

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

# МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

*XVI Всероссийская молодежная научная конференция*

Том 2



Уфа 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

# **МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

*XVI Всероссийская молодежная научная конференция*

Том 2

Научное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ  
**ISBN 978-5-4221-1643-0**  
**ISBN 978-5-4221-1645-4 (Т. 2)**

Уфа 2022

Мавлютовские чтения : материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции : в 6 томах [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2022.

Том 2. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – URL: [https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El\\_izd/2022-200.pdf](https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-200.pdf)

Содержатся статьи, включенные в программу XVI Всероссийской молодежной научной конференции, состоявшейся в УГАТУ 25–27 октября 2022 г.

### **Организационный комитет конференции:**

#### **Председатель оргкомитета:**

Новиков С. В. – ректор ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ), канд. экон. наук, доцент (г. Уфа, Россия).

#### **Зам. председателя оргкомитета:**

Еникеев Р. Д. – первый проректор по науке УГАТУ, д-р техн. наук, профессор (г. Уфа, Россия);

Агеев Г. К. – проректор по инновационной деятельности УГАТУ, канд. техн. наук, доцент (г. Уфа, Россия).

#### **Члены оргкомитета:**

Вдовина И. В. – и. о. декана ФЗЧС, канд. хим. наук, доцент (г. Уфа, Россия);

Ахмедзянов Д. А. – декан ФАДЭТ, д-р техн. наук, профессор (г. Уфа, Россия);

Ларцева С. А. – директор ИНЭК, канд. экон. наук, доцент (г. Уфа, Россия);

Хусаинов Ю. Г. – директор ИАТМ, канд. техн. наук, доцент (г. Уфа, Россия);

Уразбахтина Ю. О. – декан АВИАЭТ, канд. техн. наук, доцент (г. Уфа, Россия);

Ковтуненко А. С. – и. о. декана ФИРТ, канд. техн. наук, доцент (г. Уфа, Россия);

Разяпов Т. В. – начальник отдела проектных инициатив (г. Уфа, Россия);

Бикбулатова О. Ф. – начальник УИТ (г. Уфа, Россия).

#### **Отв. секретарь оргкомитета:**

Никонова А. И. – аналитик отдела проектных инициатив (г. Уфа, Россия).

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

*Материалы публикуются в авторской редакции*

Ответственный за выпуск *Т. В. Разяпов*

Предпечатная подготовка *Л. А. Вяземская*

Программирование и компьютерный дизайн *О. М. Толкачёва*

*Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.*

Подписано к использованию: 25.10.2022

Объем: 27,2 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Тел.: +7-908-35-05-007

e-mail: rik@ugatu.su

## СЕКЦИЯ 2.1 НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 539

Д. У. АБДУЛЛИНА  
*dina.abdullina25@gmail.com*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. ДМИТРИЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

### РАСПЫЛЕНИЕ КРИСТАЛЛА БОМБАРДИРОВКОЙ МОЛЕКУЛАМИ В РАМКАХ МОДЕЛИ ФРЕНКЕЛЯ – КОНТОРОВОЙ

**Аннотация.** В настоящее время различные методы модификации поверхности приобретают все большую популярность в силу своей возможности значительно увеличивать ресурс изделий из самых разных материалов. Одним из таких методов является ионная имплантация в процессе которой поверхность металла или сплава подвергается бомбардировке высокоэнергетическими ионами или молекулами. Для определения оптимальных параметров взаимодействия поверхности с бомбардируемыми частицами в ряде случаев может быть успешно использовано моделирование. В данной работе представлен численный эксперимент реализованный методом молекулярной динамики, где в одномерном приближении моделируется удар молекулы из атомов  $K$  со скоростью  $V_0$  о свободный конец цепи Френкеля-Конторовой. В зависимости от значений  $K$  и  $V_0$  наблюдаются разные сценарии взаимодействия молекулы с цепью. Интересно, что коэффициент распыления  $Y$  как функция  $V_0$  демонстрирует немонотонную зависимость. Это объясняется тем, что сверхзвуковые краудионы могут иметь дискретный набор скоростей распространения. Когда  $V_0$  таково, что эффективно возбуждаются сверхзвуковые краудионы, последние передают энергию вглубь цепочки, и распыление минимально. Полученные результаты качественно объясняют физику бомбардировки поверхности кристалла атомными кластерами.

**Ключевые слова:** метод молекулярной динамики; коэффициент распыления; сверхзвуковые краудионы.

#### ***Введение***

Ионные пучки с различными энергиями могут быть использованы для формирования формы [1], синтеза [1] и изменения свойств материалов [2], как резюмируется в обзорах, таких как [1,3]. Взаимодействие ускоренных ионов с поверхностью кристалла достаточно сложное, особенно для высокоэнергетических ионных пучков. Для так называемых линейных каскадов столкновений, когда генерируется малая плотность точечных дефектов [4], задача упрощается и может быть решена с использованием классических физических моделей. Каскады в

металлах близки к линейным при бомбардировке ионами с энергиями ниже 10 кэВ [3].

Атомно-слоевое осаждение – это процесс осаждения тонкой пленки, известный своей способностью создавать слои контролируемой толщины и состава [5]. Распыление – это процесс, в котором атомы или атомные кластеры твердого материала выбрасываются с его поверхности падающими ионами или частицами [3]. Бомбардировка поверхности низкоэнергетическими ионами (от 10 эВ и выше) приводит к их осаждению [5]. Если требуется активация поверхности, для осаждения атомарных слоев можно использовать ионы с более высокой энергией, до 5 кэВ.

Точечные дефекты играют очень важную роль в релаксации структуры материалов при облучении или ионно-лучевой обработке [4]. Межузельные атомы по сравнению с вакансиями имеют более высокую энергию образования, но меньшую энергию миграции. Междоузлия в виде краудионов обладают очень низкой энергией миграции и, следовательно, высокой миграционной способностью, что затрудняет их экспериментальный анализ [6]. По этой причине структура и движение краудионов часто анализируются с использованием методов компьютерного моделирования, таких как молекулярная динамика [7], Монте-Карло [7], многомасштабное моделирование [9] и *ab initio* моделирование [10].

Краудионы могут двигаться по плотным атомным рядам с дозвуковой и даже сверхзвуковой скоростью. Статические или дозвуковые краудионы хорошо изучены [9]. Сверхзвуковые краудионы (или антикинки) изучались с помощью одномерных решеток Клейна-Гордона [11], двумерных решеток Морза [12], ОЦК [13] и ГЦК-решеток [10].

Движущиеся краудионы переносят массу и энергию, играя важную роль в структурных превращениях материалов при высокоэнергетических ударах. Было показано, что сверхзвуковые  $N$ -краудионы (множественные антикинки) переносят энергию более эффективно, поскольку они могут быть возбуждены с меньшей энергией и перемещаться на большее расстояние, чем сверхзвуковые 1-краудионы (одиночные антикинки) [11]. Сверхзвуковые 2-краудионы можно возбудить, бомбардируя поверхность кристалла молекулами [14].

В работе [14] цепочка Френкеля-Конторовой использовалась для изучения переноса массы краудионами, инициируемого ударом молекулы о конец цепи. Было показано, что молекуле требуется гораздо меньше энергии для инициирования краудионов в цепи по сравнению с одиночным атомом.

### Методика

В данной работе используется модель Френкеля-Конторовой для анализа модификации поверхности кристалла при ударе молекулы при различных значениях скорости удара  $V_0$  и числа атомов в молекуле  $K$ . Цепочка Френкеля-Конторовой – это цепочка взаимодействующих частиц, помещенных в синусоидальный локальный потенциал [15]. Рассмотрим молекулу из  $K$  атомов, движущуюся со скоростью  $V_0$  к левому концу цепи, как показано на рис. 1. Атомы в молекуле пронумерованы индексом  $n = 1, \dots, K$ , а атомы в цепочке с индексом  $i = 1, \dots, I$ . Общее число атомов в системе равно  $K + I$ .

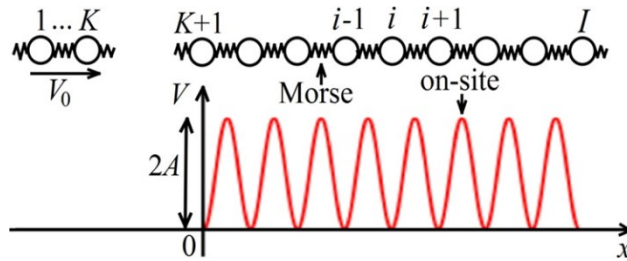


Рис. 1. Модель кристалла Френкеля-Конторовой

Гамильтониан молекулы и цепной системы определяется выражение

$$H = \sum_i^I \frac{m}{2} \left( \frac{du_i}{dt} \right)^2 + \sum_{i=1}^{I-1} U(u_{i+1} - u_i) + \sum_{i=1}^I V(u_i) \quad (1)$$

Члены в правой части уравнения (1) дают кинетическую энергия атомов массы  $m = 1$ , энергию взаимодействия ближайших соседей через потенциал Морза и энергию атомов в локальном потенциале. Локальный потенциал имеет амплитуду  $A$  и период, равный единице, т.е. равному равновесному межатомному расстоянию  $r_m$ . Синусоидальный локальный потенциал введен для описания взаимодействия рассматриваемого плотноупакованного атомного ряда кристаллической решетки с окружающими его атомами. Потенциал действует только в области  $x > 0$ , как показано на рис. 1, так как поверхность кристалла

расположена при  $x = 0$ . Прежде чем молекула достигнет конца цепочки, она движется в вакууме, не взаимодействуя с потенциалом на месте. Амплитуда локального потенциала  $A = 2$ , что было обосновано в работе [14].

Рассматривались молекулы, имеющие максимальное число атомов  $K = 4$  с максимальной скоростью  $V_0 = 50$ . Это означает, что максимальная энергия снаряда в нашем моделировании равна  $E_0 = 5000$ . Этой энергии достаточно, чтобы разорвать 5000 межатомных связей, так как в наших расчетах энергия связи  $D = 1$ . Напомним, что в металлах энергия испарения составляет несколько эВ на атом, и, таким образом, испарение 5000 атомов металла будет стоить около 10 кэВ. Это означает, что мы моделируем линейный режим распыления [3], когда образуется относительно небольшое количество дефектов.

## Результаты моделирования

### 1. Сценарии столкновения молекулы с цепью.

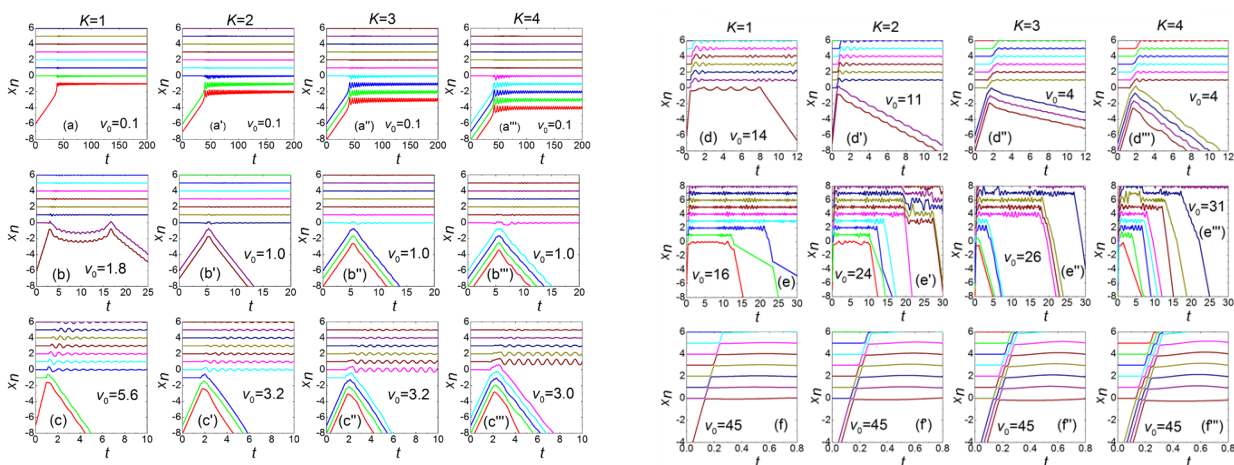


Рис. 2. Сценарии столкновения молекулы с цепочкой (небольшие скорости молекул слева и большие скорости молекул справа).

В первом ряду рис. 2, панели (a)-(a'''), скорость столкновения мала,  $V_0 = 0,1$ , и молекулы осаждаются в конце цепочки (на поверхности кристалла). Во второй строке рис. 2 скорость столкновения  $V_0 = 1,8$  в (b) и  $V_0 = 1,0$  для (b')-(b'''). В (b')-(b''') молекулы отражаются от цепочки почти упруго, так как скорость молекул после столкновения лишь немного меньше  $V_0$ . Небольшая часть энергии  $E_0$  отдается на возбуждение колебаний в цепи и в молекулах. В третьем ряду рис. 2, панели (c)-(c'''), во всех случаях отраженная молекула забирает один атом из



цепи. Энергия молекулы расходуется на отрыв одного атома от цепи и возбуждение колебаний в цепи и в молекулах. Можно ожидать, что дальнейшее увеличение начальной скорости молекулы приведет к увеличению процесса распыления, но это не так в четвертом ряду рис. 2 (справа), панели (d)-(d'''). Здесь начальная скорость молекулы больше, чем в (c)-(c''') для любого  $K$ . Падающие молекулы на рис. 2 (c)-(c''') (слева) расходуют свою энергию на создание сверхзвукового краудиона (антикинка), передающего энергию вглубь цепи. Энергия колебаний, которая остается вблизи конца цепочки, недостаточно для разрыва межатомных связей.

Дальнейшее увеличение скорости молекулы  $V_0$  приводит к созданию в цепочке вакансий, дозвуковых и сверхзвуковых краудионов и увеличению коэффициента распыления  $Y$ , см. рис. 2, панели (e)-(e'''). Примечательно, что отрыв атомов от цепочки происходит не мгновенно; атомы отрываются от цепочки один за другим, и процесс распыления растягивается во времени. Это связано с тем, что передача энергии фононами происходит довольно медленно. На панелях (e)-(e''') рис. 2 сверхзвуковые краудионы не образовывались и видны колебания атомов большой амплитуды, возникающие за счет ударов молекул. С определенной вероятностью энергия этих колебаний расходуется на распыление атомов, и они один за другим удаляются от цепочки. Процесс распыления замедляется за счет того, что энергия цепочки уносится распыляемыми атомами, а также за счет медленного переноса энергии вглубь цепочки фононами.

Нижний ряд рис. 2, панели (f)-(f'''), построен для скорости столкновения  $V_0 = 45$ . Видно, что формируются сверхзвуковые  $K$ -краудионы, которые эффективно передают энергию вглубь цепь. Колебания атомов большой амплитуды, как на рис. 2 (e)-(e'''), не видны.

Можно сделать вывод, что процесс распыления имеет немонотонную зависимость от начальной скорости молекулы  $V_0$ .

## 2. Коэффициент распыления.

Коэффициент распыления, т. е. среднее число атомов, удаляемых из мишени в расчете на один налетающий атом, является важнейшей характеристикой

распыления. В рамках одномерной модели можно моделировать только нормальное падение.

$$Y = \frac{L - K}{K}, \quad (2)$$

где  $K$  – число атомов в молекуле,  $L$  – число атомов с отрицательными координатами и отрицательными скоростями,  $(L - K)$  – количество распыленных атомов.

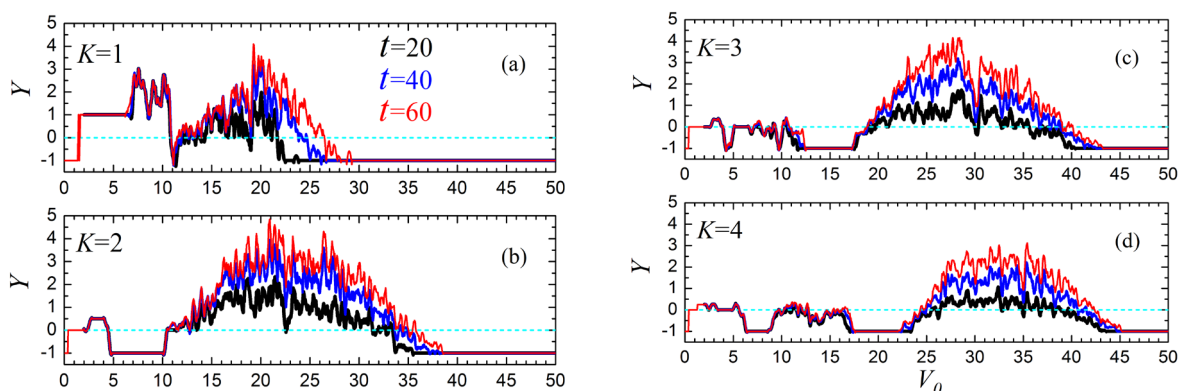


Рис. 3. Коэффициент распыления в зависимости от скорости бомбардирующей молекулы для молекул с числом атомов (a)-(d) от  $K = 1$  до 4 соответственно

Коэффициент распыления показан для  $t = 20$  (черный),  $t = 40$  (синий) и  $t = 60$  (красный). Распыление действительно наблюдается при  $Y > 0$ . При  $Y = 0$  молекула отражается от цепи. При  $Y < 0$  часть молекулы (в случае  $Y = 1$  вся молекула) осаждается в цепочке.

Для получения результатов, представленных на рис. 3, диапазон начальной скорости молекулы  $0 < V_0 \leq 50$  сканировался с шагом 0,05, а коэффициент распыления рассчитывался по уравнению (2) при  $t = 20$  (черные линии),  $t = 40$  (синие линии) и  $t = 60$  (красные линии). Эта презентация помогает увидеть, как распыление развивается во времени.

Отрицательное значение коэффициента распыления означает, что часть налетающей молекулы (в случае  $Y = 1$  вся молекула) осаждается в цепи. Осаждение молекул, т.е. коэффициент распыления равный -1, наблюдается в нескольких окнах начальной скорости молекулы. При малых скоростях столкновения молекула прилипает к концу цепи, как в первом ряду рис. 2 (справа), а при больших начальных скоростях молекула образует кинки, переносящие массу вглубь цепи.

Когда коэффициент распыления равен нулю, молекула отражается от цепи. При малой начальной скорости молекулы отражение близко к упругому, как на рис. 2 (b')-(b'''). При более высокой начальной скорости молекулы отраженная молекула может инициировать распространение сверхзвукового кинка в цепочке, как на рис. 2 (d)-(d''').

Положительный коэффициент распыления означает, что молекула отражается и часть цепи распыляется. Максимум коэффициента распыления смещается в сторону больших скоростей молекул с увеличением числа атомов  $K$  в молекуле. Коэффициент распыления немонотонно зависит от скорости молекул.

Молекула с достаточно большой энергией в рассматриваемом диапазоне начальных скоростей  $V_0$  возбуждает в цепочке один или несколько сверхзвуковых краудионов (антикинков). Образуются и дозвуковые пары кинк-антикинк. Скорость сверхзвуковых краудионов  $V_k$ , возбуждаемых молекулой с начальной скоростью  $V_0$ , представлена на рис. 4. Панели (a)–(d) приведены результаты для молекул с  $K =$  от 1 до 4 атомов соответственно. Было идентифицировано шесть различных типов сверхзвуковых краудионов, которые обозначены греческими цифрами. Только краудионы типа *VI* могут иметь скорости в определенном диапазоне, тогда как остальные пять типов краудионов распространяются со скоростью, характерной для этого типа краудионов.

