температуры охлаждения зависит от типа полимерного материала.

С учетом рекомендаций [3] становится возможным сварка мягких полимеров — полиэтиленов низкой и высокой плотности с жесткими полимерами — полиамидом ПА66 и полиэтилен-терефталатом ПЭТ.

Выводы

1. Оптимальные параметры режима ультразвуковой сварки полимеров зависят от физико-механических свойств, формы и размеров свариваемых деталей, рабочего цикла сварки и др. факторов и устанавливаются в каждом конкретном случае экспериментально. Определяющим

параметром режима ультразвуковой сварки является амплитуда колебаний рабочего торца пуансона-волновода.

2. Установлено, что шероховатость поверхностей свариваемых деталей в зоне сварки является концентратором напряжений, способствующим интенсификации процесса тепловыделения и по-

следующего развития и образования сварного соединения.

3. Наиболее экономичным и перспективным способом увеличения шероховатости поверхностей в зоне сварки является размещение между свариваемыми деталями мелких частиц (крошки) из одного из свариваемых материалов.

Литература

1. Клубович, В. В. Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей: монография / В. В. Клубович, В. А. Томило. — Минск: БНТУ, 2007.
2. Агрант, В. А. Ультразвуковая технология: монография / В.А. Агрант, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский, Н.Н. Хавский. — Москва, Металлургия, 1974. 503 с.
3. Волков, С. С. Влияние шероховатости свариваемых поверхностей на качество их соединения при ультразвуковой сварке разнородных пластмасс / С. С. Волков, М. А. Прилуцкий — Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2016, № 2, С. 53–57.

УДК 669.017

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫЕ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОВ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ НИХ

¹Ф.Г. Ловшенко, ²Г.Ф. Ловшенко

¹Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

²Белорусская государственная академия авиации, г. Минск, Беларусь

Установлены закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств на всех этапах получения механически легированных наноструктурных дисперсно-упрочненных алюминиевых, медных, железных и никелевых материалов, предназначенных для изделий, работающих в жестких температурно-силовых условиях — при температурах, достигающих $0,85T_{пл}$ основы, с пределом прочности при растяжении в 1,2–1,5 раза выше, чем у аналогов — наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов, а также показаны примеры их практического применения.

Ключевые слова: механическое легирование, теория, технология, структурные и фазовые превращения, дисперсное упрочнение, наноструктурные материалы, состав, структура, свойства

NANOSTRUCTURAL MECHANICALLY ALLOYED DISPERSION STRENGTHENED MATERIALS BASED ON METALS AND ARTICLES MADE THEREFROM

¹F.G. Lovshenko, ²G.F. Lovshenko

¹Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

²Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Belarus

The regularities in the development of phase composition, structure and properties at all stages of the preparation of mechanically alloyed dispersion-strengthened nanostructured aluminum, copper, iron and nickel materials for products operating under severe conditions of temperature and power — at temperatures of up $0,85T_{pl}$ bases, with a tensile strength of 1.2–1.5 times higher than that of analogues — nanostructured mechanically alloyed dispersion-hardened materials based on metals, and shows an example of their practical application.

Keywords: mechanical alloying, theory, technology, structural and phase transformations, dispersion strengthening, nanostructural materials, compound, structure, properties

E-mail: greg-lovshenko@mail.ru

Введение

Развитие современных отраслей промышленности, включающих как общее машиностроение, так и моторо-, турбино-, авиа-, приборостроение, ядерную энергетику и др. требует создания новых материалов, обладающих наряду со специальными свойствами высокой прочностью и жаропрочностью. Причем наиболее сложным в создании необходимого комплекса свойств является обеспечение жаропрочности. Максимальная температура эксплуатации классических (литых) жаропрочных сплавов не превышает $0,6T_{пл}$ основы, что обусловлено ростом и растворением упрочняющих фаз интерметаллидов и развитием межзеренного скольжения и диффузии. Для исключения этих негативных явлений необходимо уменьшить до предельно допустимого значения величину свободного перемещения дислокаций, локализовать передвижение дефектов кристаллического строения в пределах зерна (субзерна), минимизировать сток дефектов кристаллического строения на границы зерен, исключить межзеренное скольжение. Эти условия могут быть реализованы в дисперсно-упрочненных материалах, представляющих собой матрицу из металла (сплава), в которой равномерно распределены дисперсные частицы упрочняющей фазы, стойкой против коагуляции и роста при температурах, превышающих $0,95T_{пл}$ основы.

Для эффективного повышения прочности как при низких, так и при высоких температурах

материалы должны иметь фрагментированную структуру с максимально развитой поверхностью границ зерен и субзерен, стабилизированную наноразмерными включениями упрочняющих фаз. Наиболее перспективной будет структура, близкая к агрегатному типу. Она может быть получена при реализации технологии, основанной на реакционном механическом легировании, заключающемся в обработке в энергонапряженной мельнице-механореакторе шихты, в процессе которой происходит механически активируемое взаимодействие между компонентами, вызывающее образование упрочняющих фаз. По принятой в работе классификации, основанной на физических свойствах частиц материалы относятся к наноструктурным.

В работе представлены результаты работы авторов [1–6] по установлению закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств на всех этапах получения механически легированных наноструктурных дисперсно-упрочненных металлических и материалов и созданию на их основе новой области материаловедения конструкционных материалов, работающих при температурах, достигающих $0,85T_{пл}$ основы, с пределом прочности при растяжении в 1,2–1,5 раза выше, чем у аналогов — наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов, а также показаны перспективные области их применения.

Методика исследования, материалы и оборудование

В качестве исходных компонентов используются стандартные порошки металлов и соединений. Методика выбора исходного состава шихты базируется на предположении, что специальные свойства материалов (электрическое сопротивление, плотность, коррозионная стойкость и др.) могут быть получены введением элементов, традиционно применяющихся в классическом материаловедении, а высокая прочность и жаропрочность — комплексным легированием элементом, обладающим высоким сродством к кислороду, азоту или углероду, с одной стороны, и соединением, содержащим кислород, азот или углерод, с другой. При этом во втором случае в процессе реализации технологии имеет место взаимодействие между легирующими компонентами, приводящее к образованию термодинамически стабильных упрочняющих фаз.

Существенным отличием технологии, основанной на реакционном механическом легировании, от традиционной (литье) является то, что исходная шихта и конечный продукт имеют близкий химический состав.

Эффективными аппаратами для промышленного синтеза дисперсно-упрочненных металлических композиций являются энергонагруженные вибромельницы инерционного типа, производительность которых в 1,3–1,6 раза выше, затраты энергии на единицу продукции в 1,4–1,7 раза ниже, а надежность и долговечность в 3–5 раз выше чем у традиционно применяемых атриторов.

Результаты исследования

Внешней стороной, отражающей сложные физико-химические процессы, протекающие при механическом легировании, является изменение морфологии и размера частиц обрабатываемой композиции. Формирование гранулированной композиции в общем случае описывается следующей схемой. При обработке порошковой шихты в механореакторе параллельно протекают процессы накопления дефектов кристаллического строения, вызывающего разрушение частиц, и последующая сварка осколков. Сварке предшествуют адгезия и агломерация. Последняя вызвана, в основном, Ван-дер-Ваальсовыми и электростатическими силами и получает развитие, прежде всего, в местах контакта свежих поверхностей. Ударное воздействие на агломерированную частицу вызывает холодную сварку, сопровождающуюся диффузией. В результате

многократно повторяющихся разрушений и сварки формируется гранулированная композиция, в которой исходные компоненты или продукты их взаимодействия связаны и равномерно распределены между собой. На начальном этапе обработки, как правило, превалирует разрушение, в последующем — процессы агломерации и сварки, в результате протекания которых средний размер гранул непрерывно увеличивается. На определенном этапе между процессами разрушения и сварки устанавливается динамическое равновесие, в результате которого средний размер гранул стабилизируется. Продуктом механического легирования является гранулированная композиция со средним размером гранул 25–500 мкм, зависящим от природы матричного металла и состава сплава, с гомогенным и равномерным распределением легирующих элементов.

При реакционном механическом легировании получают развитие только фазовые превращения, уменьшающие свободную энергию системы, вызывающие образование твердых растворов и соединений. Для моделирования конечного фазового состава материалов приемлем термодинамический анализ равновесных процессов. Скорость и полнота протекания однотипных реакций возрастают с уменьшением значения энергии Гиббса взаимодействия между компонентами, однако фазовый состав механически легированных композиций, как правило, является неравновесным.

Для получения дисперсно-упрочненных материалов перспективными являются комплекснолегированные композиции системы «основа — соединение, содержащее O, C, N в комплексе или в отдельности, — элемент, имеющий высокое сродство к O, C, N. В качестве второго компонента эффективно использование ряда оксидов, карбонатов, нитратов, органических соединений, обладающих низкой термодинамической стабильностью. В этих системах имеет место механически активируемое взаимодействие, вызывающее образование термодинамически стабильных оксидов, карбидов, нитридов, интерметаллидов. В комплекснолегированных композициях для достаточно полного протекания механически активируемого взаимодействия между легирующими компонентами, по меньшей мере, один из них должен обладать достаточно высокой растворимостью в основе. В случае использования в качестве поставщика кислорода веществ в газовой фазе, например, оксидов азота, окислительно-восстановительные превращения протекают по следующей схеме: растворение легирующего

металла в основе; окисление основного металла кислородосодержащей газовой фазой; последующее внутреннее окисление легирующего металла, вызывающее образование наноразмерных включений термодинамически стабильного оксида, упрочняющих основу.

Независимо от типа «разбавленной» системы механически легированные композиции являются наноструктурными термодинамически неравновесными дисперсно-упрочненными материалами, основа которых представляет собой неомогенный твердый раствор с размером зерен ≤ 100 нм, размером блоков ≤ 50 нм и плотностью дислокаций $\leq 10^{10}$ см⁻², расположенных по границам зерен и субзерен, стабилизированных наноразмерными включениями ($d < 5$ нм) механически синтезированных соединений, представляющих собой квазикластеры и находящиеся, как правило, в рентгеноаморфном состоянии. Во всех случаях в структуре присутствуют дисперсные включения ($d < 0,1$ мкм) исходных легирующих компонентов шихты, количество которых зависит от их природы и не превышает 20 % от исходного.

Стабилизация фазового состава, структуры и свойств и дегазация механически легированных композиций, являющихся термодинамически неравновесными системами, происходит при отжиге, который может быть совмещен с термомеханической обработкой. Целью последней является получение полуфабрикатов с плотностью, близкой к теоретической. Следует отметить, что механически легированные композиции находятся в наклепанном, предельно упрочненном состоянии и оптимальной технологией переработки их в компактный материал является горячее прессование с большой степенью пластической деформации — экструзия. Термомеханическая обработка (компактирование) не оказывает заметного влияния на фазовый состав и структуру материалов.