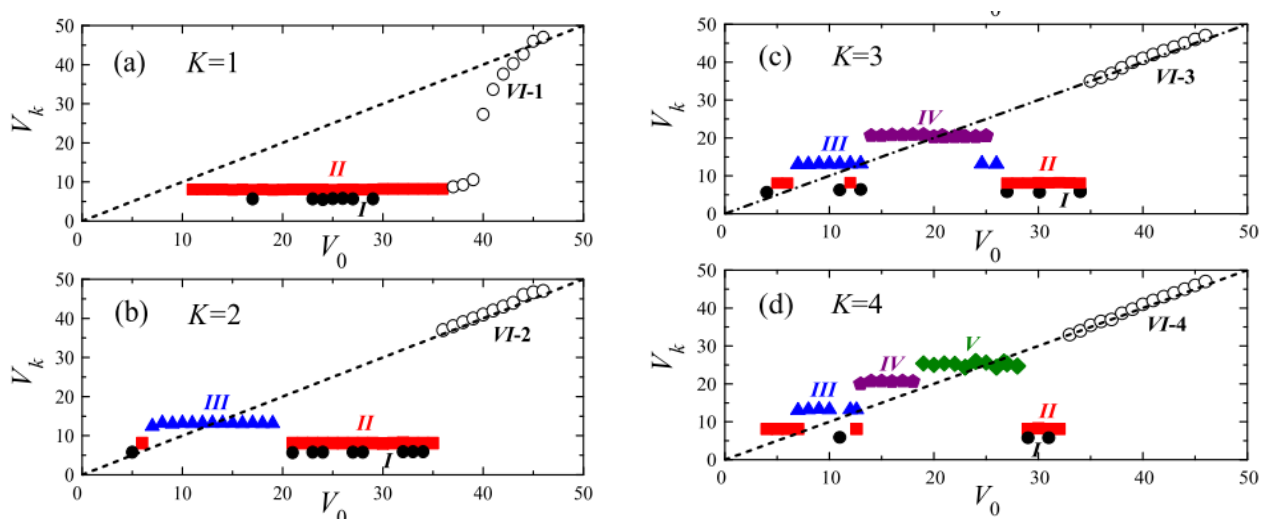


Рис. 4. Скорости сверхзвуковых краудионов, возбуждаемых в цепочке молекулами со скоростью  $V_0$ . На (a)-(d) число атомов в молекуле  $K$  равно от 1 до 4 соответственно. Выделено шесть типов сверхзвуковых краудионов; они пронумерованы греческими цифрами

Мгновенные профили пяти типов сверхзвуковых краудионов (от типа *I* до типа *V*) представлены на рис. 6. Они возникли в результате бомбардировки молекулами с параметрами:  $K = 1, V_0 = 25$  (черные кружки);  $K = 1, V_0 = 15$  (красные квадраты);  $K = 2, V_0 = 15$  (синие треугольники);  $N = 3, V_0 = 20$  (фиолетовые пятиугольники);  $K = 4, V_0 = 25$  (зеленые ромбы). Горизонтальные полосы указывают ширину толпы. Краудионы с *I* по *III* представляют собой одиночные антикинки. Среди них самым широким является краудион типа *I*, его ширина составляет шесть узлов решетки, скорость распространения  $V_k = 5,7$ . Краудион *II* более узкий (пять узлов решетки), его скорость распространения  $V_k = 8,1$ . Самый узкий одиночный антикинк *III* (четыре узла решетки) распространяется со скоростью  $V_k = 13,2$ . Двойной антикинк *IV* имеет ширину в шесть узлов решетки, скорость распространения  $V_k = 20,3$ . Тройной антикинк *V* имеет ширину в восемь узлов решетки, скорость распространения  $V_k = 25,6$ . Описаны подобные сверхзвуковые краудионы. Савиным с сотрудниками в [11] для цепочки с кубическим межузловым и внутриузловым потенциалами  $\phi^4$ . Их модель также поддерживает конечное число сверхзвуковых скоростей антикинка, при которых они не излучают фононы. Неизлучающий краудион должен иметь ширину, равную целому числу ступеней решетки, а его суммарная амплитуда должна совпадать с целым числом внутренних потенциальных ширин (см. рис. 6).

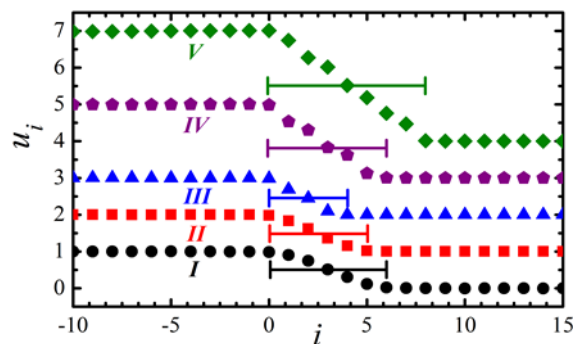


Рис. 5. Профили сверхзвуковых краудионов. Снизу вверх:

- тип *I*:  $K=1, V_0=25$  с  $V_k=5,7$ ;
- тип *II*:  $K=1, V_0=15$  с  $V_k=8,1$ ;
- тип *III*:  $K=2, V_0=15$  с  $V_k=13,2$ ;
- тип *IV*:  $K=3, V_0=20$  с  $V_k=20,3$ ;
- тип *V*:  $K=4, V_0=25$  с  $V_k=25,6$

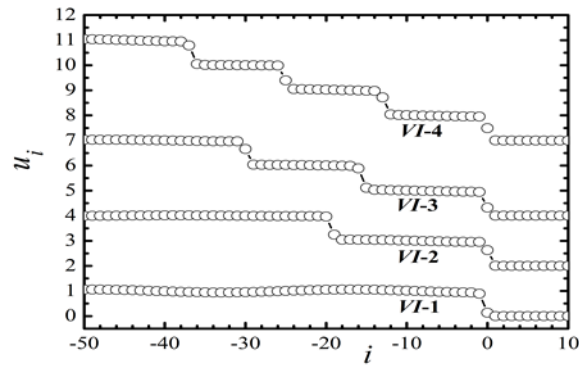


Рис. 6. Профили сверхзвуковых краудионов типа VI при  $t=11$ . Краудионы получаются бомбардировкой молекулами со скоростью  $V_0=45$  и числом атомов от  $K=1$  до  $K=4$ . Все краудионы движутся со скоростью  $V_k \approx 46$

Сверхзвуковые краудионы типа VI могут двигаться с любой скоростью в определенном диапазоне скоростей (см. рис. 4), что отличает их от сверхзвуковых краудионов других типов. Профили краудионов типа VI показаны на рис. 6 при  $t = 11$ . Множественные краудионы типа VI неустойчивы и относительно быстро расщепляются на одиночные краудионы типа VI. Показанные на рис. 6 краудионы получены путем бомбардировки молекулы, имеющие скорость  $V_0 = 45$  и число атомов от  $K = 1$  до  $K = 4$ , обозначаются соответственно от VI-1 до VI-4. Расстояние между субкинками увеличивается со временем.

### Заключение

В данной работе моделировался удар молекул с  $K = 1$  до 4 атомов на свободный конец цепи Френкеля-Конторовой. В зависимости от скорости столкновения  $V_0$  были описаны различные сценарии столкновения. Два основных результата столкновения – осаждение молекул и выбрасывание атомов из цепочки. Было обнаружено, что распыление наблюдается в окне скоростей столкновений при любом  $K$ . Этот эффект объясняется образованием сверхзвуковых краудионов (антикинков), распространяющихся по цепочке. При умеренных значениях  $V_0$  образуются сверхзвуковые краудионы типов I–V, они могут распространяться без излучения фононных волн только с определенной скоростью, характерной для каждого типа краудионов. При больших скоростях удара образуются сверхзвуковые краудионы типа VI, которые могут иметь скорость в определенном диапазоне. Когда сверхзвуковые краудионы уносят энергию удара вглубь цепочки, распыление минимально и увеличивается, когда энергия переносится медленно движущимися фононами и относительно долго остается вблизи конца цепочки.

## **Благодарности**

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «УГАТУ» (соглашение №075-03-2022-318/1) молодежная научно-исследовательская лаборатория НОЦ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» для Д.У. Абдуллиной (проведение расчетов), гранта НШ-4320.2022.1.2 для Е.А. Корзниковой (анализ и обсуждение полученных результатов), гранта РФФ 21-12-00229 для С.В. Дмитриева (постановка задачи, концептуализация исследования).*

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Som T., Kanjilal D. Nanofabrication by Ion-Beam Sputtering: Fundamentals and Applications // CRC. 2012.
2. Huang H.-C., Dadap J.I., Malladi G., Kymissis I., Bakhru H., Osgood R. M. Helium-ion-induced radiation damage in LiNbO<sub>3</sub> thin-film electro-optic modulators // Opt. Express. 2014. 19653: 22.
3. Sigmund P. Mechanisms and theory of physical sputtering by particle impact // Nucl. Instrum. Meth. B. 1987. 1-20: 27.
4. Debelle A., Crocombette J.-P., Boulle A., Chartier A., Jourdan T., Pellegrino S. R. M., Bachiller-Perea D., Carpentier D., Channagiri J., Nguyen T.H., Garrido F., Thom'e L. Lattice strain in irradiated materials unveils a prevalent defect evolution mechanism // Phys. Rev. Materials. 2018. 013604:2.
5. Martin P. M. Deposition technologies: an overview // Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. Third Edition. 2010. 1-30.
6. Mason D.R., Sand A.E., Yi X., Dudarev S. L. Direct observation of the spatial distribution of primary cascade damage in tungsten // Acta Mater. 2018. 905-917: 144.
7. Fang J., Liu L., Gao N., Hu W., Deng H. Molecular dynamics simulation of the behavior of typical radiation defects under stress gradient field in tungsten // J. Appl. Phys. 2021. 125103:130.
8. Castin N., Bakaev A., Bonny G., Sand A.E., Malerba L., Terentyev D. On the onset of void swelling in pure tungsten under neutron irradiation: An object kinetic Monte Carlo approach // J. Nucl. Mater. 2017. 280-293: 493.
9. Dudarev S.L., Mason D.R., Tarleton E., Ma P.-W., Sand A. E. A multi-scale model for stresses, strains and swelling of reactor components under irradiation // Nucl. Fusion 2018. 126002: 58.
10. Korznikova E.A., Shunaev V.V., Shepelev I.A., Glukhova O.E., Dmitriev S.V. Ab initio study of the propagation of a supersonic 2-crowdion in fcc Al // Comp. Mater. Sci. 2022. 111125: 204.
11. Zolotaryuk Y., Eilbeck J.C., Savin A.V. // Bound states of lattice solitons and their bifurcations, Physica D. 1997. 81-91: 108.
12. Dmitriev S.V., Korznikova E.A., Chetverikov A.P. Supersonic N-crowdions in a two-dimensional Morse crystal // J. Exp. Theor. Phys. 2018. 347-352: 126.
13. Shepelev I.A., Bachurin D.V., Korznikova E. A., Dmitriev S.V. Highly efficient energy and mass
14. Marjaneh A., Saadatmand D., Evazzade I., Babicheva R., Soboleva E., Narasimalu S., Zhou K., Korznikova E., Dmitriev S. Mass transfer in the Frenkel-Kontorova chain initiated by molecule impact // Phys. Rev. E. 2018. 023003: 98.
- transfer in bcc metals by supersonic 2-crowdions // J. Nucl. Mater. 2022. 153841:568.
15. Braun O.M., Kivshar Y.S. The Frenkel-Kontorova model: concepts, methods, and applications // Springer-Verlag. 2004.

УДК 539

А. А. АДигамова, Ж. А. Яруллина

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

И. Р. Волик

*Уфимское моторостроительное производственное объединение*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Р. Г. Зарипова, канд. техн. наук, доц.  
С. Р. Шарипова

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СЛС СПЛАВА ВТ6 ПОСЛЕ ГАЗОВОГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ**

**Аннотация.** Исследованы структура, пористость и механические свойства титанового сплава ВТ6, полученного методом селективного лазерного сплавления (СЛС), подвергнутого газовому изостатическому прессованию (ГИП). Показано, что ГИП позволяет устранить дефекты (пористость) и способствует повышению прочности при одновременном повышении пластических свойств.

**Ключевые слова:** Аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление (СЛС), титановый сплав, дефекты, механические свойства, газовое изостатическое прессование.

Аддитивные технологии (АТ) привлекают все большее внимание не только исследователей, но и промышленных производителей благодаря возможности создания изделий сложной по геометрии формы, которую зачастую невозможно получить традиционными методами. Использование современных методов аддитивного производства требуется лишь наличие оборудования, позволяющего производить печать изделия, и открытого программного обеспечения, дающего возможность корректировки технологических параметров печати [1,2]. Одним из наиболее востребованных направлений является развитие технологий послойного синтеза [2,3]. Они позволяют изготавливать изделия из металлических порошков со сферической или близкой к ней формой частиц. Примером таких процессов АМ является метод селективного лазерного сплавления (СЛС). В процессе 3D-печати из металлического порошка за один цикл расплавляется небольшое количество материала, его быстрое затвердевание приводит к более равномерному химическому составу и микроструктуре по всей детали. Путем подбора режимов можно получать материалы по качеству, не уступающие материалам полученным традиционными способами производства.

В то же время при кристаллизации из жидкой фазы в металле могут появиться дефекты, характерные для процесса литья – поры, раковины, которые не только влияют на структуру и механические свойства деталей, но в ряде случаев недопустимы [4,5]. Поэтому необходимо исследование характера, плотности распределения дефектов и возможных способов их исправления. Известно использование процесса газового изостатического прессования (ГИП) для компактирования порошков при получении изделий из них. Также ГИП применяется для устранения дефектов усадочного характера в титановых отливках. Высокая температура и давление вызывают микродеформацию в области дефекта, и он «залечивается». Такая обработка приводит к улучшению структуры, к повышению прочностных характеристик. Поэтому представляет интерес применение ГИП к материалам, полученным методом СЛС с целью изменения структуры и улучшения качества деталей.

Целью данной работы является исследование структуры, свойств и пористости образцов из сплава ВТ6, полученных методом СЛС и подвергнутых ГИП.

### *Материалы и методики исследования*

Материал исследования – образцы сплава ВТ6 стандартного химического состава, полученные методом СЛС (Рис.1) с продольным (вверху) и поперечным (внизу) направлением роста.



Рис. 1. Вид образцов, полученных методом СЛС

Плотность пор определяли металлографическим методом точек. Микротвердость измерялась по методу Виккерса (Hv) на микротвердометре Buehler Omnimet Micromet - 5101 при нагрузке 0.05 Н и длительности выдержки под нагрузкой 15 секунд.

Образцы подвергались ГИП на промышленной установке УМПО. Давление в камере создавалось подачей аргона. Режим газостатирования:



Температура в камере 900 °С,  
Давление 95 атм  
Время выдержки 60-90 мин.

### ***Результаты исследования и их обсуждение***

*Образцы, полученные СЛС.* Исследование нетравленного шлифа установлено, что поры имеют случайное распределение (Рис. 2, а). Степень пористости образца составляет 0,032. Изучение морфологии пор с помощью растровой электронной микроскопии показывает, что круглые поры с дендритной поверхностью, по-видимому, являются усадочными (рис. 2, б). Встречаются усадочные поры когтевидной (рис. 2, в) и треугольной формы (рис. 2, г), также присутствуют поры сложной фрактальной формы усадочного происхождения. Эти дефекты имеют разные размеры, от нескольких до десятков микрометров, и могут служить концентраторами напряжений. Мелкие сферические поры могут быть как газовыми, так и усадочными, это требует дальнейшего исследования.

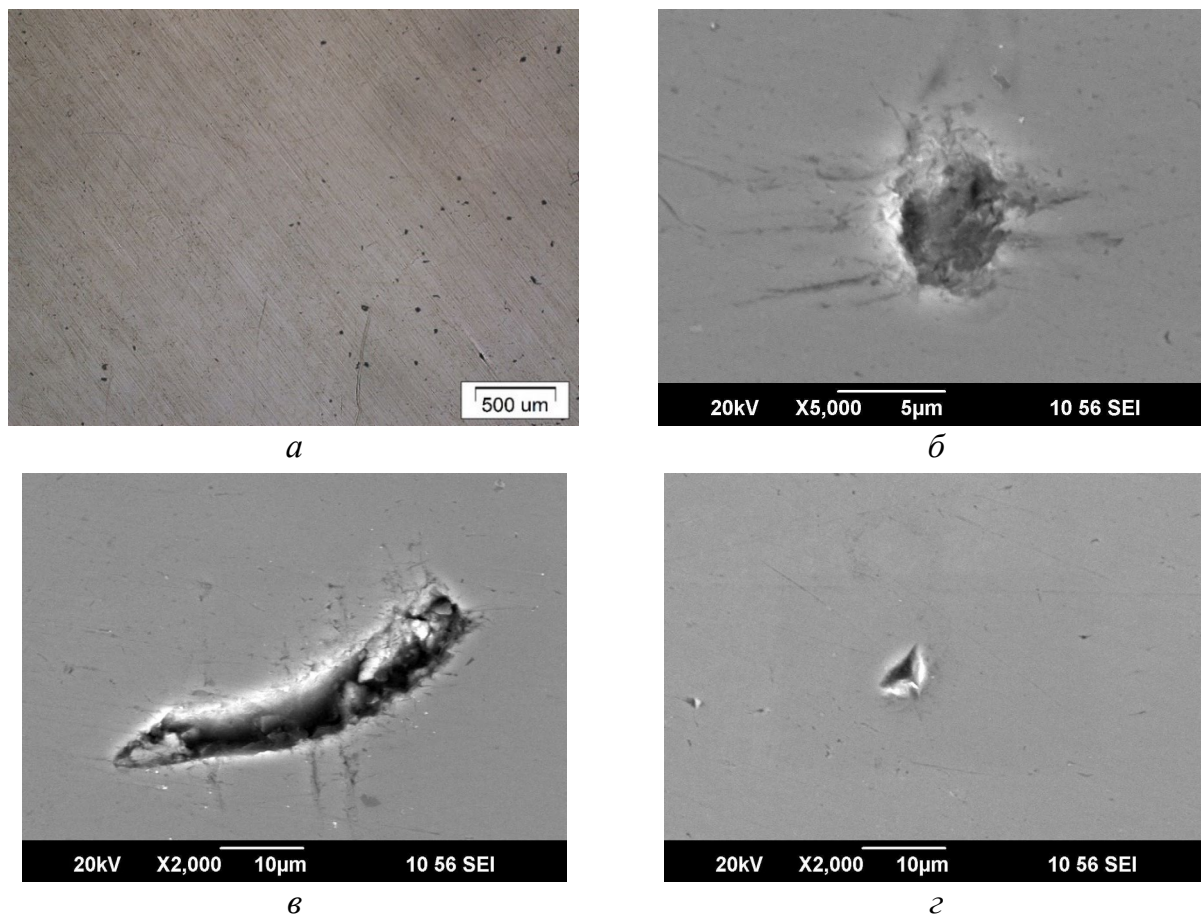


Рис. 2. Вид нетравленного шлифа:

*а – общий вид пористости, оптическая микроскопия; б – усадочная пора сферической формы, РЭМ; в – усадочная пора когтевидной формы, РЭМ; г – усадочная пора треугольной формы, РЭМ*

Микроструктура сплава после травления приведена на рис. 3. Характерная особенность структуры – наличие крупных вытянутых областей, имеющих преимущественную ориентировку (Рис. 3, *а*). Ориентированные полосы сформированы в процессе послойной кристаллизации. Средняя ширина таких областей составляет 83 мкм, а протяженность 286 мкм. Внутри полос наблюдаются зерна с пластинчатой структурой, характерной для закаленного с температуры  $\beta$ -области сплава (Рис.3, *б*). Средний размер зерен 63 мкм. По-видимому, такая структура формируется в результате быстрой неравновесной кристаллизации расплавленной ванны.

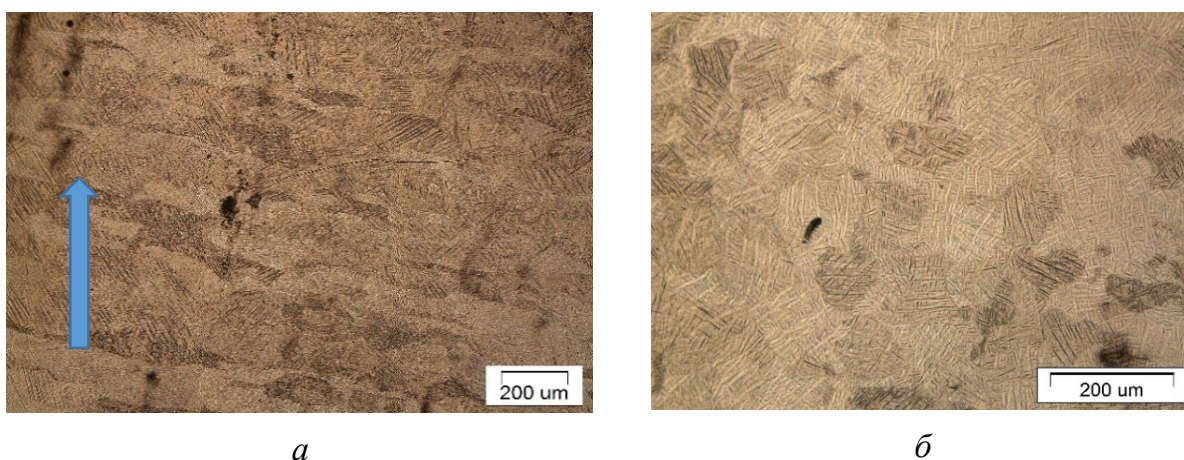


Рис. 3. Микроструктура СЛС образца после травления (стрелкой указано направление роста):  
*а* – вдоль направления роста; *б* – поперек направления роста

### **Образцы после ГИП**

После ГИП на нетравленном шлифе поры и несплошности при оптической микроскопии практически не обнаруживаются (Рис. 4, *а*).

На травленном шлифе уже не наблюдаются вытянутые ориентированные полосы. Структура в обоих направлениях зеренная, рекристаллизованная, представлена равноосными первичными  $\beta$ -зернами внутри  $\alpha$ -оторочки (Рис. 4, *б*). Средний размер зерен около 90 мкм.

Внутри первичных зерен присутствует  $\beta$ -превращенная структура.

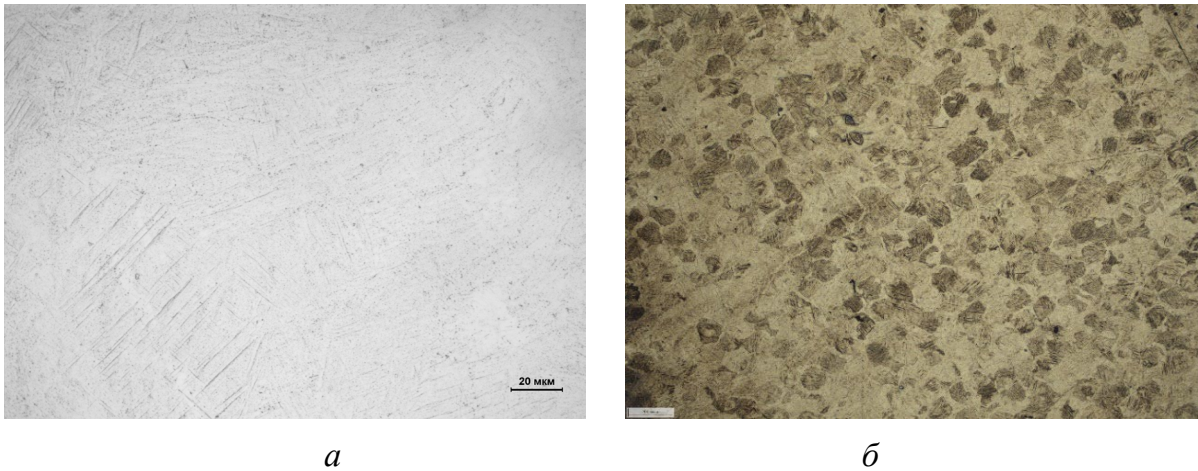


Рис. 4. Поверхность СЛС образца сплава ВТ6 после ГИП до травления (а) и после травления (б)

### *Механические свойства и микротвердость*

Результаты испытания образцов на растяжение и микротвердости представлены в таблице.

Состояние сплава	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Микротвердость, МПа
Исходное (СЛС)	967	8,0	20,0	380
СЛС+ГИП	1290	10,4	30,0	400
Промышленный сплав, пруток [6]	902	10,0	30,0	-

Как показывают результаты механических испытаний, образцы сплава ВТ6, полученные методом СЛС, имеют значения предела прочности практически на том же уровне, как и у промышленного сплава (катаные прутки), но несколько уступают по пластичности. Это можно объяснить тем, что, во-первых, структура СЛС сплава формировалась кристаллизацией из расплава, а во-вторых, в структуре присутствуют дефекты, характерные для литого состояния – усадочные поры и несплошности различной морфологии. Обработка газовым изостатическим прессованием приводит к повышению прочности на 33% при одновременном повышении пластических характеристик. Это, вероятно, является как залечиванием дефектов усадочного характера, так и полной перекристаллизацией материала с формированием благоприятной структуры.

## **Выводы**

1. После СЛС в сплаве ВТ6 формируется неоднородная ориентированная слоистая структура с средним размером областей 83 мкм и протяженностью 286 мкм. В структуре имеются дефекты усадочного характера. Плотность пор составила 0,032.

2. После обработки методом ГИП при температуре 900°С дефекты оптической микроскопией не выявляются. Неоднородность структуры устраняется, формируется рекристаллизованная структура с равноосными зернами со средним размером 90 мкм.

3. Обработка методом ГИП приводит к повышению прочности на 33% с одновременным повышением пластичности.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дубинкин Д.М. Современное состояние, пути развития, области применения селективного лазерного спекания (SLS) // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Редколлегия: Д.М. Дубинкин [и др.]. 2019. 174-176 с.
2. Султанова Ф.Р. Технология селективного лазерного спекания (sls) // Инновационная наука. Учредители: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна" ISSN: 2410-6070. 2016. №10-2. 119-121 с.
3. N. V. Kazantseva. Laser Additive 3D Printing of Titanium Alloys: Current Status, Problems, Trends. *Physics of Metals and Metallography*. 2021. volume122. pages6-25.
4. Балякин А.В. Исследование проблем появления негативной технологической наследственности при изготовлении деталей ГТД методом селективного лазерного спекания // *Авиационная и ракетно-космическая техника*. 2019. 61 с.
5. Сотов А. В., Агаповичев А. В., Красков М. А., Вдовин Р. А., Смелов В. Г. Исследование морфологии поверхности частиц металлических порошков для технологии селективного лазерного спекания. // *УДК 629.78*. - 2010. V.3. - P.245-246.
6. Масленков С.Б., Масленкова Е.А. Стали и сплавы для высоких температур. Справ. изд. В 2-х кн. Кн.2. – М.: *Металлургия*, 1991, с. 525
7. Q.Yan. Comparison study on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloys fabricated by powder-based selective-laser-melting and sintering methods. // *Materials Characterization* Volume 164, June 2020, 110358.

УДК 53.086

М. О. АФАНАСЬЕВ

*afaninho5@mail.ru*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук Д. В. ГУНДЕРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОС СДВИГА ОМС Vit105 ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ

**Аннотация.** В данной работе проводится изучение полос сдвига ОМС Vit105 после трехточечного изгиба методом атомно-силового микроскопа.

**Ключевые слова:** ОМС Vit105, трехточечный изгиб, атомно-силовой микроскоп.

Аморфные сплавы и объемные металлические стекла, исследуются с середины 60-х годов прошлого века [1]. Основным отличием от кристаллических металлических материалов, является отсутствием дальнего порядка, вследствие чего, аморфные сплавы отличаются магнитными, электрическими, механическими и коррозионными свойствами. Из-за отсутствия кристаллической решетки, то механизмом распространения деформация является формирование и распространение полос сдвига. Соответственно полосы сдвига и их распространение при различных деформациях, вызывает интерес.

Материалом исследования является сплав Vit105 состава  $Zr_{52,5}Cu_{17,9}Al_{10}Ni_{14,6}Ti_5$  ат. %. Из слитков были вырезаны образцы в виде плоских пластин размером  $10 \times 1.52 \times 0,64$  мм. Образцы Vit105 были получены методом вакуумного литья в медный охлаждаемый тигель со скоростью охлаждения порядка  $10^2$  К/с.

В данной работе было проведено исследование полос сдвига аморфного сплава Vit105 наблюдаемых после трехточечного изгиба на стороне растяжения (рис.1). Образец подвергается изгибу с постоянной скоростью  $10^{-3}$  с<sup>-1</sup> в середине между опорами до разрушения [2].

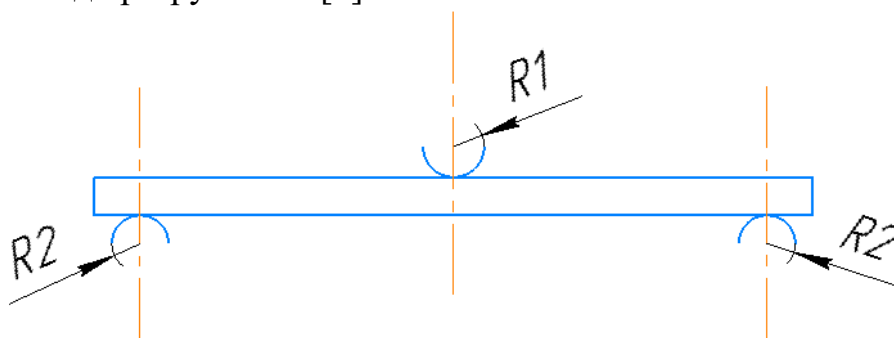


Рис. 1. Схема испытания на трехточечный изгиб

Исследование полос сдвига в области разрушения после трехточечного изгиба сканировалась при помощи атомно-силового микроскопа(АСМ) Agilent 5500AFM в полуконтактном режиме кантилевером PPP-NCH.

Результатом сканирования является изображение топографии поверхности (рис.2) и извлеченный профиль поверхности (рис.3) полос сдвига.

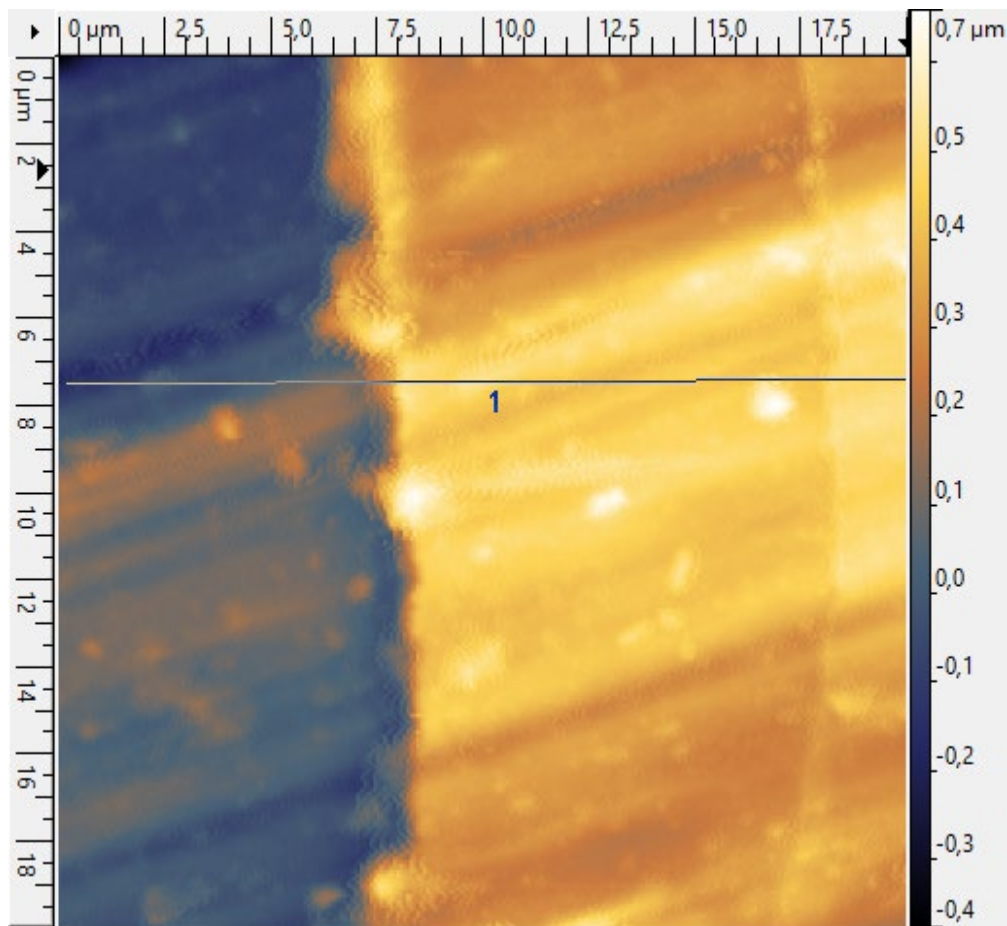


Рис. 2. Топография поверхности сплава Vit105 после трехточечного изгиба

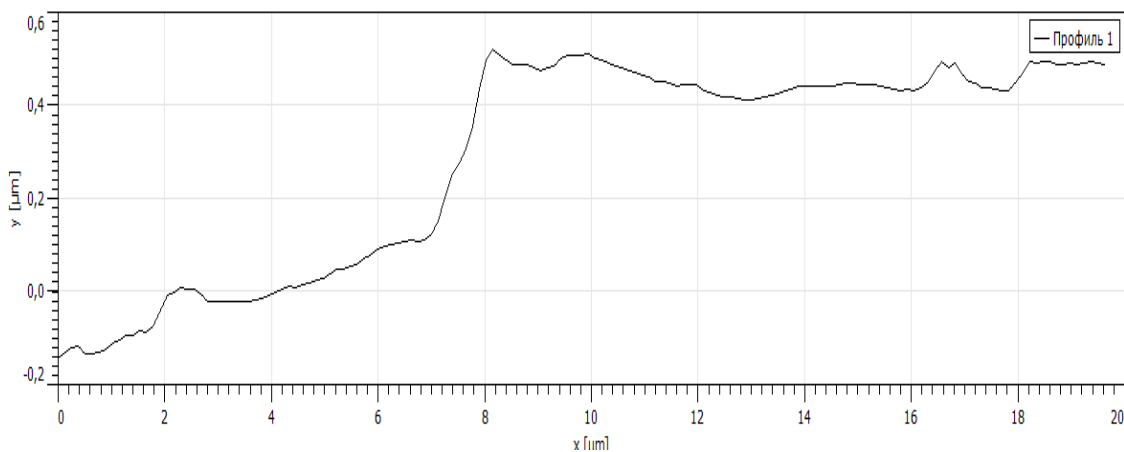


Рис. 3. Профиль поверхности полос сдвига по линии 1

По топографии поверхности образца видно, что максимальная высота полосы сдвига порядка 500 нм и шириной около 6 мкм. Также существует и другой вид распространения полос сдвига, когда две полосы сдвига находятся на расстоянии порядка 3 мкм и либо же это одна полосы сдвига, которая имеет два пика, либо две полосы которые разделяются из одной (рис.4) [3]. В первом случае (рис.4 красный прямоугольник) наибольшая высота пика равна 540 нм и высота второго 450 нм с расстоянием между пиками порядка 3 мкм. Второй случай (рис.4 черный прямоугольник) две полосы сдвига разделяются из одной, что видно из топографии поверхности, в этом случае высота наибольшего пика равна 350 нм и второго 200 нм.