Экспериментально установлено, что термическое воздействие на механически легированные композиции сопровождается термодинамически разрешенными превращениями, приближающими фазовый состав к равновесному. Основными из них являются рост зерен основы, уменьшение градиента концентрации твердого раствора при переходе от одного зерна к другому, кристаллизация механически синтезированных аморфных фаз, взаимодействие между сохранившимися компонентами или промежуточными продуктами их механохимических превращений и др.

Кинетику протекания термически активируемых превращений определяют особенности строения механически легированных композиций, основными из которых являются: активированное состояние реагирующих компонентов, вызванное их высокой дисперсностью и дефектностью кристаллического строения; большая суммарная площадь поверхности частиц реагирующих веществ; наличие непосредственного контакта между реагентами, обусловленного ювенильным состоянием их поверхностей; короткие (несколько десятков атомных параметров) диффузионные пути атомов реагентов. Эти факторы создают условия для протекания превращений по кинетике, близкой к бездиффузионной. Этому также способствует высокоразвитая поверхность границ зерен и субзерен, блокированная наноразмерными включениями термодинамически стабильных фаз, которая является препятствием (барьером) межкристаллитной диффузии. Она получает развитие в пределах зерна (блока). Наличие диффузионного барьера в виде границ зерен и субзерен обуславливает существенную разницу в фазовом составе и строении соседних зерен. Это явление определяет также высокую термическую стабильность фаз, не имеющих когерентной связи с основой, в том числе и включений исходных компонентов.

Оптимизация технологии получения и состава наноструктурных механически легированных дисперсно-упрочненных алюминиевых, медных, железных, никелевых материалов показала, что в зависимости от основы параметры механического легирования в механореакторе вибрационного типа изменяются в пределах: ускорение рабочих тел — 120–140 м × с⁻², степень заполнения помольной камеры рабочими телами — 75–85 %, отношение объемов рабочих тел и шихты — 6–10, температура в помольной камере — 40–70 °С. В ряду алюминий, медь, железо, никель необходимая энергонапряженность обработки в механореакторе возрастает. Оптимальными условиями термомеханической обработки (экструзия) механически легированных композиций являются: температура нагрева холоднопрессованных брикетов — 0,7–0,8 Tпл основы, коэффициент вытяжки — более 10. Температура нагрева прессового инструмента при экструзии материалов на основе меди, железа и никеля — 600 °С, алюминия — 450 °С. Термическая обработка холоднопрессованных брикетов определяется необходимостью дегазации и проводится при температурах, не превышающих температуру термоме-

ханической обработки. Суммарное содержание в материале термодинамически стабильных фаз, имеющих высокое значение модуля сдвига, определяющее жаропрочность, составляет 3,5–6,0 % объем.

Компактные материалы, полученные по оптимальной технологии, независимо от природы матричного металла, имеют микрокристаллический тип структуры основы, стабилизированной наноразмерными включениями упрочняющих фаз, относятся к наноструктурным дисперсно-упрочненными материалам и имеют микрокристаллическое строение основы с размером зерен ≤ 500 нм, разделенных на блоки ≤ 100 нм, с плотностью дислокаций, равной 10^9 – 10^{10} см⁻², концентрирующихся вблизи границ зерен и субзерен, закрепленных термодинамически стабильными включениями оксидов размером менее 20 нм, карбидов, нитридов, интерметаллидов — не более 100 нм. Длительное термическое воздействие при температурах до $0,85T_{пл}$ основы материалов не обеспечивает достижения фазового равновесия.

Основное упрочнение механически легированных наноструктурных дисперсно-упрочненных материалов обусловлено наличием высокоразвитой поверхности границ зерен и субзерен, стабилизированной наноразмерными включениями термодинамически стабильных фаз, имеющих высокое значение модуля сдвига. Зернограничному упрочнению сопутствует «внутризеренное» дисперсное и в большинстве случаев дисперсионное.

Технология, основанная на реакционном механическом легировании, обеспечивает получение наноструктурных дисперсно-упрочненных алюминиевых, медных, железных и никелевых материалов различного функционального назначения, в том числе и со специальными свойствами, по прочности и жаропрочности в 1,2–1,5 раза превосходящих аналоги.

Практическое применение результатов работы

Созданы материалы на основе меди для изделий электротехнического назначения, работающих в жестких температурно-силовых условиях, которые по своим физико-механическим свойствам в 1,3–2,0 раза превосходят как серийно применяемые бронзы, так и дисперсно-упрочненные порошковые сплавы. Электроды, полученные из комплекснолегированных композиций оптимального состава, в 1,5–3,0 раза превосходят по стойкости стандартные и перспективны для сварки

углеродистых, высоколегированных нержавеющей сталей, оцинкованной стали и титана.

Разработана теория, создана и освоена универсальная технология реакционного механического легирования получения и составы композиционных порошков на основе металлов и химических соединений, включая оксиды, для газотермического напыления и наплавки покрытий различного функционального назначения. Покрытия из разработанных порошков отличаются повышенной вязкостью и по износостойкости как в условиях трения – скольжения со смазкой, так и без нее, а также при абразивном изнашивании в 1,2–1,9 раза превышают аналоги. Плакирование порошков оксидов алюминия (Al_2O_3) и титана (TiO_2) никелем обеспечивает получение композиционных покрытий, стойких против растрескивания и характеризующихся повышенной сцепляемостью с поверхностью изделия, что исключает необходимость нанесения подслоя, расширяет области применения.

Технология, основанная на реакционном механическом легировании, показала себя эффективной для получения модифицирующих лигатур. Так, при выплавке хромовых и хромоциркониевых бронз применение механически легированных модифицирующих лигатур позволяет исключить из технологии получения материалов высокотемпературный, требующий специального дорогостоящего печного оборудования, экологически опасный процесс производства литых лигатур, а также снизить оптимальную температуру процесса легирования расплава меди на 50–100 °С при уменьшении его продолжительности в 2,5–3,5 раза. Применение механически легированных модифицирующих лигатур приводит к повышению физико-механических свойств хромовых и хромоциркониевых бронз — экспериментальные бронзы по таким показателям как прочность, твердость, электропроводность, температура начала рекристаллизации примерно на 15–20 % превосходят базовые. Электроды для контактной точечной сварки, изготовленные из экспериментальных хромовых и хромоциркониевых бронз, по стойкости в 1,8–2,2 раза превосходят аналоги и рекомендованы к применению на предприятиях Республики Беларусь.

Применение механически легированных наноструктурных модифицирующих лигатур приводит к измельчению структуры и повышению физико-механических свойств литых серых чугунов. Так, модифицирование чугуна сплавом, полученным из механически синтезированной ком-

позиции «алюминий – углерод (6 %)», приводит к уменьшению длины и увеличению толщины графитовых включений. Причем по сравнению с модифицированием алюминием количества эвтектических ячеек в единице поверхности в этом случае повышается в 1,65 раза, что оказывает существенное влияние на механические свойства материала. Роль модификатора в механически легированном материале выполняли нанодисперсные включения карбида алюминия (Al_4C_3).

Значительный модифицирующий эффект также имел место при применении механически легированных лигатур для производства электродного покрытия при сварке стальным плавящимся электродом. Так сравнительные исследования структуры и свойств шва стальной трубы из стали БСтЗ с толщиной стенки 2,5 мм с применением электродов со стандартным и экспериментальным покрытием показали, что использование электродов с экспериментальным покрытием, содержащим механически сплавленную, компо-

зиционную лигатуру, вызывающую модифицирующий эффект, приводит к устранению транс-кристаллического типа структуры металла шва и уменьшению размеров зерен в 2,5–3,0 раза (с номера 8–9 до номера 11–12). Это обеспечивает снижение на 20–30 °С порога хладноломкости и увеличение на 15–25 % механических свойств металла шва.

Заключение

На основе установленных закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств на всех этапах получения механически легированных наноструктурных дисперсно-упрочненных алюминиевых, медных, железных и никелевых материалов создана новая область материаловедения конструкционных материалов для работы при температурах, достигающих 0,85Tпл основы, с пределом прочности при растяжении в 1,2–1,5 раза выше, чем у аналогов — наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь, П. А. Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. — Минск: Беларуская навука, 1998. — 352 с.
2. Ловшенко, Г.Ф. Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. — Могилев : Белорус. — Рос. ун-т, 2005. — 276 с.
3. Ловшенко, Г. Ф. Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко . — Могилев : Белорус. — Рос. ун-т, 2008. — 679 с. : ил.
4. Ловшенко, Ф. Г. Наноструктурные механически легированные материалы на основе никеля : монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. — Минск : БНТУ, 2012. — 297 с.
5. Ловшенко, Ф. Г. Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. — Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013 — 215 с.
6. Ловшенко, Ф.Г., Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств механически легированных материалов / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. — Могилев; Белорус.-Рос. ун-т, 2016 — 420 с.: ил.

УДК 621.791.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 40Х, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

И.Г. Олешук, С.В. Юревич, А.А. Изюмов
Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь

Для повышения качества соединений из конструкционной стали 40Х, полученных электронно-лучевой сваркой, эффективным является применение предварительного подогрева заготовок электронным лучом до температур 300–400 °С и введение присадочной ленты из титана в зону сварки. Исследовано влияние указанных технологических приемов на микроструктуру и микротвердость сварных соединений. Показано, что предварительный подогрев заготовок предотвращает формирование в сварных швах закалочных структур, а введение присадочной ленты — появление горячих трещин и других дефектов.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, сталь 40Х, микроструктура, микротвердость

DEVELOPMENT OF METHODS OF IMPROVING THE QUALITY OF 40X STEEL JOINTS OBTAINED BY ELECTRON BEAM WELDING

I.G. Oleshuk, S.V. Yurevich, A.A. Izumov
Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

To improve the quality of joints made of 40X structural steel obtained by electron beam welding, it is effective to use a number of methods, including: preheating of billets with an electron beam to temperatures of 300–400°C and placing a titanium filler tape into the welding zone. The influence of these technological methods on the microstructure and microhardness of the welded joints has been studied. It is shown that the preheating of billets prevents the formation of hardening structures in welding seams, while the placement of the filler tape into the welding zone prevents from the appearance of hot cracks and other defects.