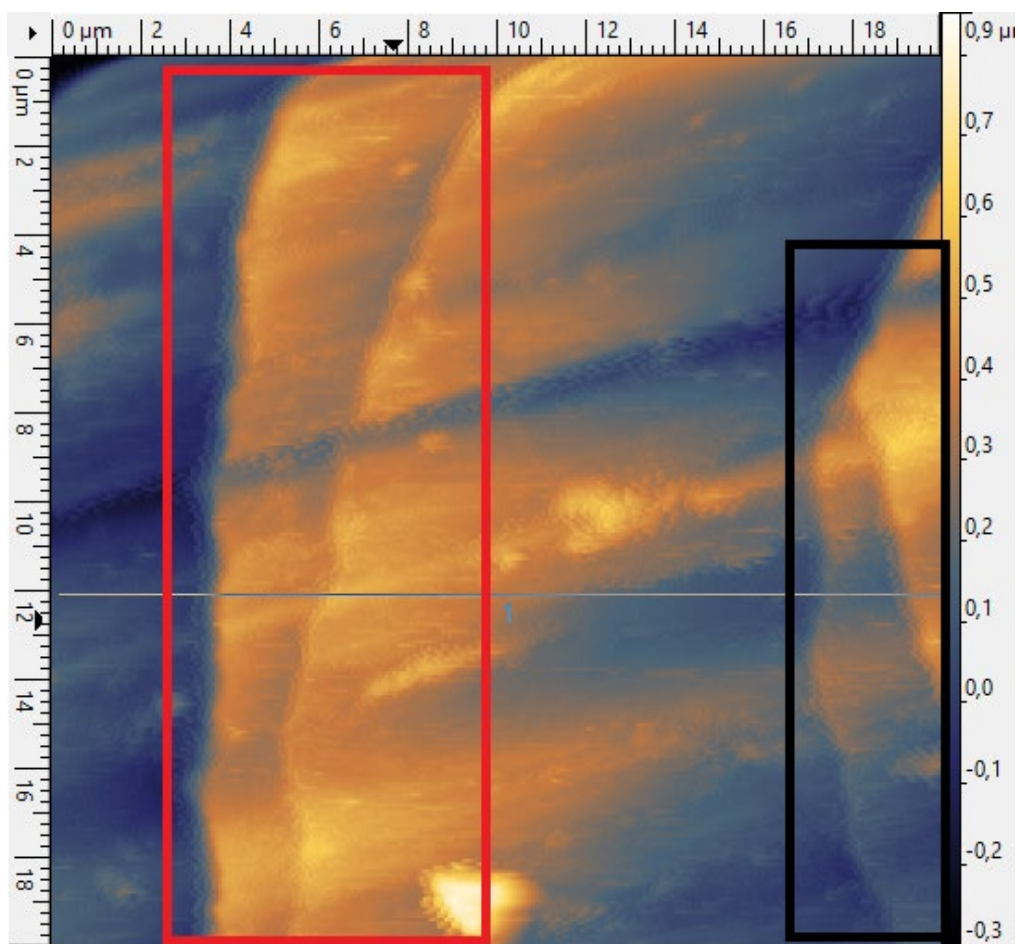


Рис. 4. Топография поверхности Vit105 с двумя зонами полос сдвига

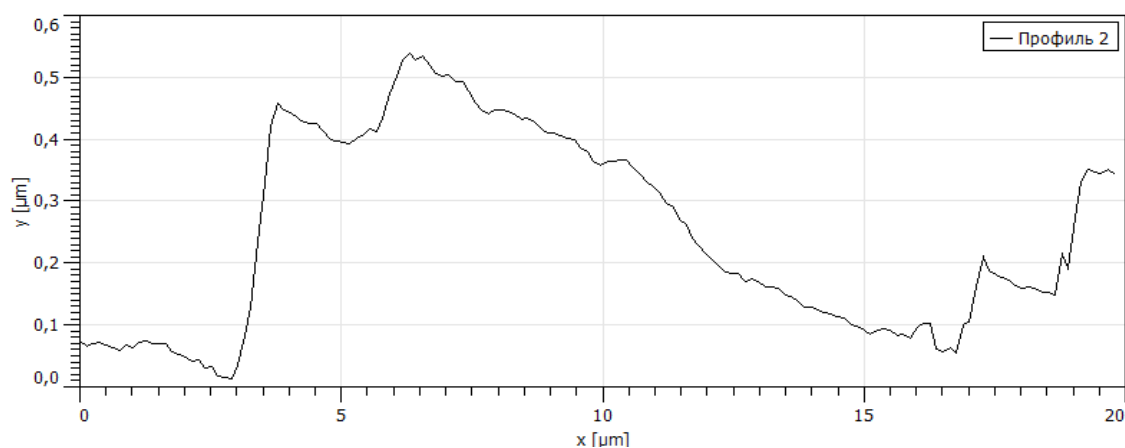


Рис. 5. Извлеченный профиль поверхности Vit105 с двумя зонами полос сдвига

В данной работе были исследованы полосы сдвига после трехточечного изгиба аморфного сплава Vit105 методом атомно-силового микроскопа. Были определены высоты пиков полос сдвига и их ширина. Также обнаружены разные области распространения полос сдвига. В дальнейших исследованиях планируется изучения распространения полос сдвига вблизи места разрушения после трехточечного изгиба после интенсивной пластической деформации и термической обработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глезер А. М. Структура и механические свойства аморфных сплавов / Глезер А. М., Молотилев Б. В. // М.: Металлургия, 1992. – 208 с.
2. ТИТОВ В.В., ГУНДЕРОВ Д.В. Характерные особенности изломов образцов после механических испытаний на трехточечный изгиб аморфных сплавов после ИПДК Мавлютовские чтения: материалы V Международной научно- технической конференции, Том 6– Уфа : УГАТУ, 2021. ISBN 978-5-4221-1465-8
3. Абросимова Г. Е. ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.



А. Р. БОГДАНОВ

*bogdanov-alb02@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук А. Ю. НАЗАРОВ, ст. преп. В. Р. МУХАМАДЕЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ НАНЕСЕНИИ КАРБОНИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ti-Al НА СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены результаты исследования компонентного состава смеси реакционных газов при синтезе карбонитридных покрытий системы Ti-Al-C-N, оказывающих влияние на износостойкость режущего инструмента. Покрытие было нанесено на модернизированной установке ННВ-6.6-И1 распылением из двух однокомпонентных катодов с ассистированием плазменным источником с накаливаемым катодом. Во время нанесения покрытия в камеру подавали смесь из реакционных газов азота N<sub>2</sub> и ацетилена C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> в соотношении 1:4, 2:3, 3:2, 4:1. Приведены результаты натурных испытаний твердосплавных резцов с исследуемыми покрытиями. По итогам стойкостных испытаний было определено, что резец с покрытием, нанесенным при соотношении газов N<sub>2</sub>:C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>=4:1, увеличивает стойкость инструмента в 10 раз по сравнению с режущим инструментом без покрытия.

**Ключевые слова:** титан; алюминий; покрытие; режущий инструмент; карбонитриды; износостойкость; микротвердость.

Механообработка новых перспективных конструкционных материалов затруднена из-за высоких значений физико-механических свойств обрабатываемых материалов. В связи с этим потребность разработки новых материалов и покрытий для металлорежущего инструмента остается крайне актуальной задачей.

В работе [1] рассматривали высокоскоростное чистовое точение титанового сплава твердосплавными инструментами с покрытиями TiAlN. Авторами установлено, что при обработке титанового присутствуют адгезионный, окислительный и диффузионный виды износа. Однако исследования, направленные на поиски и разработку новых способов усовершенствования эксплуатационных свойств режущего инструмента, не прекращаются. В работе [2] исследовали фрезы с покрытиями TiAlN и TiAlSiN при обработке закаленной инструментальной стали. Также важным критерием для износостойких покрытий является низкий коэффициент трения [3]. В работе [4] представлены и проанализированы последние разработки на основе TiAlN, а также проведено сравнение механических

свойств и характеристик резания при металлообработке. Как известно, карбидо-содержащие и алмазоподобные покрытия имеют высокую твердость и низкий коэффициент трения, однако их недостатком является высокая хрупкость. Нитридные соединения имеют высокую твердость и пластичность, но коэффициент трения у них выше, чем у большинства карбидосодержащих покрытий [5–6]. В настоящее время практически отсутствует информация о влиянии концентрации углерода и азота на физико-механические свойства покрытия TiAlCN [7–9].

В работе [8] рассматривалось влияние процентного содержания углерода на структуру, фрикционные, коррозионные и трибокорозионные свойства, при этом не рассматривалось влияние концентрации углерода на эксплуатационные свойства режущих инструментов.

Широкое практическое применение получили несколько ключевых технологий на основе химического осаждения покрытий и физического осаждения покрытий [10–12], а также разрабатываются комбинированные методы модификации поверхностных свойств покрытий, сочетающих преимущества рассматриваемых технологий.

В большинстве публикаций приводятся результаты исследований влияния содержания углерода на физико-механические свойства и структурно-фазовый состав покрытия TiAlCN, причем исследования выполнены в лабораторных условиях, а производственные испытания режущих инструментов с синтезируемыми покрытиями не рассматриваются. Ведутся работы по исследованию состава и твердости покрытий на режущих инструментах с целью определения износостойкости [13–15].

Цель исследования – повышение ресурса металлорежущего инструмента путем подбора оптимального соотношения смеси реакционных газов  $N_2$  и  $C_2H_2$  при вакуумном ионно-плазменном осаждении покрытий системы Ti–Al–C–N.

Покрытие наносили на модернизированной установке ННВ-6.6-И1 распылением из двух однокомпонентных катодов при ассистировании процесса плазменным источником с полым катодом (ПИПК). Во время нанесения покрытия в камеру подавали смесь из реакционных газов азота  $N_2$  и ацетилена  $C_2H_2$  в соотношении 1:4, 2:3, 3:2, 4:1 через плазмогенератор ПИПК, который подает в камеру ионизированный газ.

Покрyтие наносили при следующих режимах: ток титанового дугового испарителя  $I_{Ti}=120$  А, ток алюминиевого испарителя  $I_{Al}=100$  А, напряжение смещения  $U=280$  В, давление в вакуумной камере  $(3...4) \cdot 10^{-3}$  Па, время осаждения – 1 час.

Для проведения сравнительных испытаний на твердосплавные пластины из сплава ВК8 были нанесены однослойные покpутия TiAlN и TiAlCN.

Для экспериментальных исследований при точении использовались заготовки из одной партии материалов одинаковых марок диаметром 70–100 мм и длиной 500 мм, предварительно обточенные и зацентрованные с обеих сторон. Заготовки зажимали в самоцентрирующемся трехкулачковом патроне и поджимали вращающимся центром, установленным в пиноли задней бабки станка. Исследования проводились при глубине резания  $t=0,5$  мм и подаче  $S=0,11$  мм/об при частоте вращения 1000 об/мин.

В качестве исследуемого параметра износа инструмента использовалась средняя ширина фаски износа задней поверхности (без учета выемок). Ширину  $h_z$  фаски износа инструмента по задней поверхности измеряли с помощью отсчетного микроскопа МИР-2П с насадкой МОВ-15 с точностью отсчета до 0,002 мм. Критерий затупления режущих инструментов принимали равным  $h_z=0,3$  мм. Для обеспечения достоверности результатов эксперимента согласно рекомендациям исследования повторялись 4–5 раз при отклонениях не более 8 %.

На основании экспериментальных данных при проведении натурных испытаний были построены зависимости износа задней поверхности от пути резания для резцов в исходном состоянии и с различными покpутиями (рис. 1).

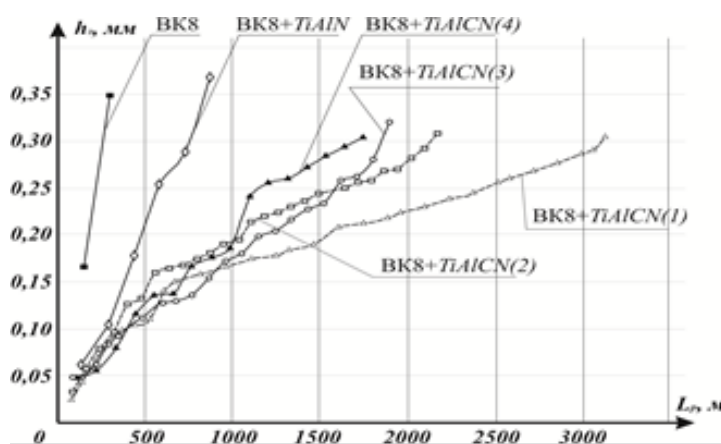


Рис. 1. Зависимость износа по задней поверхности от пути резания

Согласно графику зависимости пути резания от состава реакционного газа (рис. 2) оптимальным составом для достижения максимальной износостойкости является соотношение азота к ацетилену 4:1.

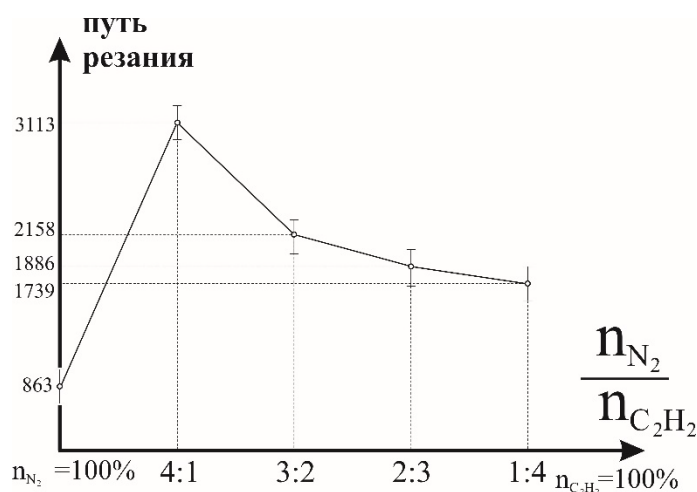


Рис. 2. График зависимости пути резания от соотношения N<sub>2</sub>:C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>

Испытания показали, что покрытие на основе системы TiAl, синтезированное в среде смеси реакционных газов азота и ацетилена с соотношением 4:1, позволяет синтезировать покрытие, которое повышает износостойкость инструмента в 10 раз по сравнению с режущим инструментом без покрытия, и в 3,5 раза по сравнению с инструментом с покрытием TiAlN, синтезированным в среде азота.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang B., Li A., Liu G. Cutting performance and wear mechanisms of TiAlN PVD-coated cemented carbide tool in high speed turning of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020. Vol. 34. № 7. P. 2997–3006.
2. Sousa V.F.C., Silva F.J.G., Alexandre R., Fecheira J.S., Silva F.P.N. Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel // *Wear*. 2021. Vol. 476. Article number 203695.
3. Chang K., Dong Y., Zheng G., Jiang X., Yang X., Cheng X., Liu H., Zhao G. Friction and wear properties of TiAlN coated tools with different levels of surface integrity // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. № 4. P. 4433–4443.
4. Sousa V.F.C., Da Silva F.J.G., Pinto G.F., Baptista A., Alexandre R. Characteristics and wear mechanisms of TiAlN-based coatings for machining applications: A comprehensive review // *Metals*. 2021. Vol. 11. № 2. Article number 260.
5. Rashidi M., Tamizifar M., Ali Boutorabi S.M. Characteristics of TiAlCN ceramic coatings prepared via pulsed-DC PACVD, part I: influence of precursors' ratio // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. № 2. P. 1269–1280.

6. Liu K., Ma F., Lou M., Dong M., Zhu Y., Wang Y., Wu X., Liu X., Li J. Structure and tribocorrosion behavior of TiAlCN coatings with different Al contents in artificial seawater by multi-arc ion plating // *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2021. Vol. 9. № 4. Article number 045004.
7. Tillmann W., Grisales D., Marin Tovar C., Contreras E., Apel D., Nienhaus A., Stangier D., Lopes Dias N.F. Tribological behaviour of low carbon-containing TiAlCN coatings deposited by hybrid (DCMS/HiPIMS) technique // *Tribology International*. 2020. Vol. 151. Article number 106528.
8. Chen S.N., Zhao Y.M., Zhang Y.F., Chen L., Liao B., Zhang X., Ouyang X.P. Influence of carbon content on the structure and tribocorrosion properties of TiAlCN/TiAlN/TiAl multilayer composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 411. Article number 126886.
9. Zeng Y., Qiu Y., Mao X., Tan S., Tan Z., Zhang X., Chen J., Jiang J. Superhard TiAlCN coatings prepared by radio frequency magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 2015. Vol. 584. P. 283–288.
10. Tillmann W., Grisales D., Stangier D., Thomann C.-A., Debus J., Nienhaus A., Apel D. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 406. Article number 126664.
11. Boing D., de Oliveira A.J., Schroeter R.B. Limiting conditions for application of PVD (TiAlN) and CVD (TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN) coated cemented carbide grades in the turning of hardened steels // *Wear*. 2018. Vol. 416-417. P. 54–61.
12. Li S., Lin H., Zhang T., Sui J., Wang C. High-speed machining of malleable cast iron by various cutting tools coated by physical vapor deposition // *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. 2021. Vol. 34. № 1. Article number 46.
13. Щипачев А.М., Варданян Э.Л., Мухамадеев В.Р., Мухамадеев И.Р. Исследование изменения твердости поверхности режущего инструмента с покрытием TiAlN // *Металлообработка*. 2021. № 3. С. 22–29.
14. Щипачев А.М., Мигранов М.Ш., Мухамадеев В.Р., Мухамадеев И.Р. Влияние композиционного наноструктурного покрытия на изменение элементного состава в поверхностных слоях режущего инструмента // *Металлообработка*. 2019. № 5. С. 19–25.
15. Рамазанов К.Н., Варданян Э.Л., Мухамадеев В.Р., Мухамадеев И.Р., Маслов А.А. Изменение химического состава поверхностных слоев твердосплавного инструмента с покрытием системы Ti-Al-N в процессе резания // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2022. № 6. С. 108–112.

УДК 669.716

А. Р. БОГДАНОВ, А. С. СЕЛИВАНОВ, М. Г. ПЕТРОВ

*bogdanov-alb02@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук А. Е. МЕДВЕДЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА Al-Mg**

**Аннотация.** В данной работе рассмотрено влияние сварки трением перемешиванием (СТП) на микроструктуру и свойства алюминиевого сплава системы Al-Fe-Mg-Si. Было изучено влияние различных режимов СТП на формирование структуры и объемных дефектов в теле сварного шва. Показано, что проведение СТП при скорости вращения инструмента 1120 об/мин и скорости сварки 200 мм/мин к уменьшению зоны термического воздействия и более равномерному деформированию материала.

**Ключевые слова:** сварка трением перемешиванием; алюминиевый сплав; микроструктура; твердость.

Алюминий – второй после железа металл современной техники. Наиболее важное свойство алюминия, определяющее его широкое применение, – это низкая плотность, а также хорошая электрическая проводимость, составляющая 62% электрической проводимости меди. С учетом дефицитности и дороговизны меди роль алюминия, как проводникового материала, неуклонно возрастает.

К безусловным достоинствам алюминия можно отнести его высокую пластичность, теплопроводность и теплоемкость, хорошую технологичность и коррозионную стойкость, ведь алюминий очень быстро окисляется на воздухе, покрываясь тонкой пленкой оксида, которая, в отличие от оксида железа, не пропускает кислород в толщу металла, делая его стойким против коррозии. Чистый алюминий характеризуется относительно низкой прочностью – 49 МПа. Так как данного уровня свойств недостаточно для того, чтобы использовать в промышленности, то его легируют различными элементами, создавая сплавы на основе алюминия.

В частности, существуют сплавы системы Al-Mg. Благодаря своим свойствам, то разумным кажется их применение в качестве материалов лодок, трубопроводов и других изделий, работающих в агрессивных окружающих средах. Существует довольно большой набор техник направленных на соединение изделий из алюминиевых сплавов. В частности, в последнее время все больший интерес привлекает техника сварки трением перемешиванием (СТП). Качество получаемых соединений напрямую зависит от параметров режима сварки, включающих

в себя скорость вращения инструмента, скорость сварки и характеристических данных самого инструмента для сварки трением перемешиванием.

Целью данного исследования является установление оптимального режима сварки трением с перемешиванием для формирования бездефектного сварного шва (с отсутствием дефектов в виде дендритной структуры, усадочных раковин, непроваров, шлаковых включений, скоплений газовых пор и др).

В ходе исследования была проведена сварка трением перемешиванием по 4 режимам, различающимся линейной скоростью перемещения инструмента. Режимы промаркированы 205, 204, 206 и 207 в порядке возрастания линейной скорости перемещения инструмента. В ходе исследования выявлено, что зона термического воздействия меньше выражена образце 207 (Рис. 1). Это связано с тем, что максимальная температура при сварке была меньше, чем у остальных. Поскольку процесс осуществляется при температуре ниже температуры плавления, в сварных деталях практически отсутствуют искажения и поводки, как можно заметить на рентгене (Рис. 2). Металл в зоне температурного воздействия (ЗТВ), как и металл шва, является зоной максимально нагретого металла, подвергшегося интенсивному механическому воздействию вращающегося наконечника сварочного инструмента. Ширина ЗТВ в сварном соединении сплава находится в прямой зависимости от теплового воздействия при сварке.

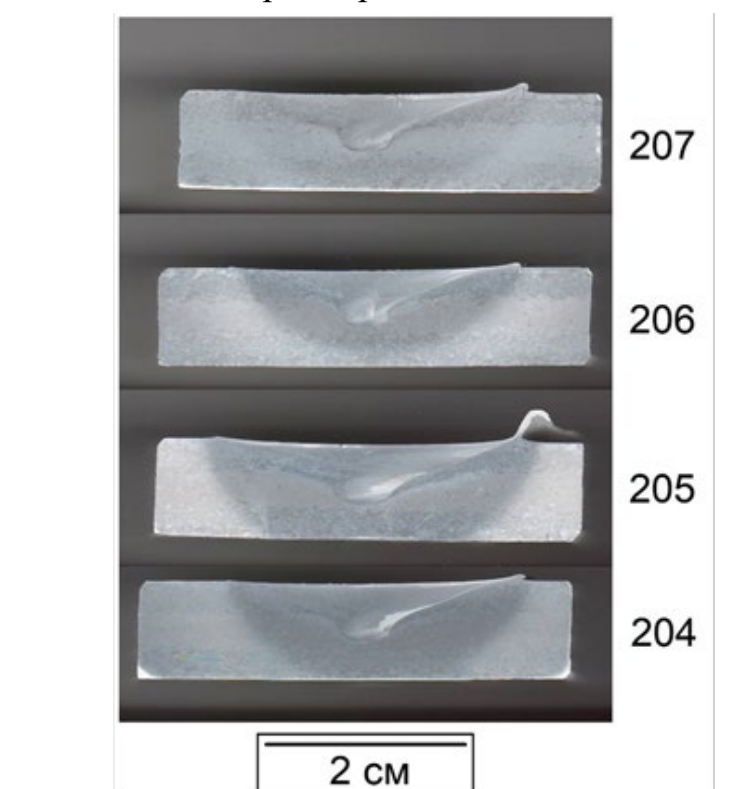


Рис. 1. Зона термического воздействия образцов

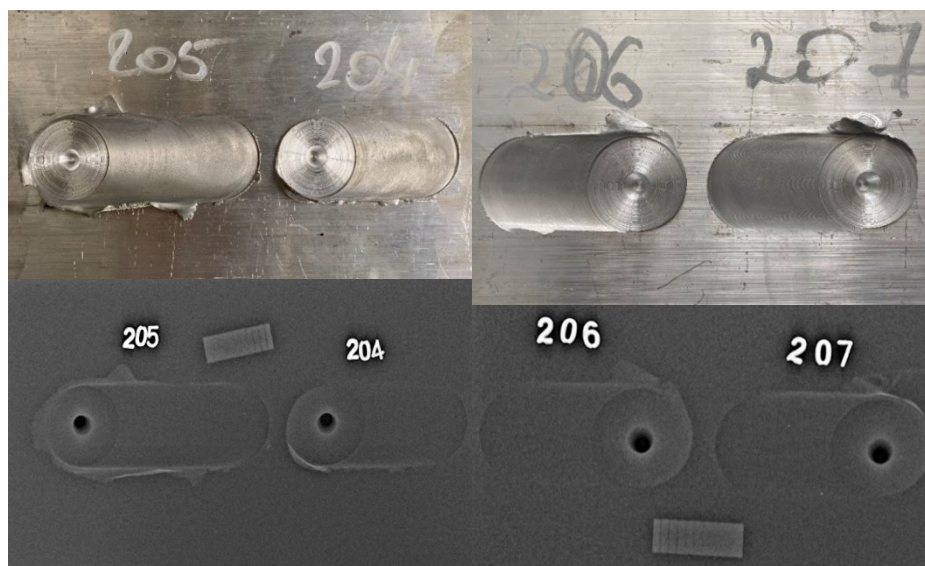


Рис. 2. Вид сварного шва и их рентген

В качестве материалов исследования были использованы горячекатаные плиты предоставленные кафедрой СМСиКК УГАТУ из алюминиевого сплава толщиной 14 мм. Химический состав сплава представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав сплава - 1565ч.

Сплав	Fe, %	Mn, %	Mg, %	Zn, %	Al, %
1565ч	0,147	0,607	5,889	0,555	92,47

Оценка механической неоднородности различных зон стыкового соединения сплава Al-Mg толщиной 14 мм проведена по результатам измерений твердости на приборе Виккерса (HV100). Три линии исследования проходили через все участки поперечного сечения сварного образца при шаге измерений 3,5 мм. Анализ кривой распределения твердости (Рис. 3) показывает, что поперечное сечение сварного соединения характеризуется двумя существенно отличающимися участками: основным металлом, твердость которого составляет 43-48 HV, и металлом шва, твердость которого на 20–30% выше. Значения микротвердости увеличиваются, но на периферии они так же будут выше, чем в центре, что объясняется размером зерен: в центре они меньше, чем на периферии.



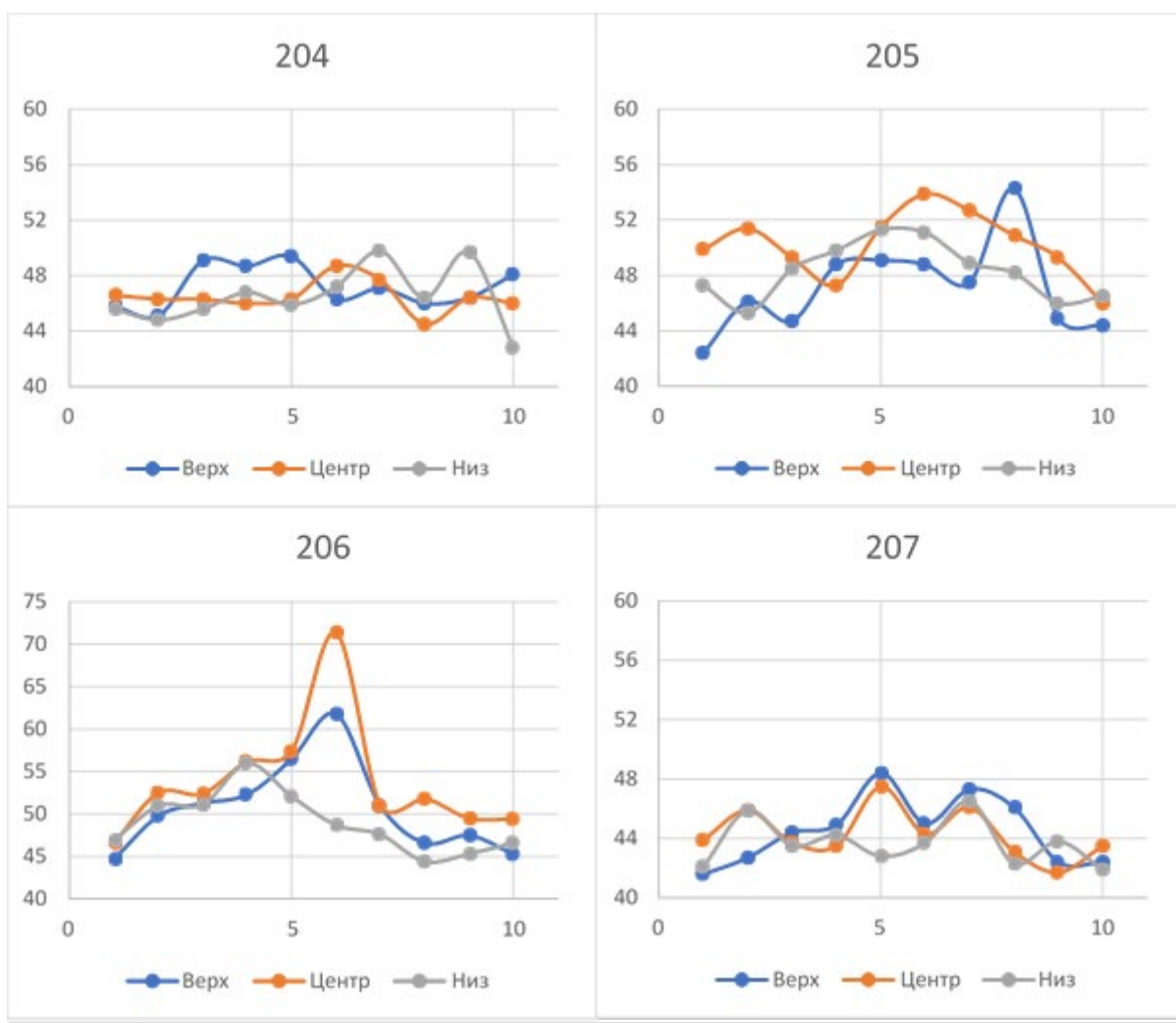


Рис. 3. Графики микротвердости образцов после СТП

Можно сделать вывод, что деформируемая зона при сварке трением перемешиванием определяются свойствами исходного материала и параметрами технологического процесса СТП. Также отличие металла шва от свариваемого сплава – формирование мелкодисперсной, близкой к равноосной структуре с размерами зерен в пределах от 15 до 25 мкм. Анализ кривой распределения твердости показывает, что поперечное сечение сварного соединения характеризуется двумя существенно отличающимися участками: основным металлом, твердость которого составляет 40–50 HV, и металлом шва, твердость которого на 20-30% выше. Изменения электропроводности образцов характеризуются падением электропроводности относительно основного материала, что связано с повышен-

ной плотностью дефектов. Так, в образцах 204 и 205, разброс значений электропроводности выше, чем в образцах 206 и 207, из-за большей неоднородности структуры в образцах 204 и 205.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников В.В. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов. / В.В. Овчинников // Машиностроение и инженерное образование. - 2016. - № 4 (49). - С. 22-45.
2. Михайлицын С.В. Основы сварочного производства / С.В. Михайлицын // Учебник. – 2019. – 260 с.
3. Павлова В.И., Алифиренко Е.А., Осокин Е.П. Исследование температурно-временных условий сварочного нагрева, структуры и свойств металла стыковых соединений из алюминиево-магниевого сплава, выполненных сваркой трением с перемешиванием. / В.И. Павлова, Е.А. Алифиренко, Е.П. Осокин. – 2009. – С. 74-88.
4. Феофанов А.Н., Овчинников В.В., Губин А.М. Влияние величины подачи рабочего инструмента при сварке трением с перемешиванием на механические свойства стыковых соединений сплава 1565ч. // Современные материалы, техника и технологии. - 2019. С. 226-238.
5. Карманов В.В., Каменева А.Л. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва. // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. - 2012. - № 32.
6. Кузнецов М.Е., Бородулин И.А. Механические свойства соединений выполненные точечной сваркой трением с перемешиванием. // Современные материалы, техника и технологии. - 2016. – № 4. – С. 117-125.
7. Лашин А.Н., Андреева Л.П., Овчинников В.В.: Влияние режима сварки на свойства соединений сплава 1565ч, выполненных сваркой трением с перемешиванием. // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. - 8 с.
8. Дриц А.М., Овчинников В.В., Растопчин Р.Н. Технологические свойства листов из свариваемого алюминиевого сплава 1565ч для производства цистерн. // Металловедение. – 2012. – С. 20 – 28.

В. А. БРЫЗГАЛОВ

*bryzgalovv2000@mail.ru*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. Е. А. КОРЗНИКОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ДВУМЕРНОМ МОНОКРИСТАЛЛЕ

**Аннотация.** Электропластический эффект – это снижение сопротивления металлических кристаллов деформированию под влиянием импульсного электрического тока высокой плотности. Применение данного эффекта позволяет проводить деформационную обработку относительно хрупких металлов без резкого повышения температуры, уменьшая вероятность негативного влияния температуры на материал. В данной статье рассматривается влияние электропластического эффекта на изменение деформирующего усилия и динамику дислокаций для двумерной модели монокристалла, основанной на методе молекулярной динамики при использовании потенциала Морзе. Была предложена модель, реализующая электропластический эффект посредством увеличения общей кинетической энергии системы не равномерно по всему объему кристалла, а в зависимости от потенциальной энергии атомов.

**Ключевые слова:** электропластический эффект; молекулярная динамика; потенциал Морзе; пластическая деформация.

### **Введение**

Электропластический эффект является одним из эффективных методов улучшения технологических свойств электропроводящих материалов, данный эффект позволяет повышать пластичность металлов, управлять процессами зарождения и развития дислокационной структуры, снижать усилия, необходимые для обработки материала [1-3].

Одной из гипотез, объясняющей явление снижения предела текучести материала в случае присутствия электрического тока, является предположение о локализации джоулева тепла на дефектах решетки, что в свою очередь приводит к снижению потенциальных барьеров их миграции.

Электропластический эффект был впервые обнаружен при действии одиночными импульсами тока плотностью  $\sim 10^9$  А/м<sup>2</sup> длительностью  $\sim 0,1$  мс на деформацию кристаллов цинка сжатием и растяжением [4-6]. Также уменьшаются. До сих пор работы в данном направлении не велись, поэтому полученные нами результаты будут интересны людям, занимающимся физикой твердого тела.

Целью данной работы является изучение влияния дислокационного электропластического эффекта на пластические свойства двумерной модели монокристалла, построенной при помощи метода молекулярной динамики.

### *Детали компьютерного эксперимента*

Данное исследование проводилось при помощи метода молекулярной динамики (МД). Данный метод позволяет определять эволюцию ансамбля атомов при помощи интегрирования уравнений их движения [7].

Для описания взаимодействия атомов в данной работе был использован межатомный потенциал Морзе. Данный потенциал является функцией потенциальной энергии электростатического поля, предложенной американским физиком Филиппом Морзе как приближение для энергии двухатомной молекулы [8;9]. Потенциал имеет вид:

$$U = D_e(1 - e^{-\alpha(r-r_e)})^2$$

где  $D_e$  – глубина потенциальной ямы,  $r_e$  – равновесное расстояние,  $\alpha$  – коэффициент жесткости потенциала,  $r$  – межъядерное расстояние.

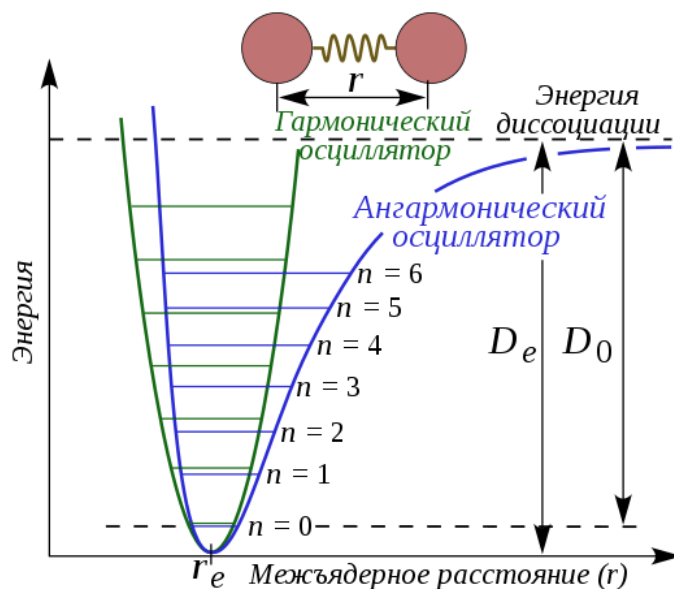


Рис. 1. Вид потенциала Морзе в зависимости от расстояния между ядрами двух атомов. Для сравнения показан потенциал и уровни энергии гармонического осциллятора.  $n$  — главное квантовое число

В данной работе были использованы следующие параметры потенциала Морзе:  $D_e=1$ ,  $r_e=1$ ,  $\alpha=6$ . Радиус обрезки потенциала был равен 5 межатомных рас-

стояний. Все расчеты проводились в безразмерных единицах. В качестве единицы энергии связи двух атомов выступает глубина потенциала Морзе.

Расчеты проводились с использованием программы, написанной на языке C++ в оболочке Builder 6. Была построена модель двумерного монокристалла и при помощи метода МД определено межатомное расстояние в кристалле  $\alpha=0,995$  (равновесное межатомное расстояние между парой атомов равно 1, а под действием дальнедействующих сил, в ходе релаксации структуры, равновесное расстояние между атомами в кристалле снижается до указанного значения). Расчетная ячейка имеет размер  $256 \times 256$  атомов и на нее накладывались периодические граничные условия. Затем из системы была удалена цепочка атомов посередине расчетной ячейки для создания призматической дислокационной петли; после релаксации в структуре образовались две дислокации (Рис. 2).

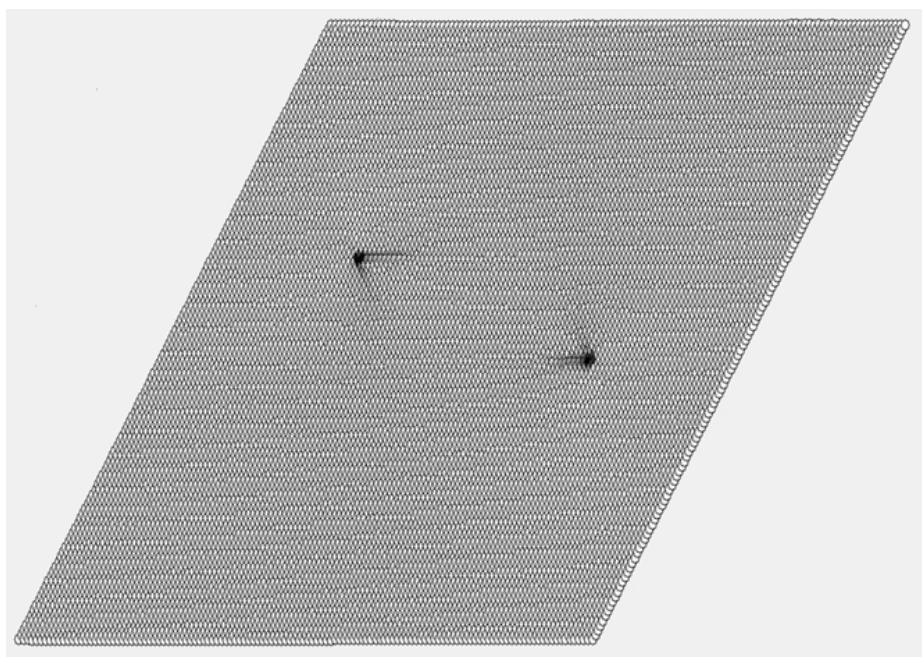


Рис. 2. Модель двумерного монокристалла с введенными в него двумя дислокациями (атомы окрашены в соответствии с величиной потенциальной энергии, черным цветом показаны атомы с максимальной энергией, они располагаются вблизи ядер дислокаций)

Затем система подвергалась действию монотонно увеличивающейся сдвиговой деформации и температуры. Температура вводилась путем задания случайных начальных смещений атомам в заданном диапазоне. Чем больше диапазон, тем выше температура.

Для моделирования импульсов электрического тока увеличивалась кинетическая энергия системы. Задачей являлось сделать так, чтобы энергия в большей мере выделялась на атомах вблизи дефектов, которые имеют более высокую потенциальную энергию. Таким образом, потенциальная энергия атомов использовалась для расчета прироста кинетической энергии и, следовательно, температуры атомов. Уравнение, задающее прирост температуры (кинетической энергии)  $n$ -го атома системы имеет вид:

$$dK_n = pK \left( \frac{P_n - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \right)^3$$

где  $p$  – параметр, определяющий мощность тока,  $P_n$  – потенциальная энергия  $n$ -го атома,  $K$  – кинетическая энергия всей системы (пропорциональна температуре кристалла),  $P_{min}$  и  $P_{max}$  – минимальная и максимальная потенциальная энергия атомов в системе, соответственно.