Keywords: electron-beam welding, 40X steel, microstructure, microhardness

E-mail: i.oleshuk@mail.ru

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) обладает широкими технологическими возможностями, недоступными для других методов сварки. В зависимости от характеристик используемого обо-

рудования ЭЛС позволяет соединять за один проход металлы и сплавы в диапазоне толщин 0,1–400 мм при отношении глубины сварного шва к ширине до 50 : 1 [1, 2]. Прохождение процесса

в вакууме обеспечивает высокую чистоту материала и позволяет сваривать химически активные материалы (титан, цирконий, ванадий и др.), высокая концентрация энергии в электронном луче делает ЭЛС наиболее эффективным способом получения сварных соединений тугоплавких металлов (ниобий, тантал, молибден, вольфрам). Малый объем расплавленного металла и кратковременность теплового воздействия при ЭЛС обеспечивает незначительные термические деформации соединяемых изделий, во многих случаях не превышающие допусков на механическую обработку. Указанные достоинства привели к широкому распространению метода в авиационной, космической и энергетической областях. При этом существует потребность в получении сварных соединений с помощью ЭЛС ряда машиностроительных деталей, изготавливаемых из сталей (главным образом, конструкционных легированных и высоколегированных сталей), относящихся к категориям условно и трудно свариваемых. Сварка таких сталей, в том числе электронным лучом, приводит к возникновению холодных и горячих трещин в металле сварного шва и зоне термического влияния (ЗТВ), снижает прочность сварных соединений и может привести к разрушению конструкции.

Исследования показывают [3], что получение качественных сварных соединений конструкционных легированных сталей с помощью ЭЛС возможно при обеспечении высокой чистоты исходного металла. Рекомендуется проводить рафинирование металла с помощью электрошлакового переплава для общего снижения загрязненности, диспергирования и равномерного распределения неметаллических включений, также следует ограничить суммарное содержание фосфора и серы до 0,11 %, газов — до 60 ppm (для кислорода) и до 200 ppm (для азота). На практике данные требования не всегда выполняются.

Анализ запросов промышленных предприятий Республики Беларусь (ОАО «МТЗ», ОАО «Амкор», ОАО «МАЗ», ОАО «БЕЛАЗ») выявляет потребность в изготовлении с помощью ЭЛС ряда деталей коробок передач (зубчатые колеса, блок-шестерни, шестерни и др.), изготавливаемых из конструкционных легированных сталей 15ХГН2ТА, 25ХГМ, 25ХГТ, 20ХН3А, 45ХН2МФА, 20Х2Н4А, 40Х. Диапазон толщин свариваемых кромок для таких деталей составляет 7–20 мм, что, с учетом высоких требований к точности деталей коробок передач, делает недоступным их сварку с помощью других способов.

Анализ химических составов названных сталей путем оценки их углеродного Сэкв и серного HSC (high temperature cracking sensitivity) эквивалентов [4, 5], говорит о их высокой склонности к образованию как холодных, так и горячих трещин при сварке. Основным методом предотвращения образования холодных трещин является предварительный подогрев при сварке, который, благодаря широким возможностям нагрева электронным лучом, может быть успешно выполнен при ЭЛС. Для исключения образования горячих трещин, главной причиной которых являются легкоплавкие сульфиды, при дуговых методах сварки возможно использование ряда технологических мер: введение в сварочную ванну присадочных материалов (цирконий, титан, ванадий, ниобий), связывающих серу в тугоплавкие соединения; снижение скорости сварки при использовании коэффициента формы шва 0,5–5 [6]. Использование таких коэффициентов формы шва при сварке деталей приведет к высоким термическим деформациям.

Присадочный материал при сварке может быть введен в виде прутка, ленты, проволоки, гранул или порошка. Наибольшее промышленное применение нашла сварка с подачей присадочной проволоки. Обычно проволоку вводят в сварочную ванну позади электронного пучка под углом 15–45° к его продольной оси. При этом режим подачи выбирается так, чтобы часть проволоки расплавлялась в жидком металле ванны, а часть — непосредственно электронным пучком. При подаче присадочного металла в сварочную ванну металл верхней части сварного шва будет получать большее количество легирующих элементов, чем металл у корня сварного шва. При увеличении глубины сварного шва это будет проявляться в большей степени. Для наиболее однородного легирования металла шва между стыкуемыми поверхностями деталей помещается фольга из присадочного материала [7]. Однако, для высокоточных изделий, типа зубчатых колес и шестерен, данный метод приводит к потере точности геометрии деталей при сборке и сварке. Из перечисленных выше присадочных материалов наиболее доступным (поставляемым в виде проволоки) является титан.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния предварительного подогрева заготовок и введения присадочного материала на структуру и микротвердость сварных соединений из стали 40Х, имеющей наибольшую склонность к образованию дефектов из перечисленной выше

группы конструкционных легированных сталей. В качестве присадочного материала использовали ленту из титана марки ВТ1-0, которую располагали в выполненной по разделке свариваемых кромок проточке.

Материалы и методики

Экспериментальные образцы были изготовлены из стали 40Х (химический состав согласно ГОСТ 4543) в виде круглых дисков ($\varnothing 80$ мм) толщиной 20 мм. В качестве присадочного материала использовалась лента из титана марки ВТ1-0 (площадь сечения — 0,5 мм²). Лента укладывалась в проточку, выполненную по траектории шва (рис. 1).

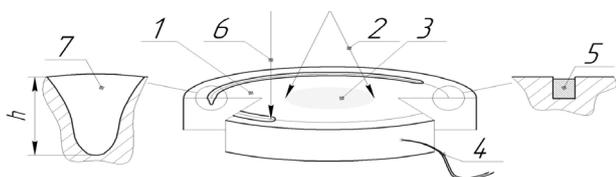


Рис. 1. Схема электронно-лучевого нагрева образца и ЭЛС:

- 1 — образец; 2 — электронный луч при нагреве;
- 3 — пятно нагрева; 4 — термопара;
- 5 — присадочная лента; 6 — электронный луч при сварке; 7 — сварной шов

Предварительный подогрев образцов осуществляли в вакуумной камере электронным лучом. Параметры электронно-лучевой воздействия были следующие: ускоряющее напряжение U — 60 кВ, ток луча I — 20 мА, ток фокусировки $I_{\text{фок}}$ — 780 мА. Схема размещения хромель-алюмелевой термопары для определения температуры предварительного подогрева в исследуемом образце показана на рис. 1. После достижения

температуры 500 °С ток луча отключали. На рис. 2 представлены зависимости температуры образца от времени при нагреве (а) и при охлаждении в вакууме $3 \cdot 10^{-3}$ Па (б, кривая 1) и на воздухе (б, кривая 2). Время воздействия электронным лучом на образец для выполнения предварительного подогрева перед сваркой выбирали на основании построенной зависимости температуры образца при нагреве. При сварке с предварительным подогревом охлаждение образцов осуществляли в вакууме. Образцы для проведения ЭЛС использовали как в состоянии улучшения (закалка от 820 °С в воду и отпуск при температуре 550 °С), так и в состоянии нормализации. Электронно-лучевую сварку образцов осуществляли по следующему режиму: ускоряющее напряжение U — 60 кВ, ток луча I — 100 мА, ток фокусировки $I_{\text{фок}}$ — 635 мА, скорость сварки $V_{\text{св}}$ — 10 мм/с.

1. Исследование влияния предварительного подогрева на структуру и свойства сварных соединений стали 40Х, полученных с помощью ЭЛС

Структуру основного металла (после улучшения — закалка 820 °С с охлаждением в воду, отпуск 2 часа при температуре 550 °С) можно охарактеризовать как отпущенный мартенсит (рис. 3), микротвердость стали составляет 2,4–2,8 ГПа.

Исследование структуры и микротвердости сварных соединений после ЭЛС с предварительным подогревом выявило, что более эффективным является подогрев до более высоких температур. Поэтому остановимся более подробно на образцах с различной исходной микроструктурой и предварительным подогревом перед ЭЛС до 300 °С.

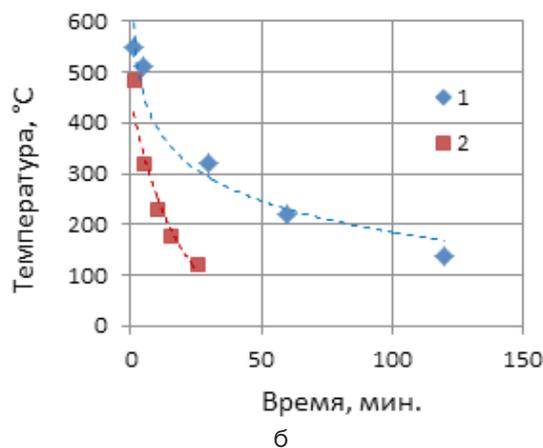
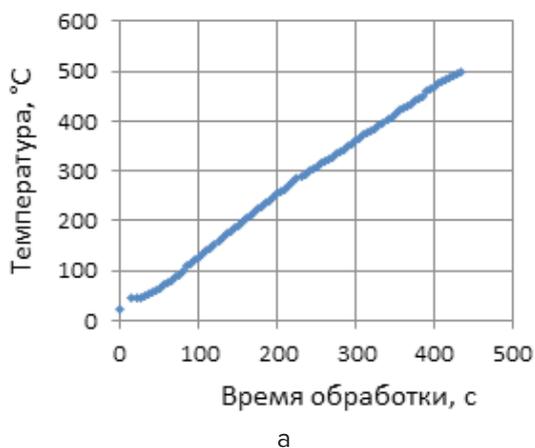


Рис. 2. Зависимость температуры образца от времени воздействия при нагреве (а) и охлаждении (б) в вакуумной камере (1) и на воздухе (2)

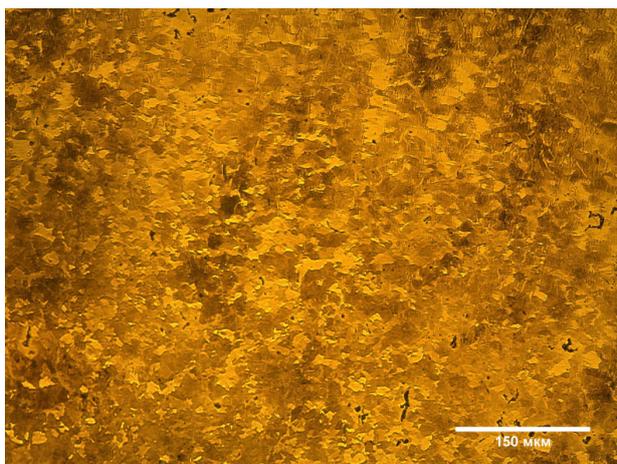
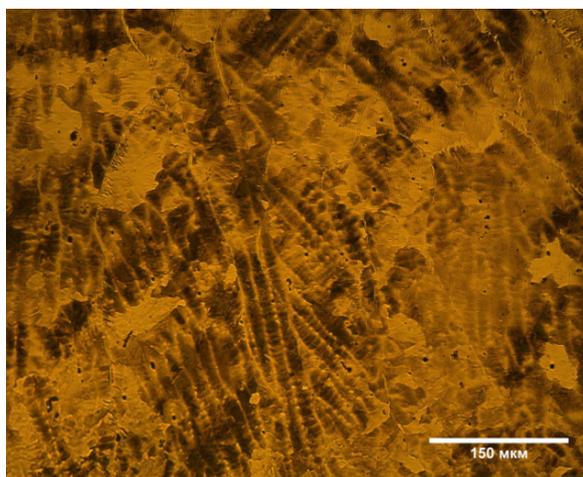