Для мощности тока устанавливалось значение  $p=0,001$ , частота импульсов тока - каждые 7,5 единиц времени (моделирование занимает 62,2 единиц времени). Параметры были подобраны так, чтобы система не перегревалась до плавления и сохранялась кристаллическая структура.

### ***Результаты исследования***

В ходе моделирования была построена зависимость предела текучести от температуры для двух случаев: а) модель  $256 \times 256$  атомов, без применения импульсов тока, б) модель  $256 \times 256$  атомов, с учетом электропластического эффекта. Из Рис. 4 видно, что до температуры 0,08 предел текучести не зависит от температуры, и после этого наблюдается резкое снижение предела текучести с увеличением температуры, с применением электрического тока происходит более интенсивное снижение

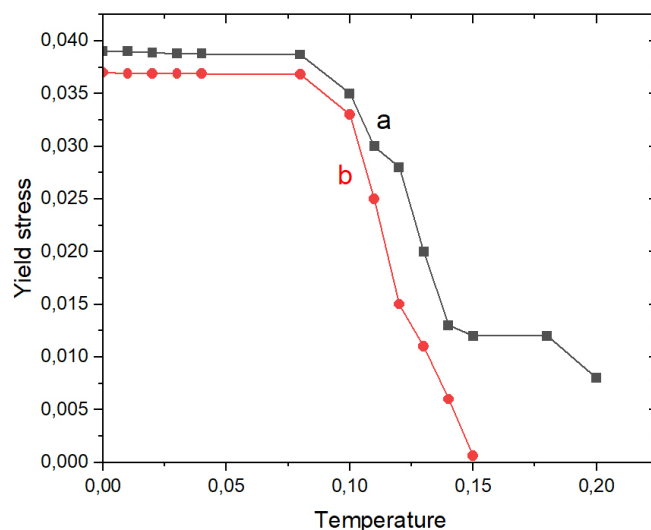


Рис. 3. Зависимость предела текучести от температуры:  
*a* – Модель  $256 \times 256$  атомов, без применения импульсов тока;  
*b* – Модель  $256 \times 256$  атомов, с учетом электропластического эффекта

Результаты, представленные на Рис. 3 показывают, что резкое снижение предела текучести при относительно высоких температурах связано с наличием потенциала Пайерлса-Набарро, который легче преодолевается дислокациями при повышенных температурах. Электропластический эффект же существенно снижает предел текучести только при достаточно высоких температурах.

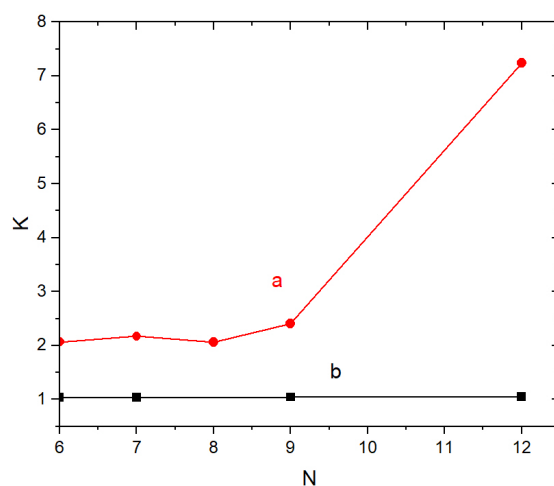


Рис. 4. Зависимость общей кинетической энергии системы от количества импульсов тока, примененных за время счета (62,5 единицы времени).  
*a* – При сдвиговой деформации  $\varepsilon=0,016$ ; Температура  $T=0,12$ ; *b* –  $\varepsilon=0,033$ ;  $T=0,1$

Также были построены зависимости кинетической энергии системы от количества импульсов тока (Рис.5, при построении графика коэффициент мощности тока был постоянен и равен  $p=0,001$ ) и от его мощности (Рис.5, в данном расчете за 62,5 единиц времени было применено 8 импульсов тока) для того, чтобы определить как данные параметры влияют на величину электропластического эффекта. Как видно из Рис.4, кинетическая энергия практически не меняется при температуре  $T=0,1$ , несмотря на относительно высокое значение деформации сдвига. Вместе с этим, при небольшом увеличении температуры и снижении деформации сдвига, кинетическая энергия резко увеличивается с повышением числа импульсов тока.

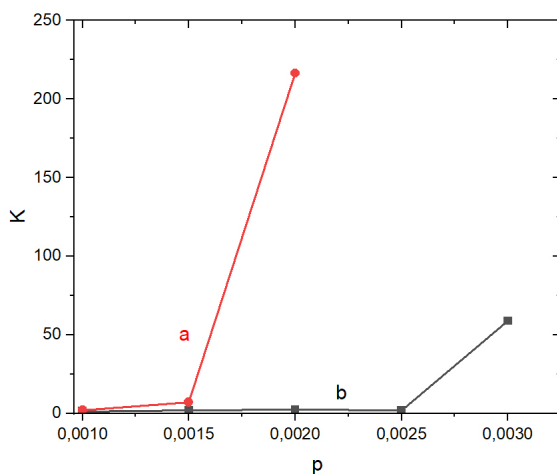


Рис. 5. Зависимость общей кинетической энергии системы от количества импульсов тока, примененных за время счета (62,5 единицы времени).  
*a* – При сдвиговой деформации  $\varepsilon=0,016$ ; Температура  $T=0,12$ ; *b* –  $\varepsilon=0,033$ ;  $T=0,1$

Можно заметить из Рис.6, что кинетическая энергия системы резко увеличивается с превышением мощности импульсов тока некоторого значения, которое уменьшается с ростом температуры. Так, при температуре  $T=0,12$ , резкий рост кинетической энергии наблюдается при мощности тока в  $p=0,003$ , а при  $T=0,1$  при значении  $p=0,007$ .

Результаты, представленные на Рис. 4 показывают, что резкое снижение предела текучести при относительно высоких температурах связано с наличием потенциала Пайерлса-Набарро, который легче преодолевается дислокациями при повышенных температурах. Электропластический эффект же существенно снижает предел текучести только при достаточно высоких температурах.



Анализ графиков зависимости кинетической энергии системы от количества импульсов тока (Рис.4) и его мощности (Рис.5) показал, что, несмотря на относительно высокое значение деформации сдвига, при более низкой температуре кинетическая энергия кристалла практически не изменяется (кривые b). Это связано с тем, что дислокации относительно слабо разогреты импульсами тока и двигаются термофлуктуационно, так как им тяжело преодолеть барьер Пайерлса-Набарро. При относительно небольшом увеличении температуры и снижении деформации сдвига, кинетическая энергия резко увеличивается с повышением количества импульсов тока и мощности тока (кривые a). Резкий скачок кинетической энергии системы связан с тем, что при относительно высоких значениях параметров тока и температуры происходит надбарьерное скольжение дислокаций, и в ходе этого скольжения дислокации выделяют большое количество тепла. Данный разогрев происходит за счет выделения тепла, связанного с работой приложенного сдвигающего напряжения на совершение пластической деформации.

### ***Вывод***

Создана молекулярно-динамическая модель двумерного монокристалла с межатомными взаимодействиями, описываемыми потенциалом Морзе. Предложены способ введения краевых дислокаций в систему и модель применения импульсов электрического тока к системе. Проведено моделирование движения дислокаций при заданных сдвиговых деформациях и температурах. Анализ графиков зависимости предела текучести от температуры без применения тока и с применением импульсного тока показал, что электропластический эффект существенно облегчает движение дислокаций только при достаточно высокой температуре кристалла. Это связано с наличием потенциала Пайерлса-Набарро, который легче преодолевается дислокациями при повышенных температурах.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Столяров, В.В. Электропластический эффект в титановых сплавах // Вестник научно-технического развития. 2013. №3. С. 35-39.
2. О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. Физические основы и технологии обработки современных материалов. Ижевск: Изд-во РХД, АНО ИКИ. М-И, I и II тт. 2004. 467 с.

3. Троицкий, О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТФ. 1969. № 10. С. 18-22.
4. Кравченко В.Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации // ЖЭТФ. 1966. Т.51, №.6. С.1676-1678.
5. Кравченко В.Я. Влияние электронов на торможение дислокаций в металлах // ФТТ. 1966. Т.8. №.3. С.927-935.
6. Климов К.М., Шнырев Г.Д., Новиков И.И. Об электропластичности металлов // Доклады АН СССР. 1974. Т. 219, № 2. С. 323-324.
7. Проценко С. П., Байдаков В. Г., Козлова З. Р. Молекулярно-динамическое моделирование метастабильных фазовых состояний. Термодинамические свойства леннард-джонсовской системы // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2014. – Т. 18, № 1
8. Yaoqi Zhou., Martin Karplus., Keith D. Ball., R. Stephen Bery. The distance fluctuation criterion for melting: Comparison of square-well and Morse Potential models for clusters and homopolymers // J. Chem. Phys. 2002. Vol. 116. №. 5 . P. 2323–2329.
9. Kun Zhou, Bo Liu. Chapter 1 - Fundamentals of classical molecular dynamics simulation. Molecular Dynamics Simulation // Elsevier. 2022. P. 1-40.

УДК 621.791.18

М. В. ЕРЕМЕЕВА

*marina.eremeeva.01@gmail.com*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. В. В. АСТАНИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ДИФфуЗИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ СПЛАВА В95 И МЕДИ**

**Аннотация.** В работе проведена оценка зоны сварного соединения образцов сплава В95, полученных путем сварки давлением в вакууме с прокладками из медной сетки и тонкой фольги. Диффузионные потоки способны преодолевать пленку оксида алюминия в ее микроразрывах с образованием промежуточных фаз в виде расширяющихся островков.

**Ключевые слова:** Диффузионная сварка, микроструктура, свойства, В95, медь.

*Целью данной работы являлось показать возможность соединения образцов из сплава В95 сваркой давлением с применением промежуточной прослойки из меди. Твердофазному соединению деталей из алюминиевых сплавов препятствует устойчивая оксидная пленка на поверхности. Устранить ее влияние можно либо значительной степенью деформации поверхности, либо применением активных прослоек. В данной работе применены прослойки из медной проволоки и медной фольги. В первом случае сделан расчет на деформацию поверхности при обтекании проволок сплавом, во втором – только на химическое взаимодействие.*

Для проведения исследований образцы из сплава В95, соединяли давлением в вакууме при температурах 550°C, с выдержкой 30 мин, осадка 2 %. Исследования структуры и микротвердости зоны соединения проводили на микрошлифах в плоскости поперечного сечения. Прочность соединения оценивали испытаниями на ударную вязкость, проводимые с помощью вертикального копра на образцах без надреза.

В случае прокладки из сетки, обтекание сплавом проволок приводит к разрушению пленки оксида алюминия, что способствует образованию металлической связи соединяемых образцов. Вместе с тем, возникающие диффузионные потоки, формируют переходную зону, состоящую из множества слоев твердых

растворов и интерметаллидов различного состава (рис. 1). Преимущественная диффузия алюминия в зону реакции, приводит к образованию пор, а встречная диффузия меди – к повышению объемной доли промежуточных фаз в алюминиевом сплаве. Повышенная плотность частиц распространяется на глубину 60...90 мкм.

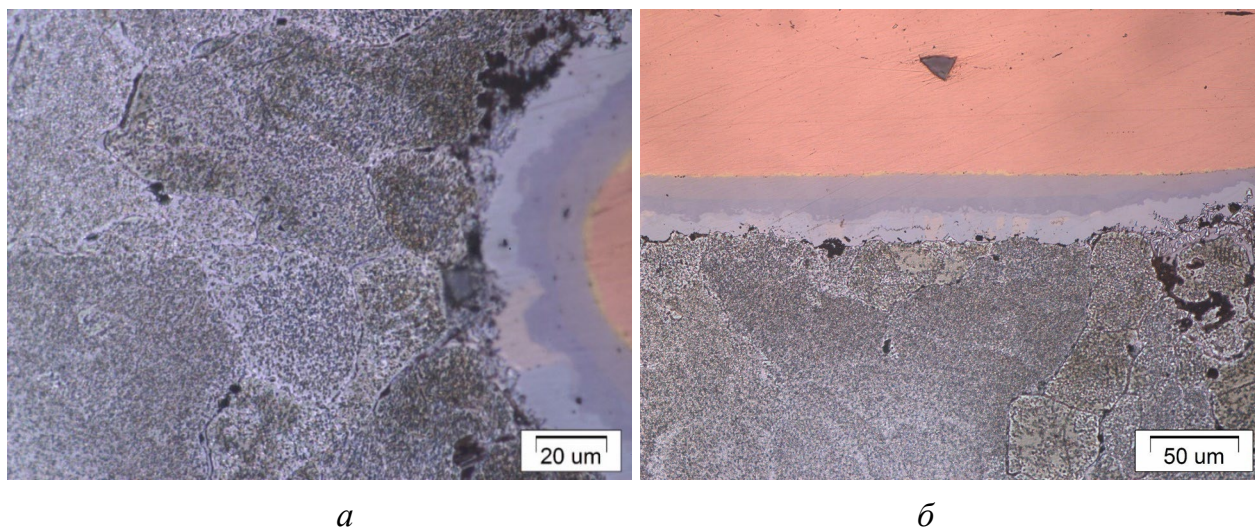


Рис. 1. Снимок микроструктуры сплава В95 в зоне сварного соединения, поперечное сечение проволоки (*a*) и продольное сечение (*б*)

В диаграмме равновесия Al-Cu имеется эвтектика с температурой равновесия 548°C, что соответствует температуре соединения заготовок (550°C). Область с повышенной плотностью частиц, скорее всего, представляет собой мелкозернистую эвтектику, образовавшуюся диффузионным путем. Следы оплавления видны только по границам зерен. Наиболее ожидаемо здесь формирование  $\theta$ -фазы, но анализируя тройную систему, можно предположить наличие  $\eta$  и  $T$  фаз, а также твердых растворов на их основе [1].

Возникновение пор в зоне соединения связано с образованием интерметаллидных фаз. Наиболее активно происходила самодиффузия алюминия в зону образования интерметаллидов и встречная диффузия меди в основной материал, формирующая эвтектику. Фаза  $\text{CuAl}_2$  имеет тетрагональную ОЦ решетку (параметры  $a=0,6066$  нм,  $c=0,4874$  нм) и содержит 12 атомов на элементарную ячейку. Параметр решетки твердого раствора меди в алюминии 0,4038 нм при 4-х атомах на элементарную ячейку [2]. Простым расчетом можно показать, что условный

объем, занимаемый атомом в решетке  $\text{CuAl}_2$ , составляет  $0,0149 \text{ нм}^3$ , а в твердом растворе  $0,0164 \text{ нм}^3$ . По этой причине формирование массивного слоя  $\theta$ -фазы и вызывает образование пор на границе с основным материалом.

В варианте прослойки из тонкой медной фольги пленка из оксида алюминия механически разрушилась незначительно и ограничила потоки диффузии. Уменьшенный по сравнению с предыдущим вариантом объем меди сформировал тонкую прослойку из интерметаллидов островкового типа (Рис.1,а). Кроме того, медь проникла вглубь алюминиевого сплава, преимущественно, по границам зерен с образованием микропор и частиц фаз.

Результаты измерения микротвердости представлены на рис. 2,б. Средняя микротвердость сплава В95 вдали от шва составила  $122 \pm 2 \text{ НВ}$ . По графике видно, что в области сварного соединения, в точках 8; 9; 17 и 18, твердость закономерно повышается. Повышенные значения микротвердости объясняются проникновением меди и образованием интерметаллидных фаз [2].

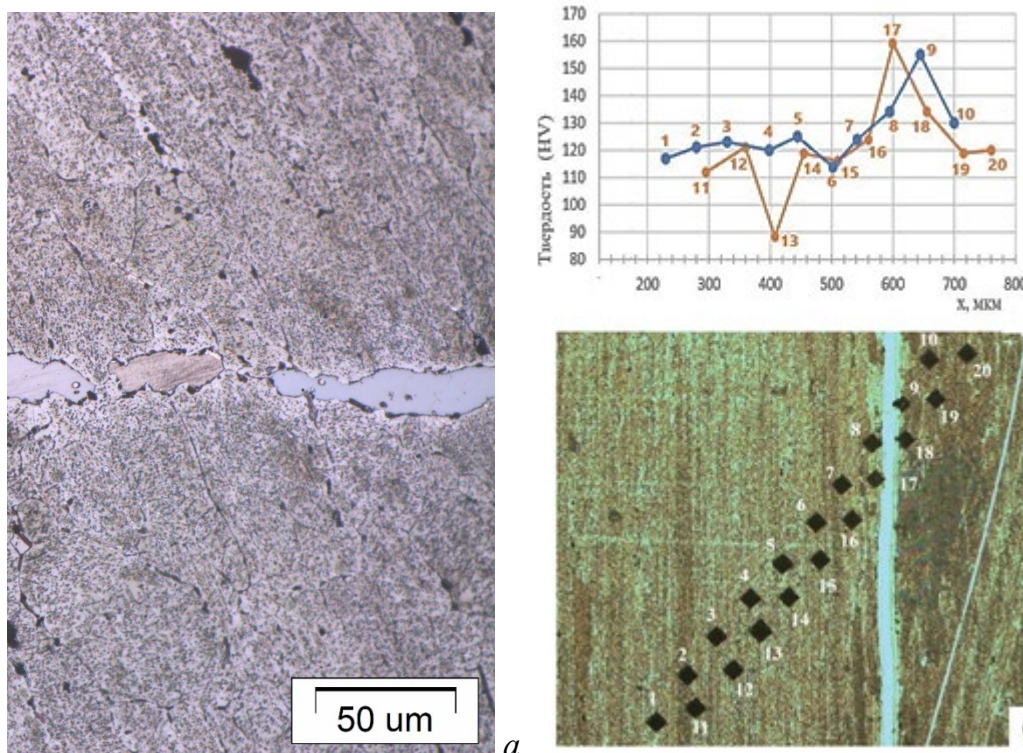


Рис. 2. Микроструктура (а) и результаты измерения микротвердости (б) по участкам образца сплава В95, сваренного с медной прослойкой

Диаграммы испытания диффузионных соединений на удар (Рис. 3) показывают, что и максимальное усилие разрушения и деформация образцов зна-

чительно выше в варианте тонкой фольги по сравнению с вариантом проволочной сетки.