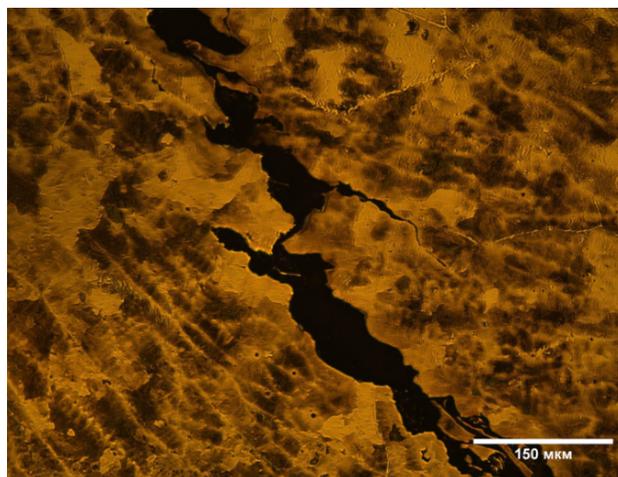
Рис. 3. Микроструктура стали 40X после улучшения

После выполнения ЭЛС с предварительным подогревом электронным лучом на образцах с улучшенной исходной структурой получили сварной шов глубиной 8,5 мм и шириной 8 мм. В сварном шве, имеющем дендритную структуру (рис. 4 а), наблюдаются горячие трещины (рис. 4 б). Можно отметить, что после ЭЛС улучшенных образцов с предварительным подогревом трещин в объеме шва стало меньше, чем наблюдалось в ранее проведенных исследованиях без предварительного подогрева. Микротвердость в зоне сварного шва составила 2,4–2,7 ГПа.

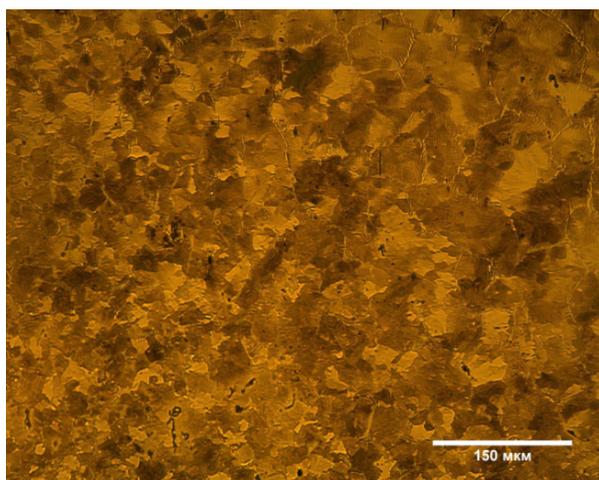
Зону термического влияния, ширина которой составляет 3 мм, можно разделить на два участка, отличающиеся микроструктурой. Микроструктура в области ЗТВ, расположенной



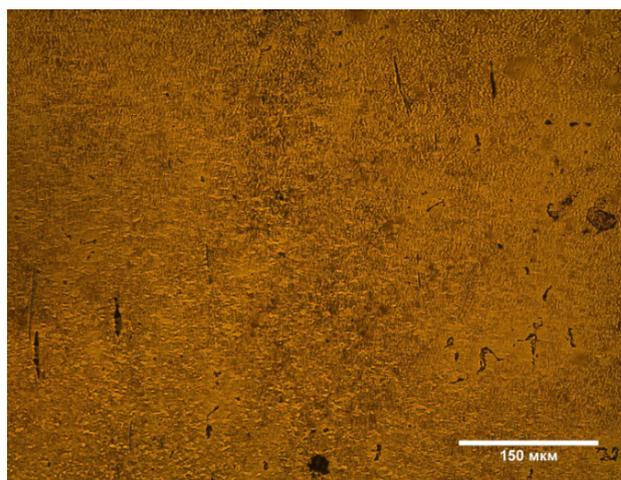
а



б



в



г

Рис. 4. Микроструктуры металла сварного шва (а, б) и зоны термического влияния (в — вблизи линии сплавления, г — со стороны основного металла) при ЭЛС стали 40X (после улучшения) с предварительным подогревом 300 °С

вблизи линии сплавления, представлена на рис. 4 в. Микротвердость в этой области составила 2,5–2,6 ГПа. Часть ЗТВ, расположенная ближе к основному металлу, характеризуется мелкозернистой структурой (рис. 4 г). Микротвердость здесь составила 2,3–2,4 ГПа.

Таким образом, при ЭЛС с предварительным подогревом до 300 °С образцов из стали 40Х с исходной структурой после улучшения роста микротвердости в сварных швах и ЗТВ не наблюдается. При ЭЛС с предварительным подогревом 300 °С образцов с нормализованным исходным состоянием получили сварной шов глубиной 10 мм и шириной 9 мм. Параметры сварки были такими, как и в предыдущем случае. В области сварного шва наблюдаются горячие трещины (рис. 5 а), располагающиеся между ветвями столбчатых кристаллов и направленные перпендикулярно к линии сплавления. Микротвердость в зоне сварного шва — 2,4–2,7 ГПа, что несущественно превосходит микротвердость основного металла (2,2–2,4 ГПа для перлитной фазы и 1,5–1,8 ГПа для ферритной фазы).

В зоне термического влияния дефектов в виде трещин и пор не было обнаружено. Микроструктура в ЗТВ представлена на рис. 5 б.

Таким образом, в сварных соединениях образцов с исходной структурой после улучшения и нормализации, подвергнутых перед электронно-лучевой сваркой предварительному подогреву электронным лучом до 300 °С, повышения микротвердости не наблюдается, уменьшается количество и размер горячих трещин.

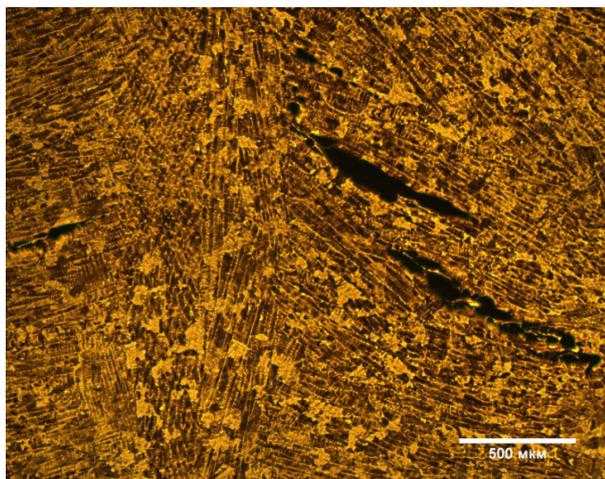
2. Исследование влияние присадки титана на структуру и свойства сварных соединений стали 40Х, полученных с помощью ЭЛС

Проведена сварка без предварительного подогрева по указанным ранее режимам образцов из стали 40Х в нормализованном состоянии с присадочной лентой из титана марки ВТ1-0.

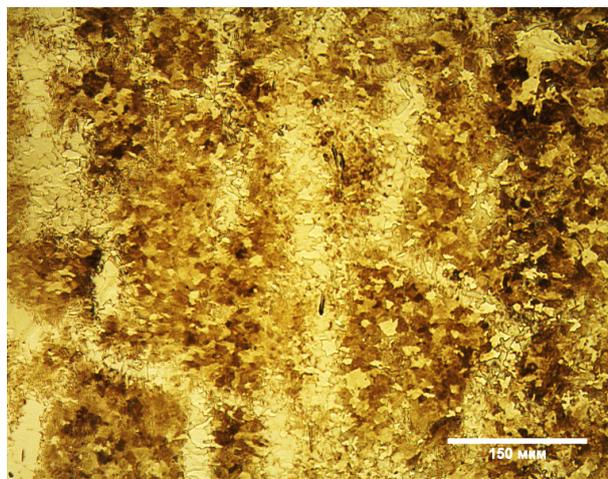
В результате получены сварные швы глубиной 7–8 мм и шириной 8–9 мм. Трещины в сварных швах отсутствуют. Титан в процессе сварки связывает серу в тугоплавкие сульфиды, и тем самым предотвращает выделение легкоплавких сульфидов железа, которые при кристаллизации металла сварного шва образуют жидкие прослойки, приводящие при возникновении растягивающих напряжений к появлению разрывов — горящих трещин.

Микроструктура сварного шва одного из образцов, которую можно охарактеризовать как мелкозернистую дендритную, показана на рис. 6 а. Также как и при ЭЛС стали без предварительного подогрева и введения титана, наблюдается значительный рост микротвердости металла в области сварного шва до 4,7–5,7 ГПа, что связано с образованием закалочных структур.

Зона термического влияния небольшая (0,5–1,5 мм), состоит из двух областей с различной микроструктурой и микротвердостью. Со стороны сварного шва наблюдается полосчатая структура, состоящая из светлых и темных фаз (рис. 6 б). Микротвердость светлых фаз составила 7,1–7,7 ГПа, темных фаз — 4,6–5,7 ГПа. Структура металла в зоне термического влияния при переходе к основному металлу показана на рис. 6 в, микротвердость составила 3,0–4,2 ГПа.



а



б

Рис. 5. Микроструктура металла сварного шва (а) и зоны термического влияния (б) при ЭЛС стали 40Х (после нормализации) с предварительным подогревом 300 °С

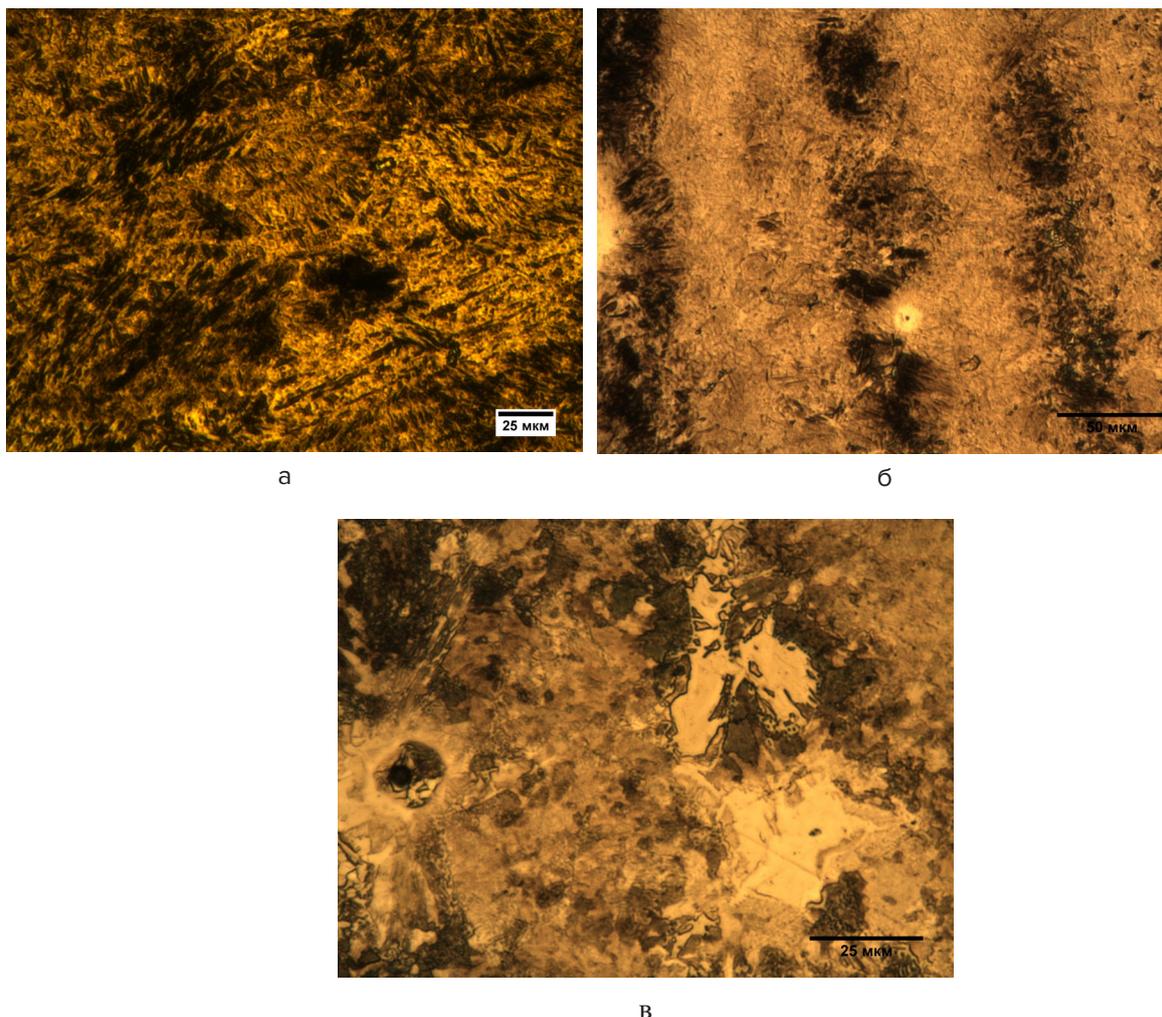


Рис. 6. Микроструктура металла сварного шва (а) и зоны термического влияния (б — со стороны сварного шва, в — со стороны основного металла) при ЭЛС стали 40Х (после нормализации) без предварительного подогрева с присадкой титана

Таким образом, при ЭЛС стали 40Х в нормализованном состоянии присадка ленты из титана ВТ1-0 в область сварного шва в количестве 0,2–0,6 об. % предотвращает образование горячих трещин и улучшает качество шва.

Заключение

Проведено исследование влияния предварительного подогрева перед электронно-лучевой сваркой на структуру и микротвердость сварных соединений из стали 40Х. Установлено, что в образцах с различной исходной структурой (после улучшения и нормализации), при ЭЛС с предварительным подогревом электронным лучом до

300 °С в сварном шве закалочные структуры не образуются, уменьшается количество и размер горячих трещин.

Введение присадки из титана марки ВТ1-0 в зону сварки в при ЭЛС без предварительного подогрева предотвращает образование горячих трещин в сварном шве, однако не устраняет формирования закалочных структур.

Указанные методы можно применять для повышения качества сварных соединений из конструкционной стали 40Х, которая часто используется на предприятиях машиностроения для изготовления деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шиллер, З. Электронно-лучевые технологии / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. — М.: Энергия, 1980. — 528 с.
2. Schultz H. Electron beam welding. Abington: Woodhead publishing Ltd., 1993, pp. 235.
3. Кайдалов, А. А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии / А. А. Кайдалов. — Киев: НТП «Инкорс», 2004. — 232 с.
4. Петров, Г.Л. Теория сварочных процессов / Г.Л. Петров, А.С. Тумарев — Москва: Высшая школа, 1977. — 392 с.
5. Лившиц, Л. С. Металловедение сварки и термической обработки сварных соединений / Л.С. Лившиц, А.Н. Хакимов — М.: Машиностроение, 1989. — 336 с.
6. Деев, Г.Ф. Дефекты сварных швов / Г.Ф. Деев, И.Р. Пацкевич. — Киев: Наук. думка, 1984. — 208 с.
7. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко [и др.]; Под. ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.

УДК 679

ПОЛУЧЕНИЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОТХОДОВ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ А1-В

¹В.А. Глущенко, ¹Беляева И.А., ²Миронов В.А., ¹Бурмистров А.Е.

¹Самарский университет, г. Самара, Россия

²Рижский технический университет, г. Рига, Латвия

В статье представлена гибридная технология прессования порошков в металлической оболочке, включающая одновременно две операции: волочение и магнитно-импульсный обжим. Предложено несколько технологических схем осуществления данной технологии. Одна из них опробована в лабораторных условиях. Оценено качество уплотнения порошковой композиции алюминий-бор. Предложена модель продольного и радиального уплотнения при использовании статической и динамической нагрузок. Предложено использование нового технического решения при утилизации изделия из волокнистых композиционных материалов.

Ключевые слова: Волокнистый композиционный материал А1-В, утилизация изделий, дробление, измельчение, порошковая композиция, гибридная технология «волочение-магнитно-импульсный обжим», металлическая оболочка, длинномерные изделия.

OBTAINING OF LONG-SIZE PRODUCTS FROM POWDER COMPOSITIONS Al-B

¹V.A. Glushenkov, ¹I.A. Beljaeva, ²V.A. Mironov, ¹A.E. Burmistrov

¹Samara University, Samara, Russia

²Riga Technical University, Riga, Latvia

The article presents the hybrid technology of compaction of powders in a metal shell with two simultaneous operations — «drawing and pulse-magnetic reducing». Several technological schemes for implementation of this technology are proposed. One of them was tested under laboratory condition. The quality of compaction of the powder composition Al-B was evaluated. The model of longitudinal and radial compaction when using static and dynamic loads is considered. Use of the new technical decision is proposed for recycling of products from fibrous composite materials.

Keywords: Fibrous composite material Al-B, recycling of products, crushing, grinding, powder composition, hybrid technology «drawing and pulse-magnetic reducing», metal shell, long-size products.

E-mail: vgl@ssau.ru

1. Постановка задачи

В изделиях машиностроения всё большее применение находят композиционные материалы [1–3]. Среди них особую группу представляют волокнистые композиционные материалы, например, Al-B. Из таких материалов изготавливают силовые элементы авиакосмической техники. Существует задача утилизации таких материалов. Причём она возникает ещё на этапе производства изделий при изготовлении препрегов, утилизации брака.

Одно из решений такой задачи — резка изделий на фрагменты, дробление на роторных или щёковых дробилках, измельчение в дезинтеграторе до порошковой композиции с размерами частиц 100 мкм (рис. 1).

В результате получен порошок, содержащий по объёму 50–80 % алюминиевой матрицы, 18–47 % бора и до 1,5 % вольфрама.

Следующая задача — получение из этого порошка новых изделий. Учитывая высокую твёрдость бора, предложено создать из такой порошковой композиции шлифовальный инструмент

(рис. 2). Для этого нужно осуществить прессование порошка в металлической оболочке.

С другой стороны, учитывая высокую поглощающую способность бором нейтронного излучения, предлагается создание из такого порошка защитных конструкций в виде длинномерных изделий также из порошковой композиции Al-B в металлической оболочке. В обоих примерах требуется разработка технологии прессования (уплотнения) порошка в металлической оболочке с последующим спеканием с получением длинномерных изделий.

2. Существующие способы прессования (уплотнения) порошков

Существующие методы прессования порошков (рис. 3) в закрытых жёстких матрицах, путем магнитно-импульсного обжатия порошков в трубчатых образцах, волочением, с воздействием статических и динамических нагрузок, во-первых, не во всех случаях обеспечивают требуемую плотность композиции, а во-вторых, не позволяют получить длинномерные изделия [4–7].

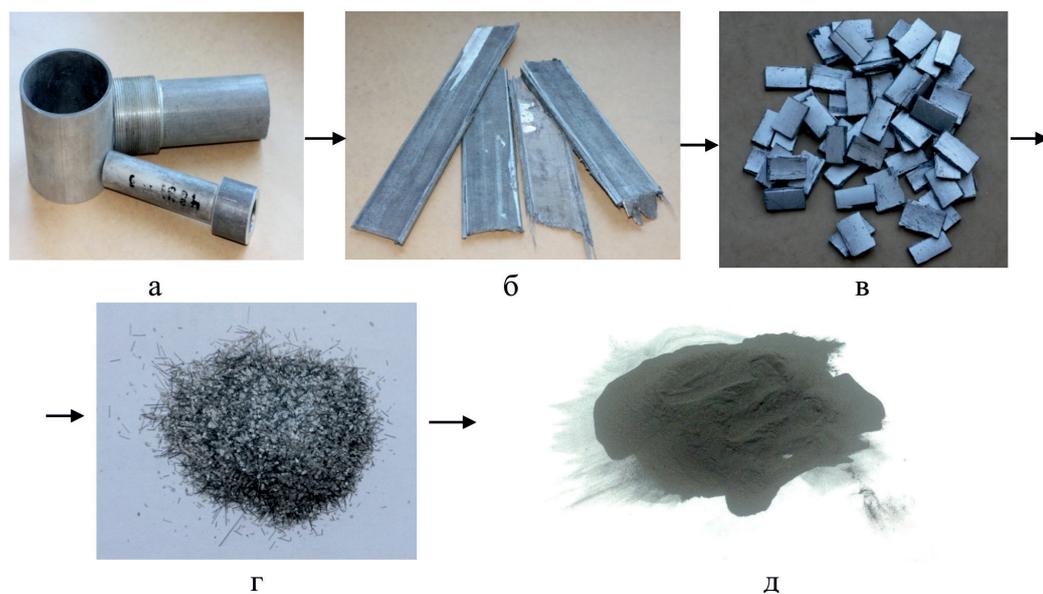


Рис. 1. Стадии измельчения утилизируемых изделий

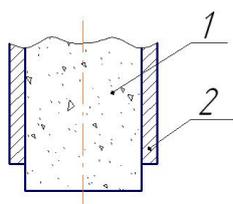


Рис. 2. Шлифовальный круг из порошковой композиции Al-B: 1 — порошок Al-B; 2 — металлическая оболочка — медь

3. Предлагаемое техническое решение — гибридная технология: «волочение — магнитно-импульсный обжим»

На рис. 4 приведены схемы гибридной технологии прессования порошков, сочетающей статическую продольную (волочение) и динамическую радиальную (магнитно-импульсный обжим) нагрузки. Действие динамической нагрузки осуществляется периодически с частотой следования импульсов 1–2 с.