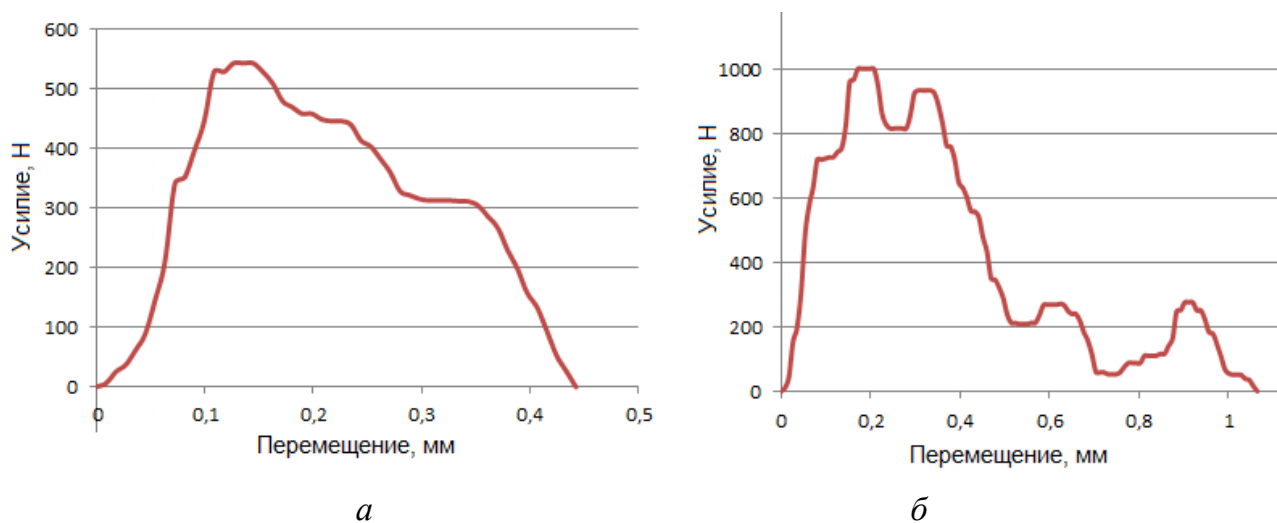


Рис. 3. Диаграммы испытаний образцов сплава В95 с прослойкой из меди в виде сетки (а) и в виде тонкой фольги (б)

Таким образом, прослойка из меди способствует формированию диффузионного соединения образцов из алюминиевого сплава В95. Диффузионные потоки способны преодолевать пленку оксида алюминия в ее микроразрывах с образованием промежуточных фаз в виде расширяющихся островков. В случае использования данного способа соединения в технологических целях следует ограничивать объем медной прослойки и тщательно подбирать режим соединения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов: перевод с английского. - М.: Металлургия, 1979. - 483с;
2. Дриц М.Е. и др. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. Справочник М. Наука. 1979. 248 с.
3. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов, 1976.

А. Э. ЗАРИПОВ

*archeer17@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. М. Ю. МУРАШКИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

**МИКРОСТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
СПЛАВА СИСТЕМЫ AL-ZR ПОСЛЕ  
ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ  
ИНТЕНСИВНУЮ ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ**

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования микроструктуры и физико-механических свойств сплава Al-0,4Zr (вес. %), после деформационно-термической обработки (ДТО), включающей отжиг, равноканальное угловое прессование методом Конформ (РКУП-К) и последующее холодное волочение (ХВ). Установлено, что после отжига при 400 °С, 72 часа в сплаве Al-0,4Zr образуются наноразмерные частицы интерметаллидной фазы Al<sub>3</sub>Zr с размером около 15 нм. Двухэтапная деформационная обработка выполненная методами РКУП-К и ХВ обеспечила получение образцов проволоки с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Деформационная обработка приводит к заметному упрочнению сплава по сравнению с состоянием после отжига при 400 °С. Показано, что достигнутый в УМЗ проволоке уровень прочности заметно выше, чем проволоки после традиционной ДТО, включающей ТО и ХВ. Показано, что электропроводность прочной проволоки с УМЗ структурой полученной ДТО с использованием РКУП-К и проволоки, полученной традиционным ДТО является идентичной.

**Ключевые слова:** сплав Al-Zr; равноканальное угловое прессование по схеме Конформ; холодное волочение; механические свойства; электропроводность, интерметаллидная фаза, ультрамелкозернистая структура.

С начала 2008 г. отмечается тенденция к значительному росту объемов выпуска проводниковых алюминиевых сплавов, в том числе и системы Al-Zr, так как цена меди к настоящему времени почти в 4 раза превышает цену алюминия [1,2].

Значительно улучшить комплекс свойств проводниковых материалов на основе алюминия можно достичь за счет формирования в них специальных ультрамелкозернистых (УМЗ) структур с оптимальным фазовым составом. Такие микроструктуры, как правило, образуются в сплавах в результате ДТО, с использованием интенсивной пластической деформации [3].

Сплавы системы Al-Zr весьма востребованы в электротехнике из-за удачного сочетания электропроводности и термической стабильности. Однако их прочность находится на низком уровне [1,2]. В этой связи, для успешной конкуренции с медными материалами, разработка подходов ее повышения в таких сплавах является весьма важной задачей. На ее решение были направлены исследования, результаты которых изложены в настоящей работе.

Объектом исследования являются заготовки сплава Al-0,4Zr (вес. %), которые были получены на предприятии ГК РУСАЛ. Помимо циркония в сплаве содержались такие примесные элементы как Fe, Si и Zn в количестве 0.24, 0.02 и 0.01 вес. % соответственно. Исходные заготовки сплава представляли собой тонкие прутки диаметром 9,5 мм.

На первом этапе ДТО исходные заготовки сплава подвергли термической обработке (ТО) в атмосферной трубчатой электропечи СУОЛ-0.7.12/10-ИЗ при температуре 400 °С, 72 часа. После ТО заготовки сплава подвергали 4 циклам РКУП-К при комнатной температуре по режиму Вс на специальной лабораторной установке РКУП-К-01НМ. В результате проведения ДТО, включающей РКУП-К, были получены заготовки квадратного сечения 9,6×9,6 мм<sup>2</sup> длиной до 0.5 м. На третьем этапе ДТО получали образцы проволоки диаметром 3 мм методом холодного волочения (ХВ). ХВ осуществляли на специализированном стане со скоростью 0.2 м/с и степенью общей вытяжки  $\mu \sim 11,5$ .

Анализ микроструктуры методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) осуществляли на микроскопе фирмы JEOL JEM-2100.

Механические свойства определяли по результатам испытаний на растяжение образцов с длиной рабочей части ( $l_0$ ) 200 мм в соответствии с ГОСТ 10446–80 «Проволока. Метод испытания на растяжение». Механические испытания образцов проводили на универсальном динамометре Instron 5982. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) образцов определяли согласно ГОСТ 7229–76 «Кабели, провода и шнуры, метод определения электрического сопротивления токопроводящих жил и проводников» с использованием микроомметра БСЗ-010-3 (класс точности 0.2).

В результате исследования микроструктуры образцов сплава после ТО было установлено, что она образована сеткой преимущественно малоугловых границ (Рис. 1а). Все субзерна находятся в отражающем положении, из-за малой разориентации относительно друг друга. Они имеют вытянутую форму (в виде волокон). Длина волокон достигает нескольких микрометров, а их средняя ширина составляет  $1,8 \pm 0,8$  мкм. В алюминиевой матрице также были обнаружены частицы, имеющие сферическую форму (Рис. 1а). Ранее проведенные исследова-



ния показали, что этими частицами является фаза  $Al_3Zr$  [3]. Размер частиц составляет от 10 до 20 нм. Образование таких частиц в сплавах обеспечивает повышение их электропроводности за счет обеднения Al твердого раствора цирконием, а также повышенную термостойкость.

После ТО и РКУП-К в сплаве была сформирована однородная УМЗ структуры (Рис. 1а). Средний размер зерна составляет  $0,98 \pm 0,29$  мкм. В продольном сечении заготовки ультрамелкие зерна имеют вытянутую форму вдоль направления сдвиговой деформации. Сформированные в результате РКУП-К ультрамелкие зерна после ХВ трансформировались в волокна ориентированные вдоль оси полученной проволоки (Рис. 1з). Средняя ширина зерен/волокон составляет  $0,42 \pm 0,13$  мкм, а их длина достигает 2 мкм.

В таблице 1 представлены результаты оценки механических свойств и электропроводности образцов проволоки сплава после разных этапов ДТО.

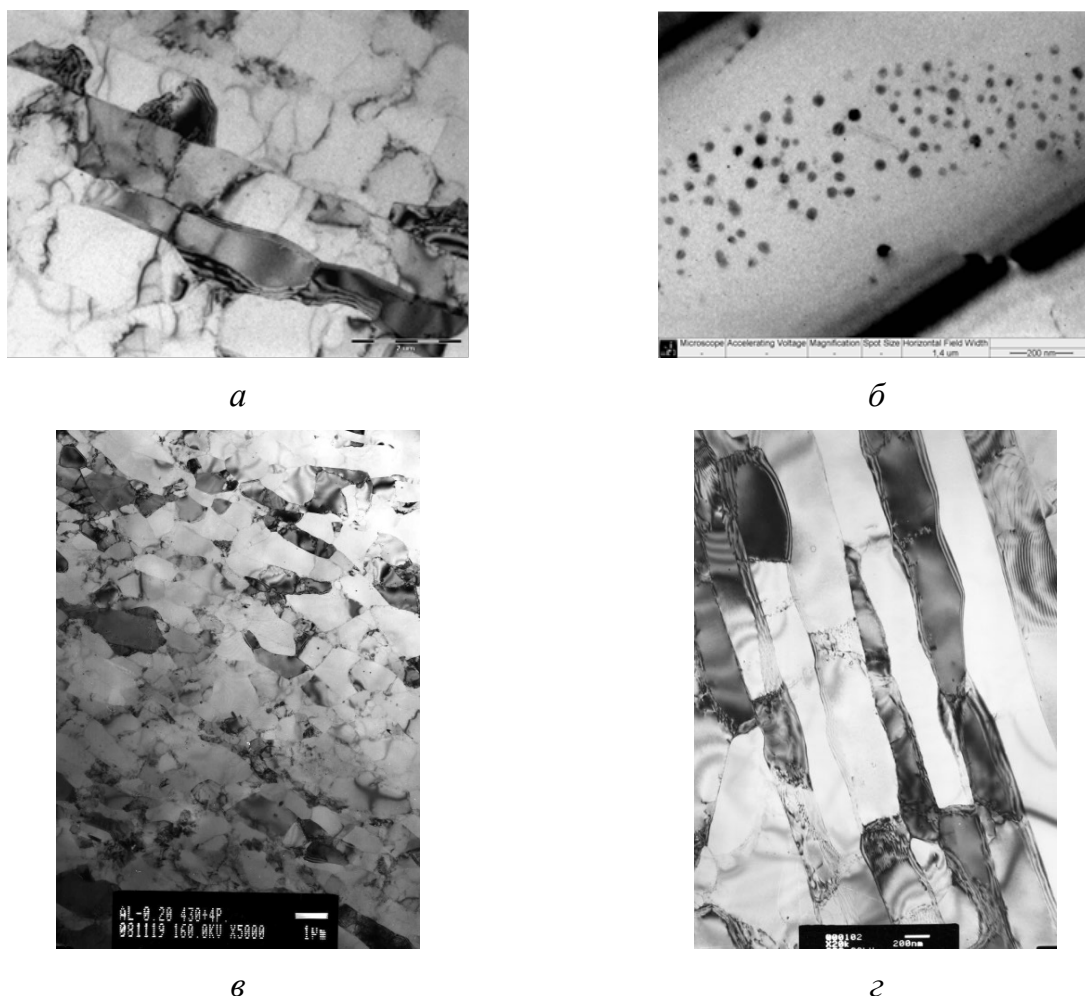


Рис. 1. Микроструктура заготовок сплава после разных этапов ДТО: а, б – после ТО при температуре  $400^\circ C$ , 72 часа (метод РЭМ и ПЭМ); в – после ТО и РКУП-К (метод ПЭМ) и з – после ТО, РКУП-К и ХВ (метод ПЭМ)

Механические свойства сплава после ДТО

Обработка	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	УЭС, Ом*мм <sup>2</sup> /м	IACS, %
ТО 400	111±9	154±12	25.5±2.7	0,03452	49.0±0.3
ТО+РКУП-К	182±6	197±3	19.8±2.8	0.02927	58.9±0.4
ТО+РКУП-К+ХВ	201±3	225±2	6.0±0.2	0.02944	58.6±0.3
ТО+ХВ*	173±10	191±5	5.7±0.2	0.02949	58.5±0.3

Анализ полученных результатов показал, что ДТО включающая РКУП-К и ХВ приводит к заметному упрочнению сплава по сравнению с состоянием после ТО при 400°С. Кроме этого, видно, что достигнутый уровень свойств при реализации такой обработки позволяет достичь в УМЗ проволоке свойств более высоких, чем в проволоке после традиционной обработки, включающей лишь ТО и ХВ (ТО+ХВ) (Таблица 1). Одной из причин увеличения прочностных характеристик проволоки после ДТО включающей РКУП-К и ХВ, является формирование в материале исследования УМЗ структуры, в то время как обычная ДТО, не обеспечивает ее образования.

Анализ изменения электрической проводимости показал, что ее значения одинаковы для проволоки после обоих видов ДТО. Отсутствие различий в электропроводности УМЗ проволоки и проволоки полученной традиционной ДТО объясняется тем, что дефекты кристаллического строения, такие как границы зерен и решеточные дислокации оказывают минимальное влияние на электрическую проводимость.

Установлено, что формирование УМЗ структуры в проволоке сплава Al-0.4Zr с использованием ДТО включающей РКУП-К обеспечивает достижение более высокой прочности ( $\sigma_B = 225$  МПа), чем в аналоге, полученном с использованием традиционной ДТО ( $\sigma_B = 197$  МПа).

Показано, что в высокопрочной УМЗ проволоке и в ее аналоге, полученном традиционной ДТО уровень электропроводности одинаков, и составляет 58,9% IACS.

*Исследовательская часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО УГАТУ»*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.И. Белый, Кабели и провода, Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий. - 2012. - №.1 - С. 8-14.
2. И.Б. Пешков, Кабели и провода, Состояние и перспективы применения алюминия в кабельной промышленности. -2009. - №1. – С. 7-9.
3. М.Ю. Мурашкин Особенности микроструктуры и физико-механические свойства ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов для электротехнических применений / Мурашкина М.Ю., Орловой Т.С., Мавлютова А.М., Медведев А.Е., Бобрук // Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – 200 с. ISBN 978-5-4221-1314-9

Ю. С. ИГОШИНА, О. Б. КУЛЯСОВА  
*igoshina.igoshina.yuliya@yandex.ru*

*Уфимский государственный авиационный технический университет  
Башкирский государственный университет*

## **КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ MG-1%ZN-0,2%CA и ZN-0,8%LI-0,1%MG**

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты исследований о влиянии легирующих элементов на коррозионную стойкость двух популярных магниевых сплавов Mg-1%Zn-0,2%Ca и Zn-0,8%Li-0,1%Mg. Проведенная оценка результатов испытаний по нескольким критериям: изменение внешнего вида поверхности образцов; изменение по глубине и количеству коррозионных поражений; изменение массы и характера коррозионных поражений, свидетельствует об относительно низкой коррозионной стойкости и о недостаточных защитных свойствах естественной окисной пленки обоих материалов.

**Ключевые слова:** магниевые сплавы; коррозионная стойкость; коррозионные исследования; коррозионные испытания; механические свойства.

### ***Введение***

В настоящее время магниевые сплавы, наряду с алюминиевыми и титановыми, представляют огромный интерес для авиационной и аэрокосмической промышленности. Применение магниевых сплавов в технике делает возможным снижение массы конструкции на 10 – 30 %, которое в итоге позволяет значительно уменьшить расход топлива [1]. Кроме того, магний значительно лучше, чем алюминий и сталь, поглощает вибрацию. Эти преимущества, а также то, что магний широко распространен в природе, увеличивают перспективность его использования в технике.

Другим перспективным и динамично развивающимся направлением использования магния и сплавов на его основе является их применение в медицине. Это применение обусловлено другими преимуществами магния и сплавов на его основе – их хорошей биосовместимостью с живыми тканями и физиологическими средами, а также способностью постепенно деградировать в процессе эксплуатации изделия с выделением нетоксичных продуктов коррозии.

Проведенные исследования показали, что наряду с преимуществами магний имеет также и ряд недостатков, которые ограничивают его применение в заявленных целях. Во-первых, чистый магний имеет высокую скорость коррозии даже в неагрессивных средах, таких как кровь и другие физиологические жидкости. Кроме того, процесс коррозии обычно сопровождается активным питтингообразованием, которое негативно влияет на механические свойства изделия. Для устранения этого недостатка магний легируют различными элементами, такими как кальций, цинк, литий, серебро, марганец и некоторые редкоземельные элементы. Выбор системы легирования осложняется условием, согласно которому сам легирующий элемент, а также продукты коррозии, образовавшиеся впоследствии, не должны быть токсичны для организма. Второй проблемой является то, что возникает потребность в упрочнении магниевых сплавов. Легирование, выполняемое для улучшения коррозионной стойкости, в некоторой мере также повышает и механические характеристики, но их необходимый уровень можно достичь путем измельчения зерна вплоть до ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры. Формирование УМЗ структуры, в отличие от обыкновенного измельчения зерна до размеров свыше 1 – 2 мкм, приводит не только к существенному упрочнению магниевых сплавов, но также часто не ухудшает, а в ряде случаев и улучшает коррозионную стойкость магниевых сплавов.

В настоящем исследовании в качестве легирующих элементов выбраны кальций, цинк, и литий т.к. система Mg-Zn-Ca и Zn-Li-Mg являются наиболее перспективными для производства биорезорбируемых имплантатов. Действительно, легирование Zn и Ca не только улучшает твердость магниевых сплавов и тем самым обеспечивает необходимую поддержку поврежденной ткани/кости [2], но эти элементы являются еще и нетоксичными (могут быть даже полезными) для человеческого организма.

Цель данной работы провести исследование влияния легирующих элементов на коррозионную стойкость двух популярных медицинских магниевых сплавов. Оценку результатов испытаний проводили по нескольким критериям: изменение внешнего вида поверхности образцов; изменение по глубине и количеству коррозионных поражений; изменение массы и характера коррозионных поражений. Провели сравнение полученных данных.

### *Материалы и методики исследований*

В качестве материала исследований были выбраны сплавы  $\square$  Mg-1%Zn-0,2%Ca и Zn-0,8%Li-0,1%Mg.

В качестве заготовок использовались небольшие круглые образцы. Размеры и вес образцов для обоих сплавов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные размеры и вес заготовок

Сплав	Образец	Диаметр, см	Высота, см	Площадь, см <sup>2</sup>	Масса, г
Mg-1%Zn0,2%Ca	1	1,9	0,1	6,264	0,4641
	2	1,95	0,08	6,459	0,4030
	3	1,9	0,08	6,145	0,4625
Ср. знач.				6,289	0,4432
Zn-0,8%Li-0,1%Mg	1	2	0,15	7,222	2,988
	2	2	0,15	7,222	2,693
	3	2	0,15	7,222	2,915
Ср.знач.				7,222	2,865

Структура сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca изображена на рисунке 1. Она состоит из равноосных зерен  $\alpha$ -Mg со средним размером 270 мкм. В теле зерен также присутствуют Mg<sub>2</sub>Ca частицы размером до 1 мкм, а на границе размер этих частиц составил 4 мкм, общая объемная доля частиц Mg<sub>2</sub>Ca в образцах сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca составил 4%.