Порошковая композиция засыпается внутрь трубы и подпрессовывается с усилием, не вызывающим деформирование (раздачу) трубы. С обеих сторон трубы с порошком закреплялись заглушки (рис. 5, 6).

Приведенные на рис. 4 схемы отличаются местом расположения индуктора [8]: до, после или в самой волоке. Различное расположение индукторов меняет схему напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при волочении. Продольное и радиальное деформирование меняет механизм уплотнения порошка.

4. Методика проведения эксперимента

Для эксперимента использовались медная труба диаметром 18 мм с толщиной стенки 1 мм, длиной 110 мм, стальные волокна диаметром 17 и 16,2 мм. Волочение осуществлялось на растяжной испытательной машине, магнитно-импульсный обжим на установке МИУ-10 (рис. 7) с параметрами, приведенными в табл. 1 [9]. Предварительно на заготовку наносились риски для измерения изменяющейся в процессе волочения длины образца.

Измерение длины и диаметра образца позволяет рассчитать объем материала до и после волочения и магнитно-импульсного обжима, определять степень уплотнения порошка. Магнитно-импульсный обжим осуществлялся при трёх значениях энергии: $W = 3,8; 5,3; 7,1$ кДж. После спекания уплотненного порошка при $T = 800$ °С исследовалась его микроструктура.

5. Результаты эксперимента

Изменение геометрических размеров образцов после волочения и после магнитно-импульсного обжима приведены в табл. 2, а микрошлифы образцов после спекания на рис. 8.

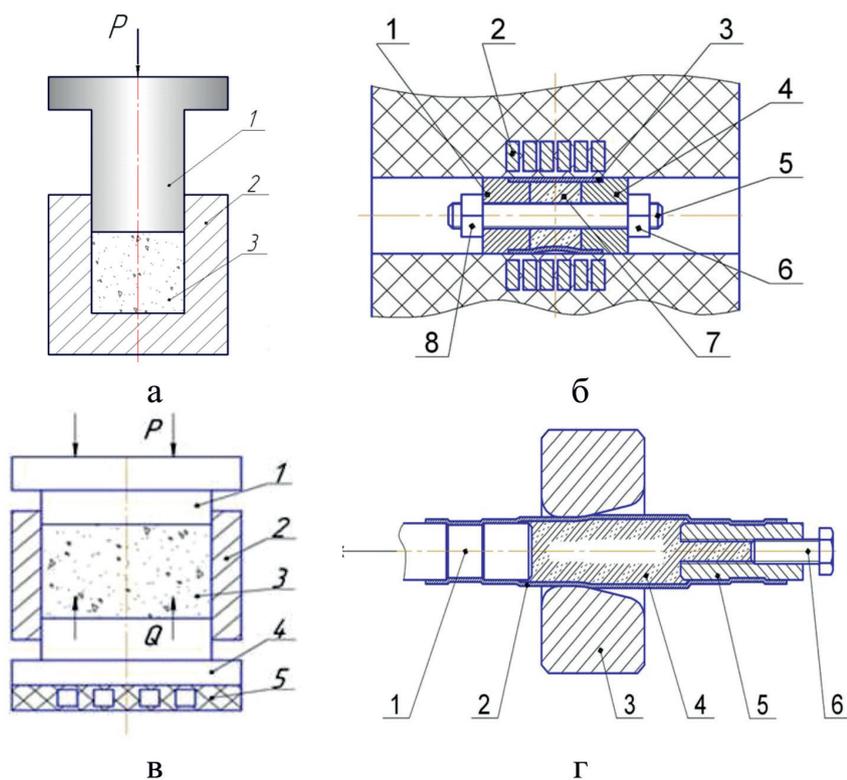


Рис. 3. Схемы существующих методов прессования порошков

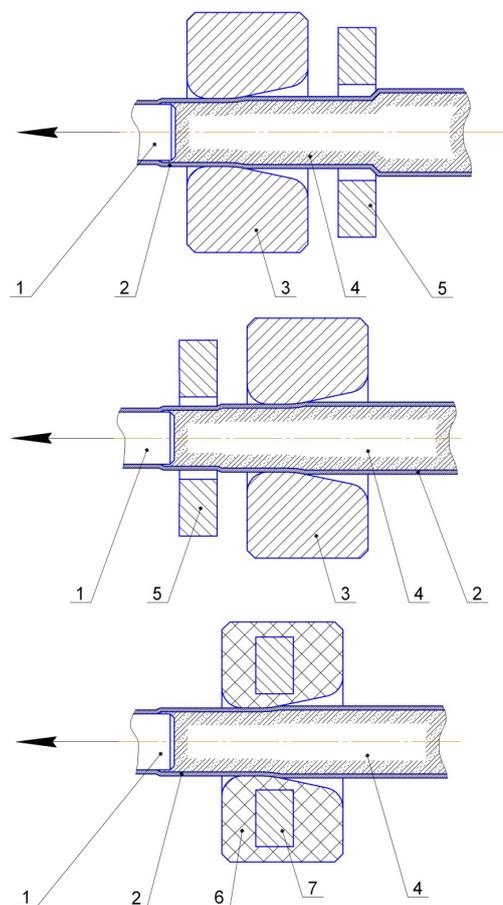


Рис. 4. Схемы гибридных технологий прессования порошков:

1 — заглушка; 2 — труба; 3 — волокна; 4 — порошок; 5 — индуктор

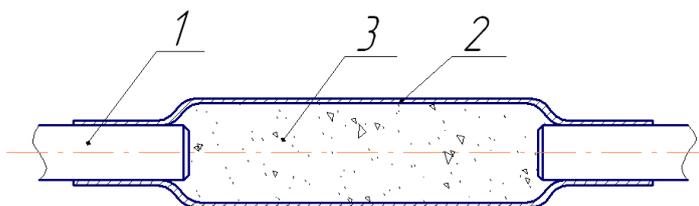


Рис. 5. Образец перед волочением:
1 — заглушка; 2 — металлическая оболочка; 3 — порошок Al-B



Рис. 6. Внешний вид образца перед волочением



Рис. 7. Магнитно-импульсная установка МИУ-10

Табл. 1.

Параметры установки МИУ-10

U , кВ	1–18
L , мкГн	50
C , мкФ	50
$F_{кз}$, кГц	92
W , кДж	10
Габариты, м	0,6x0,8x1,5

Табл. 2

Параметры образцов после волочения и обжима

№	До волочения		После волочения		Объём порошка в контрольной части, % к исходному объёму	После магнитно-импульсного обжима	
	D_0 , мм	L_0 , мм	D_1 , мм	L_1 , мм		W , кДж	$D_{кон.}$, мм
Волока Ø 17 мм							
1				52,4		3,8	16
2	17,9	50	17	52,3	93,1	5,3	15,7
3				52,3		7,1	15,4
Волока Ø 16 мм							
4				57,7		3,8	15,7
5	17,9	50	16,2	57,7	91	5,3	15,4
6				57,7		7,1	15,0

6. Анализ результатов

Полученные результаты экспериментов позволяют высказать предварительные соображения по статико-динамическому уплотнению порошка. При волочении частицы порошка приобретают направленную продольную деформацию, вытягиваются в направлении продольной силы. Происходит уплотнение порошка. Однако между ними остаются поры, снизить количество которых возможно радиальной деформацией под действием динамической нагрузки. При этом наночастицы порошка ещё более искажаются (деформируются) в направлении залечивающихся пор, и даже дробятся, что и приводит к окончательной плотной их упаковке. Механизм статико-динамического уплотнения ещё требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

7. Выводы

1. Предложено одно из направлений утилизации волокнистого композиционного материала Al-B, заключающегося в дроблении и измельчении элементов конструкций до порошковой композиции и получении новых изделий путем пресования порошка в металлической оболочке.
2. Разработаны схемы гибридного статико-

динамического уплотнения порошковой композиции в металлической оболочке: «волочение — магнитно-импульсный обжим».

3. Проведено экспериментальное подтверждение работоспособности и эффективности разработанной технологии для получения длинномерных изделий с высокой степенью уплотнения.

4. Предложен механизм гибридного статико-динамического уплотнения: продольного и радиального.

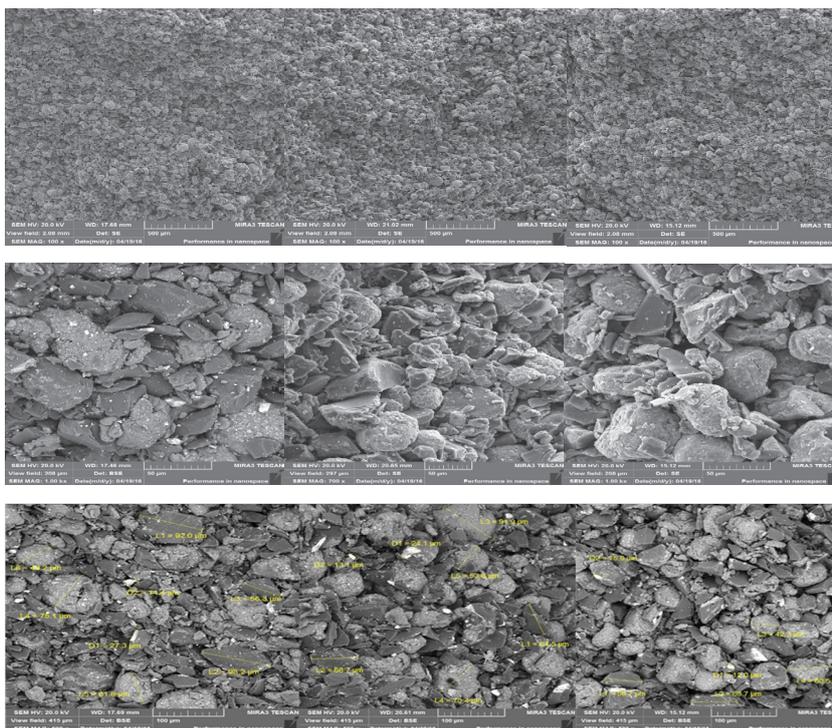


Рис. 8. Структура образцов после спекания

ЛИТЕРАТУРА

1. Буланов, И. М. Технология ракетных и авиакосмических конструкций из композиционных материалов: учебное пособие для вузов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. — 516 с.
2. Комиссар, О. Н. Композиционные материалы и технологии для аэрокосмической промышленности / О. Н. Комиссар // Научный электронный журнал «Новости материаловедения. Наука и техника». — 2013. — №4. — С. 1
3. Специальные способы обработки металлов давлением: учебное пособие / В. Н. Коко-рин [и др.]; Ульяновск: УлГТУ, 2006. — 36 с.
4. Новые гибридные технологии электроимпульсной консолидации: НИЯУ МИФИ. — Москва. — 2016.
5. Mironov, V. Pulververdichten mit Maqneti mpulsen. Planseebericht fur Pul-vermet, 1976, vol. 24, pp. 175–190.
6. Boyko, Mironov V., Lapkovsky V., Property and Structure Changes of Sintered Powder Materials by The Treatment in Proceedings of Euro PM 2007 (vol.3), 2007, pp. 439–444.
7. Soda R., Takaqi K., Ozaki K. Numerical simulation of magnetic-aligned compaction with pulsed high magnetic field, Scripta Materialia, vol. 120, 2016, pp. 41–44.
8. Глушенков, В. А. Индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов / В. А. Глушенков. — Самара, 2013. — 148 с.
9. Юсупов, П. Е. Установки для магнитно-импульсной обработки материалов / П. Е. Юсупов, В. А. Глушенков. — Самара, 2013. — 213 с.

САМОЛЁТЫ МАИ: «ОКТЯБРЁНОК» И ДРУГИЕ

Клеванец Ю.В.

Часть 1

Сказать, что в начале прошлого века авиация вошла в моду, значит сказать мало. В те годы в огромном Советском Союзе все хотели быть причастными к полётам в небе. Газеты объявляли разные конкурсы и сборы пожертвований. Собранные энтузиастами деньги передавались в организацию ОСОАВИАХИМ, где планировалась и оплачивалась работа по постройке самолётов.

Не остались в стороне и самые юные школьники — октябрята. На собранные ими деньги был заключён договор с выпускником Московского авиационного института Петром Грушиным, чтобы он спроектировал маленький самолёт. Автор проекта стремился не просто механически выполнить задание, но и привнести в разработку нечто новое, оригинальное. Конструкция имела редко используемую аэродинамическую схему «тандем» с двумя крыльями друг за другом. Основная идея — обеспечить максимальную безопасность полёта даже для неопытного лётчика.

В то время уже было известно, что аэродинамическая схема «тандем» позволяет более «вольно» обращаться с центровкой самолёта. Конструктор вдобавок снабдил свой аппарат зависающими элеронами, которые играли роль собственно элеронов (управление по крену), закрылков (посадочных воздушных тормозов) и даже руля направления (поворот влево — вправо). Все свои конструкторские новации Грушин подтвердил аэродинамическими испытаниями макета самолёта в аэродинамической трубе МАИ. Построенный весной 1936

года самолёт получил статус исследовательского. Назвали его «Октябрёнок». Машина имела маленькие размеры: длина 4,13 м, размах переднего крыла 6 м, заднего 4,4 м, общая площадь крыльев 11 м². Двигатель развивал мощность 27 лошадиных сил. Крылья были выполнены складывающимися для того, чтобы самолёт мог легко разместиться в любом гараже.

Первый полёт «Октябрёнок» совершил в октябре 1936 года. Лётчиком-испытателем стал профессиональный испытатель с авиационного завода «Авиахим» Александр Жуков. Уже первые полёты подтвердили правильность расчётов конструктора Грушина. «Октябрёнок» легко набирал высоту в 1000 метров, мог выполнять некоторые фигуры высшего пилотажа, не сваливался в штопор, а парашютировал (то есть устойчиво опускался со скоростью снижения не более 5 метров в секунду). Разбег при взлёте равнялся 50–60 метрам, пробег при посадке — всего 15 метров. Максимальная скорость достигала 115 км/ч, а посадочная 55 км/ч.

Надо сказать, что сам Пётр Грушин научился летать на своём самолёте и получил пилотское свидетельство.

Самолёт испытывался на разных режимах полёта до начала Великой Отечественной войны. Кроме Грушина и Жукова на нём летали инструкторы аэроклуба при Московском авиационном институте А. Лебединский и С. Холобцев. Испытания показали, что «Октябрёнок» вполне подходил для клубов и лётных школ в качестве дешёвого и простого аппарата для первоначального обучения.

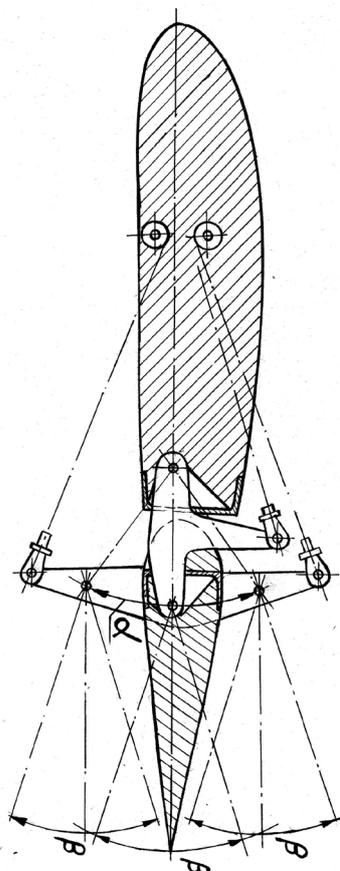


Рис. 1. Схема зависающего элерона

Часть 2

Теперь несколько слов о жизненном и творческом пути конструктора маленького самолётика. Пётр Дмитриевич Грушин родился в 1906 году в городе Вольске Саратовской области (тогда губернии) в семье рабочего. Учился в ремесленном училище, где получил специальности слесаря и тракториста. В 1928 году по направлению райкома комсомола поступил в Ленинградский политехнический институт на авиационный факультет.

В 1930 году в Москве открылся Московский авиационный институт, и Грушин переводится туда. Учился везде на «отлично», участвовал в работе научно-технического общества. В рамках дипломного проекта вместе с ещё двумя студентами спроектировал лёгкий самолёт «Бригадный», предназначенный для разведки и связи в войсках. Проект был отмечен специальным призом ОСОАВИАХИМа. После окончания института направляется на работу в так называемое БОК («Бюро особых конструкций»), в бригаду французского «спеца» Де Лавиля. Однако это бюро вскоре закрывают. Пётр Грушин в 1933 году возвращается в МАИ на должность заместителя главного конструктора в студенческом КБ. С того же года начинает преподавательскую деятельность на кафедре самолётостроения.

Первый большой проект Петра Грушина — самолёт «Сталь-МАИ». В связи с дефицитом дюралюминия в СССР в 1930-х годах проектировались и строились самолёты из нержавеющей стали на точечной и роликовой сварке. «Сталь-МАИ» был, пожалуй, самым крупным из них.

Затем последовал уже известный нам «Октябрёнок», который до начала Великой Отечественной войны стал своеобразной «визитной карточкой» института, его всегда возили с собой на парадах и демонстрациях.

Третья разработка Петра Грушина — самолёт «Ш-тандем» или МАИ-3. Как видно из названия, разработчик решил повторить успех «Октябрёнка», но уже на более крупной машине военного назначения. Двухместный штурмовик с двигателем М-87 на испытаниях показал скорость 488 км/ч.

За МАИ-3 в 1940 году последовал ББ-МАИ, ближний бомбардировщик нормальной аэро-



Рис. 2. Пётр Грушин

динамической схемы с двумя членами экипажа и со скоростью 550 км/ч. В том же 1940 году Грушина направляют на Харьковский авиационный завод (ХАЗ) на должность главного конструктора. В Харькове наш герой разрабатывает двухмоторный истребитель сопровождения Гр-1 и внедряет в производство ближний бомбардировщик Су-2 КБ Сухого.

В 1942 году Грушина переводят в Горький на авиационный завод, там он организывает серийный выпуск самолётов Ла-5. В следующем году он уже в Москве, налаживает производство истребителей Ла-7. За работу в Горьком и в Москве Пётр Дмитриевич награждён двумя орденами Ленина.

После окончания войны Грушин работает в министерстве авиационной промышленности, затем, с 1948 года — деканом самолётостроительного факультета МАИ.

В 1951 году наш герой становится заместителем Главного конструктора Лавочкина. Ведёт в его КБ тематику ракетного авиационного вооружения.

В 1951 году наш герой становится заместителем Главного конструктора Лавочкина. Ведёт в его КБ тематику ракетного авиационного вооружения.

Во второй половине 1950-х годов КБ Лавочкина было расформировано и передано в ракетную промышленность, из него выделили два отдельных бюро: одно начало заниматься космической межпланетной тематикой, второе, под руководством Грушина, — ракетами ПВО и ракетами «воздух – воздух».

Первое большое достижение нашего героя на новом поприще — разработка и постановка на вооружение в 1957 году ракеты для стационарного комплекса ПВО С-25, а затем и для передвижного комплекса С-75. В 1960-х годах были разработаны ракеты для уничтожения летящих целей, как на средней, так и на большой дальности, в том числе и боеголовок баллистических ракет. За эти «изделия» Пётр Грушин избран академиком АН СССР, стал дважды Героем Социалистического труда. С 1966 по 1986 год — член ЦК КПСС.

Умер герой нашего рассказа в 1993 году.

Часть 3

А теперь вернёмся в 1930-е годы, во время работы Петра Грушина в МАИ и рассмотрим подробнее самолёты, разработанные студенческим КБ.

Первой машиной, спроектированной и построенной под руководством П.Д. Грушина в институтском КБ, стал, как здесь уже отмечалось, самолёт «Сталь-МАИ».

В начале 1930-х годов в Советском Союзе была выдвинута концепция дальнего бомбардировщика и разведчика планерной схемы. Уже имеющееся к тому времени производство дюралюминия плюс разработанный и освоенный металлургической промышленностью стальной конструкционный сплав типа 40ХМА давали возможность изготовления крыла большого удлинения для тяжёлой машины. За счёт большого крыла и имеющегося лицензионного двигателя БМВ-6 (в СССР назывался М-17) можно было надеяться получить радиус действия около 5000 км в варианте бомбардировщика и не менее 6000 км в варианте разведчика. В результате реализации этой концепции согласно Постановлению Революционного Военного совета и Правительства СССР на «фирме» Туполева появился самолёт АНТ-25, прославившийся дальними перелётами.

В то же самое время была предложена концепция самолёта той же схемы, но меньших размеров в качестве разведчика-бомбардировщика средней дальности. Такой машиной и стал «Сталь-МАИ». Идею проектирования уменьшенного АНТ-25 подал известный в то время конструктор Д.П. Григорович, совмещавший практическую работу с должностью заведующего кафедрой самолётостроения в МАИ.

Пётр Грушин включился в работу по этому проекту в 1931 году, ещё будучи студентом, а вернувшись в родной институт после получения диплома и недолгой карьеры в другом КБ, фактически возглавил коллектив инженеров, студентов и рабочих.

Поскольку дюралья в стране производилось недостаточно, а «средних» самолётов требовалось намного больше, чем дальних, изначально было решено строить машину из стали. Кроме конструкционных легированных сталей к тому времени в СССР была получена нержавеющая сталь типа ЭНЕРЖ.

Именно такие стали и были



Рис. 3. Самолёт «Октябрёнок»

выбраны в качестве основных конструкционных материалов для нового самолёта. Параллельно с конструированием велась отработка технологии изготовления и соединения деталей и узлов из тонкого стального листа.

К 1933 г. двигателисты модернизировали исходный мотор М-17, внедрив цельнолитой блок цилиндров, повысив обороты и добавив понижающий редуктор. Таким двигателем с индексом М-34 мощностью в 830 л. с. и оснащённым «Сталь-МАИ». К мотору прилагался металлический винт изменяемого шага.

Опишем конструкцию самолёта. «Сталь-МАИ» был низкопланом нормальной аэродинамической схемы с крылом большого удлинения, убирающимся шасси и двухместной закрытой кабиной.

Крыло самолёта двухлонжеронное, большой относительной толщины (16%) и большого удлинения (8,3). Площадь крыла 40 м². Передний лонжерон получен сваркой из гнутых стальных нержавеющей профилей, задний трубчатый, из конструкционной стали. Нервюры крыла сварные из гнутых профилей. Обшивка крыла — тонкий стальной лист (0,3–0,5 мм) с рифтами для повышения жёсткости. В корне консолей и в местах навески шасси обшивка дополнительно подкреплялась изнутри стальным гофром. Обшивка элеронов полотняная.

Фюзеляж типа «полумонокок», также изготовлен из стального нержавеющей листа разной толщины. Соединение силовых элементов с обшивкой — точечной сваркой.

Шасси из труб конструкционной стали, с пневматической амортизацией. Уборка передних стоек шасси производилась ручной лебёдкой.

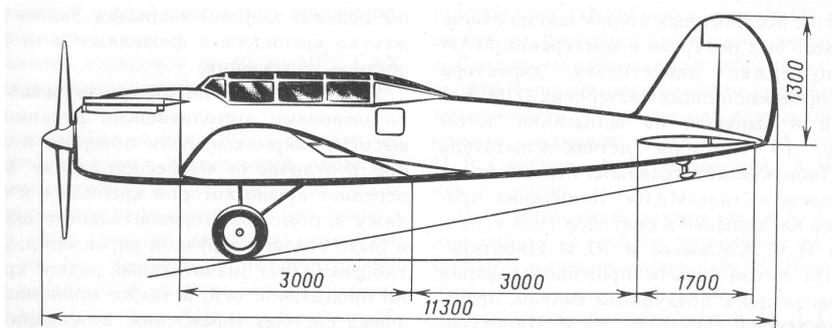


Рис. 4. Схема самолёта «Сталь-МАИ»

Оперение трубчатое с обшивкой из стального листа, обшивка рулевых поверхностей — полотно. Скорость 320 км/ч, посадочная скорость 100 км/ч.

Самолёт был построен в 1934 году, что очень быстро, учитывая то, что технологии на этой машине только отрабатывались. Это был один из первых стальных самолётов в мире.

Испытывали «Сталь-МАИ» лётчик Юлиан Пионтковский и Пётр Грушин. В одном из полётов из-за недоведенной конструкции винта самолёт попал в аварию и был повреждён. В течение следующего года машину восстановили, однако военный заказчик потерял к ней интерес из-за появления проектов более скоростных бомбардировщиков.

Затем, параллельно с проектированием «Октябрёнка», Пётр Грушин занимается доработкой серийного «кукурузника» У-2. На самолёт установили закрытую кабину, капот двигателя, дополнительные баки. Скорость увеличилась на 20 км/ч, дальность до 830 км, однако оказалось, что игра не стоит свеч: новый скоростной «кукурузник» экономически проигрывал старому, поскольку оказался дороже в изготовлении.

На основании опыта постройки «Октябрёнка» в 1936 году Грушин предлагает проект военного самолёта по схеме «тандем».

Вообще схема «тандем» основана на аэродинамическом эффекте подхвата отклонённой вниз струи воздуха с переднего крыла задним крылом с ещё большим отклонением вниз. При этом, хотя оба крыла и примерно равны по площади, но их общие размеры и суммарное сопротивление потоку всё равно меньше, чем на таком же самолёте нормальной аэродинамической схемы.

И опять же, новая машина должна была стать экспериментальной по части технологии, поскольку основным конструкционным материа-

лом для неё была выбрана тонкая авиационная фанерка на клее ВИАМ (Всесоюзный институт авиационных материалов). Если на «Сталь-МАИ» экспериментировали со сваркой, то здесь разрабатывались варианты склеивания. Самолёт назывался по-разному: «Ш-тандем», «МАИ-3», «Тандем МАИ». Предполагалось использование его в качестве лёгкого штурмовика.

Мотор был выбран звездообразный М-87 мощностью 930 л. с. (французская лицензия фирмы «Гном»). Такими же моторами оснащались бомбардировщики ДБ (в дальнейшем — Ил-4). К мотору прилагался трёхлопастный винт изменяемого шага.

Двухместная машина (со стрелком в стеклянной башне) была небольшой по размерам. Длина всего 8,5 метров, размах переднего крыла 11 метров.

Фюзеляж типа «монокок» с толстой силовой обшивкой почти без подкрепляющих элементов (примерно так после войны строился чехословацкий планер «Бланик»). Крыла было два, переднее составляло 55 % общей площади. Заднее крыло оснащалось элевонами (рулевые поверхности с двумя осями качания) и навесным вертикальным оперением. Основу конструкции крыльев составлял центральный кессон, выклеенный из фанеры. К нему крепились носок и хвостик крыла, тоже фанерные. Шасси убирающееся, с гидроприводом.

Вооружение: 5 пулемётов ШКАС (один у стрелка и 4 спереди), 200 кг бомб.

Самолёт был построен в 1937 году, с декабря того же года начались испытания. Летал лётчик-испытатель Петр Стефановский. Испытания длились более трёх лет, а поскольку схема самолёта была совершенно новой, постоянно требовались какие-то доводки. К примеру, из-за небольшого крыла была заметна реакция от винта, машина у невнимательного пилота могла «водить носом». При испытаниях была получена скорость у земли 406 км/ч, максимальная — 488 км/ч.

После Второй Мировой войны в США начал работу знаменитый фанат схемы «тандем», конструктор Берт Рутан. Именно ему удалось довести самолёты такой схемы до возможного совершенства.

Последним предвоенным самолётом, разработанным и построенным в КБ МАИ, стал ближний бомбардировщик ББ-МАИ. Это самолёт нормальной схемы, с носовым колесом, внеш

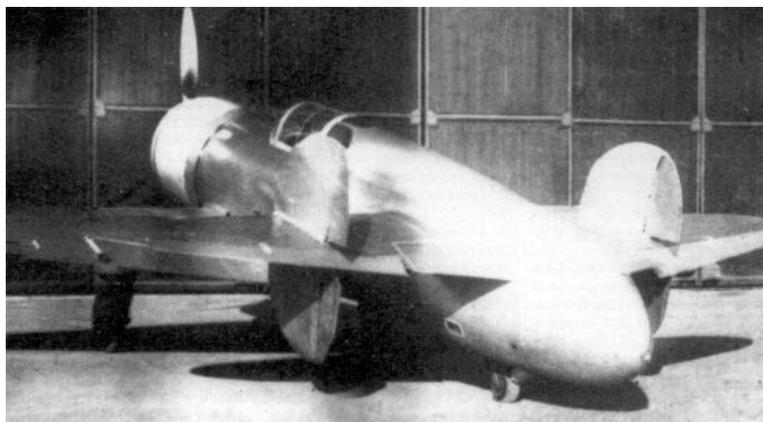


Рис. 5. Самолёт Ш-тандем»

не похожий на американскую «Кобру».

Для самолёта был выбран мотор М-105 мощностью 1050 л. с. Таким же двигателем оснащались истребители ЛаГГ, Як, бомбардировщик Пе-2.

Отличительными особенностями ББ-МАИ кроме носового колеса был острый, как у «Кобры» нос и малое крыло (соответственно, с большими нагрузками — до 230 кг/м²). Большая нагрузка на крыло предопределила введение в конструкцию автоматического предкрылка для облегчения пилотирования на малых скоростях.

Стойка с передним колесом убиралась по полёту, основные стойки шасси «под себя», к фюзеляжу. По обеим сторонам ниши передней стойки шасси в фюзеляже располагались два радиатора.

Основной материал — тонкая фанерка, как и на МАИ-3. Соответственно, основной способ соединения деталей и узлов — склеивание на клею ВИАМ Б-3.

Фюзеляж типа «монокок», с двухместной кабиной для пилота и стрелка. Крыло конструктивно состояло из фанерных кессонов со стенками разной толщины: от 3 до 25 мм. Фанерным в це-

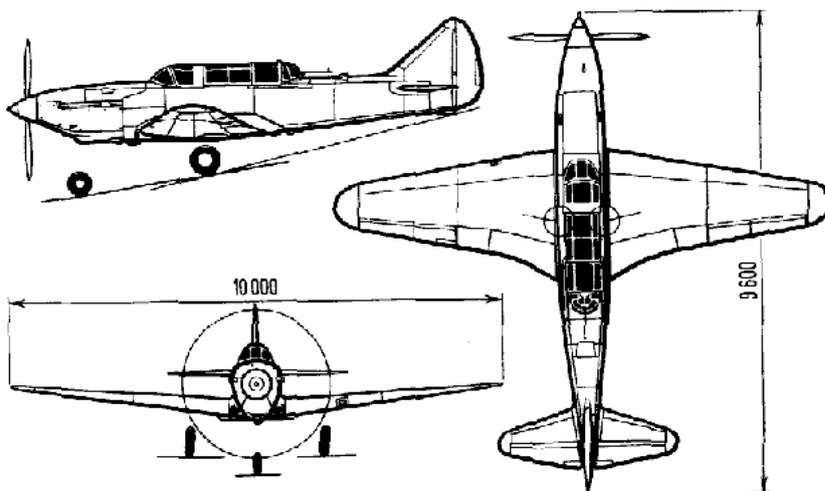


Рис. 6. Схема самолёта «ББ-МАИ»

лом было и оперение.

Самолёт был построен в конце 1940 года. Испытывался до самого начала Великой Отечественной войны. Испытатель — пилот Алексей Гринчик. Была достигнута максимальная скорость 550 км/ч (по другим сведениям 508 км/ч).

С началом Великой Отечественной войны КБ при Московском авиационном институте было закрыто. Студенты стали техниками на подмосковных аэродромах и внесли свой вклад в успех битвы под Москвой.

Список использованных источников

1. Горбенко, К.С. Самолёты строим сами / К.С. Горбенко, Ю.В. Макаров. — М., 1989.
2. Соболев, Д.А. Самолёты особых схем / Д.А. Соболев. — М., 1989.
3. Шавров, В.Б. История конструкций самолётов в СССР до 1938 года / В.Б. Шавров. — М., 1994.
4. Шавров, В.Б. История конструкций самолётов в СССР. 1938–1950 гг. / В.Б. Шавров. — М., 2001.