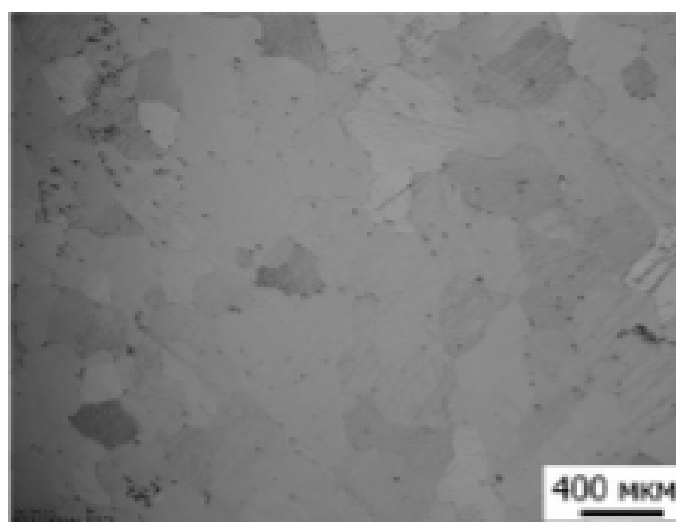


Рис. 1. Структура сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca в исходном состоянии

Структура исходного сплава Zn-0,8%Li-0,1%Mg (рисунок 2) содержит две области (светлую и темную); темная область соответствует первичной бета-фазе

$\text{LiZn}_4$ , а светлая область соответствует эвтектике  $\text{Zn}+\beta\text{-LiZn}_4$ . В темной области имеются крупные первичные дендриты  $\beta\text{-LiZn}_4$  размером более 1 мкм. Частицы  $\text{Zn}$  также были обнаружены в первичной фазе  $\beta\text{-LiZn}_4$ , эти данные хорошо согласуются с работой [3]. Структура также содержит частицы, расположенные по границам и в теле зерен, скорее всего, это частицы  $\text{Zn}_{11}\text{Mg}_2$ . Значение микротвердости исходного состояния составляло  $98\pm 5$  HV.

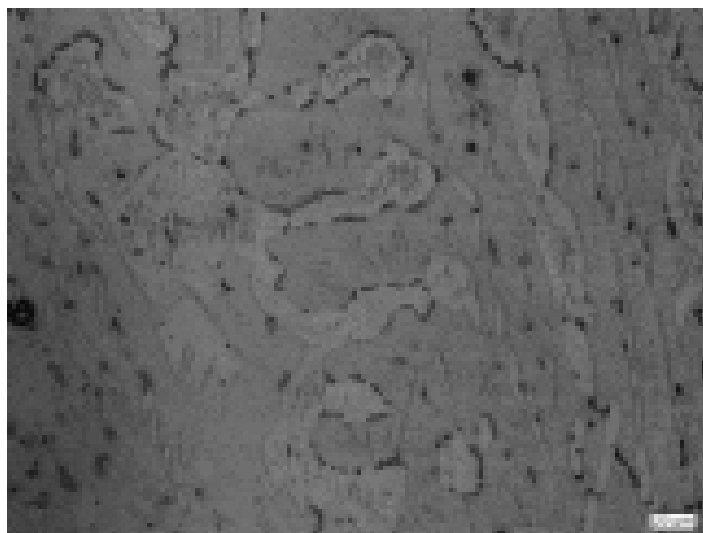


Рис. 2. Структура сплава  $\text{Zn-0,8\%Li-0,1\%Mg}$  в исходном состоянии

Для коррозионного исследования провели подготовку поверхности образца, это шлифовка и полирование.

Коррозионное исследование магниевых сплавов проводилось по гравиметрическому методу, по методу количественного химического анализа, основанного на точном измерении массы вещества. Исследование проводилось с использованием исходных образцов: сплава  $\text{Mg-1\%Zn-0,2\%Ca}$  и  $\text{Zn-0,8\%Li-0,1\%Mg}$ , для каждого сплава использовалось по 3 образца.

В данной работе представлены результаты потери массы магниевого сплава в одномолярном растворе  $\text{HCl}$  при комнатной температуре с использованием аналитических весов OHAUS Explorer с точностью до 0,0001 г.

После проведения опыта провели расчеты скорости коррозии по массовому показателю коррозии [4], а для оценки коррозионной стойкости сплава определили глубинный показатель коррозии (ГОСТ 9.908-85).

Затем провели исследования микроструктуры после коррозионных испытаний на световом микроскопе «OLYMPUS GX51».

### ***Результаты***

Испытание со сплавом Mg-1%Zn-0,2%Ca длилось 1 минуту, это связано с тем, что образец стал моментально растворяться после погружения его в одномолярный раствор HCl. Его масса заметно уменьшилась, продолжение эксперимента могло привести к полной потере образца. Структура всех трех образцов сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca после исследования представлены на рисунке 3,4.

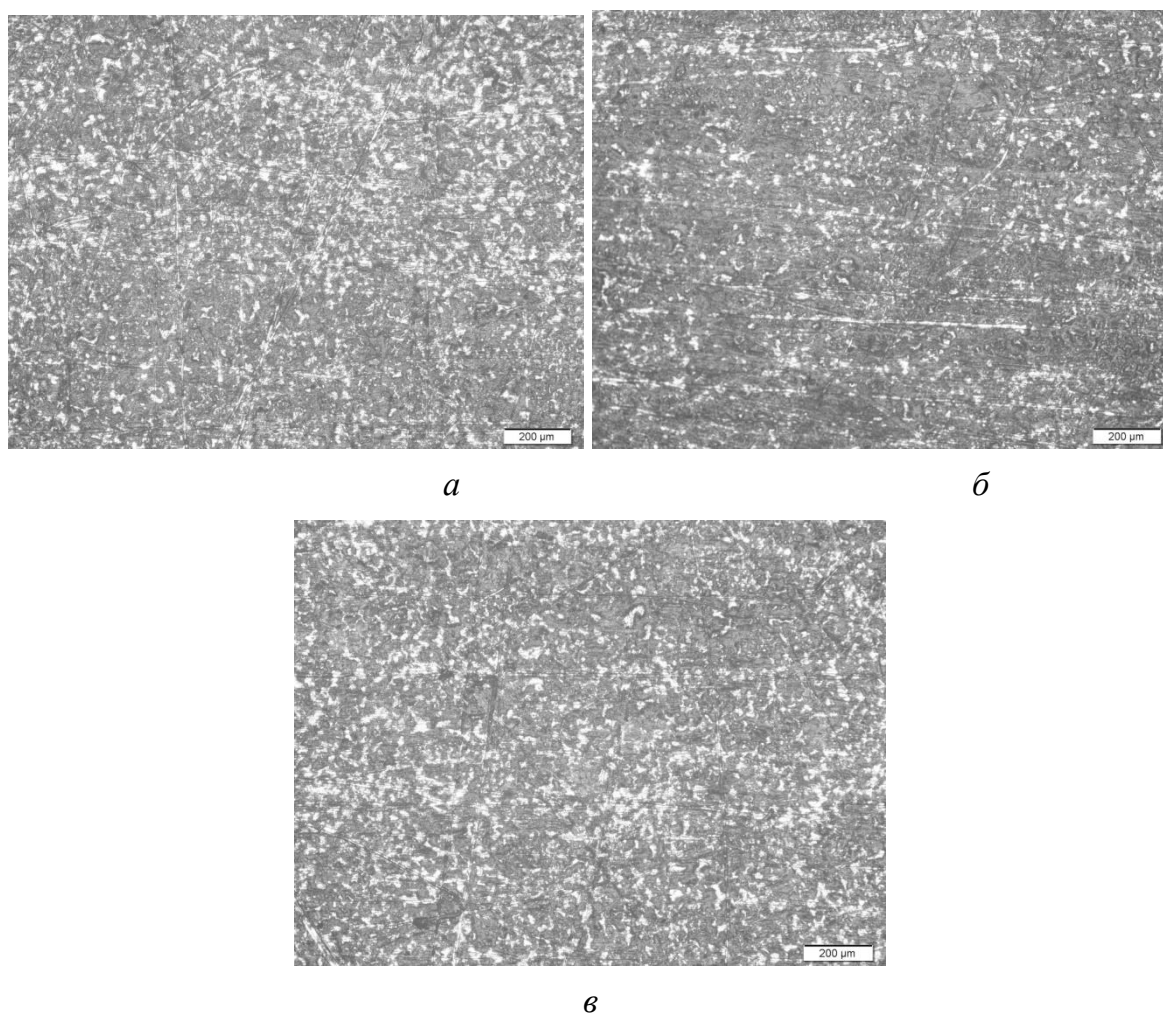


Рис. 3. Структура сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca после коррозионных испытаний:  
*a* – образец № 1; *б* – образец №2; *в* – образец № 3



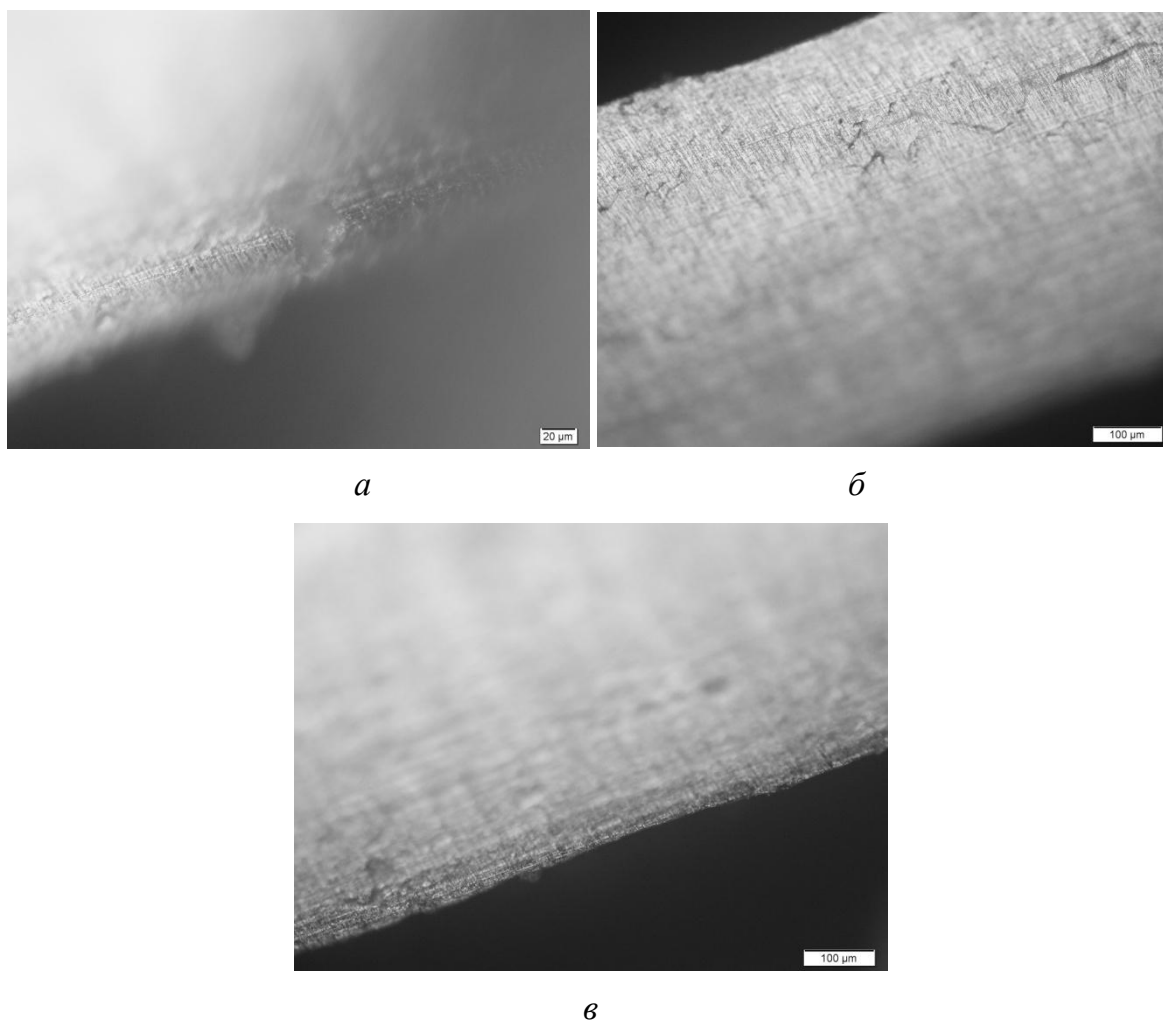
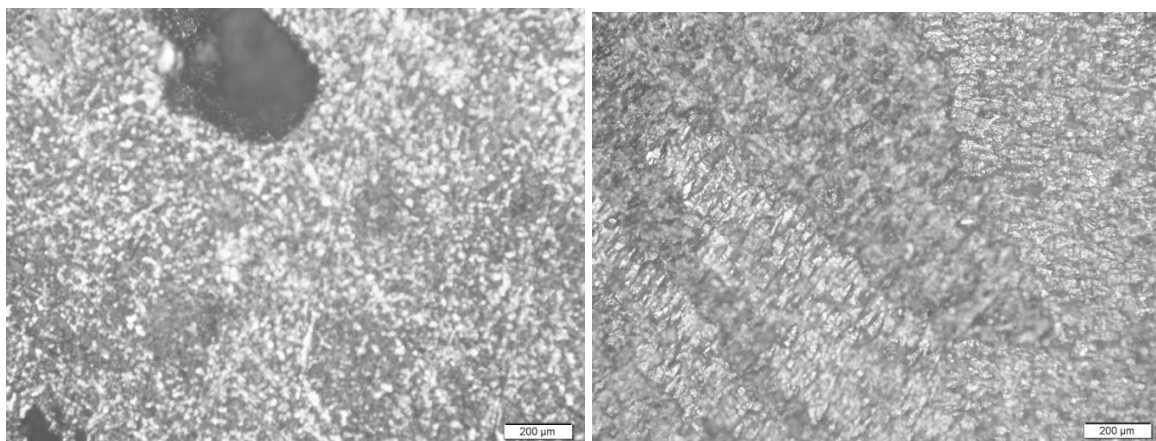


Рис. 4. Изображение среза сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca после коррозионных испытаний:  
*a* – образец № 1; *б* – образец №2; *в* – образец № 3

После коррозионных испытаний у всех трех образцов на СМ-изображениях наблюдается пористая поверхность и протравленные границы. На торцевой части образцов заметны точечные коррозионные очаги по всей поверхности. В сплавах, содержащих Ca, увеличение содержания Zn приводит к увеличению доли фазы  $Mg_6Zn_3Ca_2$ , которая, выступая в роли микрокатодной пары, ухудшает коррозионную стойкость.

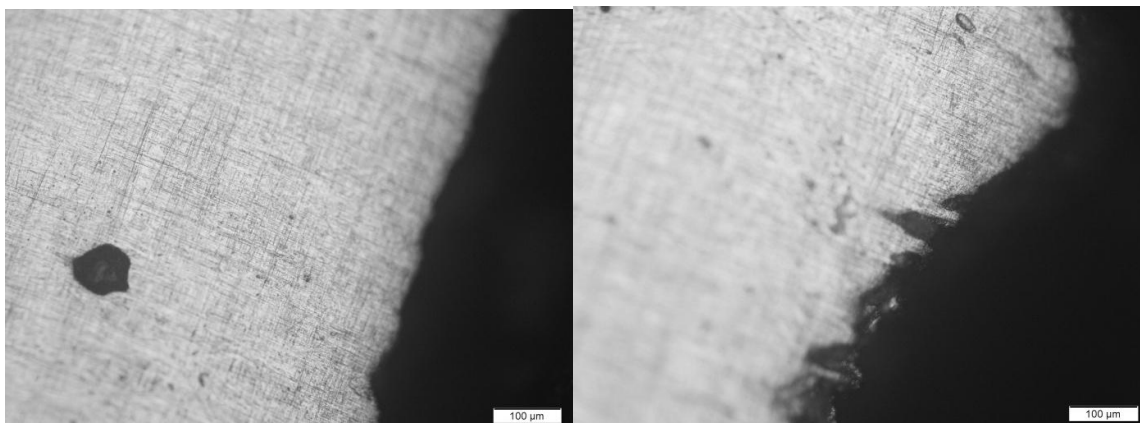
Рассмотрим второй сплав Zn-0,8%Li-0,1%Mg. Ситуация с этими образцами совершенно другая (рис. 5,6). В отличие от первого сплава, данный сплав был подвержен коррозионной среде 39 часов. Образцы заметно меньше потеряли в весе.



*a*

*б*

Рис. 5. Структура сплава Zn-0,8%Li-0,1%Mg после коррозионных испытаний:  
*a* – образец № 1; *б* – образец №2



*a*



*б*

Рис. 6. Изображение среза сплава Zn-0,8%Li-0,1%Mg после коррозионных испытаний:  
*a* – образец № 1; *б* – образец №2

После коррозионных испытаний поверхность образца сплава Zn-0,8%Li-0,1%Mg корродирует по всей поверхности. Так же видно образование локальных, более глубоких дефектов в центре образцов. Проанализировав поверхности

сплава до и после опыта можно сделать вывод, что мы видим язвенную коррозию с разной степенью однородности. Они характеризуются появлением на поверхности отдельных или множественных пористых повреждений, глубина и поперечные размеры которых соизмеримы.

Результаты исследования коррозионной стойкости для обоих сплавов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты исследования коррозионной стойкости

Сплав	Образец	Исходная площадь, см <sup>2</sup>	Исходная масса, г	Конечная масса, г	Время испытания
Mg-1%Zn-0,2%Ca	1	6,264	0,4641	0,3357	1 мин
	2	6,459	0,4030	0,2693	1 мин
	3	6,145	0,4625	0,3587	1 мин
Ср. знач.		6,289	0,4432	0,3212	
Zn-0,8%Li-0,1%Mg	1	7,222	2,9881	2,0625	39 ч
	2	7,222	2,6934	1,9075	39 ч
	3	7,222	2,9151	1,9851	39 ч
Ср.знач.		7,222	2,8653	1,9850	

В таблице 3 приведены результаты о скорости коррозии, определяемые по массовому показателю коррозии и результаты о глубинном показателе, для оценки коррозионной стойкости сплава.

Таблица 3

Расчет скорости и коррозионной стойкости коррозии

Сплав	Изменение массы Δm, г	Массовый показатель K <sub>m</sub> -, г/м <sup>2</sup> ·ч	Глубинный показатель, мм/год
Mg-1%Zn-0,2%Ca	0,1220	11616,138	58,481
Zn-0,8%Li-0,1%Mg	0,8803	47537,662	69,871

По результатам исследования можно сказать, что магниевые сплавы достаточно быстро разрушается в соляной кислоте HCl из-за того, что она является очень агрессивной по отношению к металлам. Это обуславливается содержанием в ней ионов Cl<sup>-</sup>. Следовательно, лучше применять другую коррозионную среду для данного сплава.

Оценка глубинного показателя показала, что оба сплава относятся к группе нестойких в данной коррозионной среде ( $> 10$  мм/год), причем более нестойкий получился образец сплава после Zn-0,8%Li-0,1%Mg (69,871 мм/год).

### **Заключение**

В данной работе по результатам исследования двух популярных медицинских магниевых сплавов, можно судить об относительно низкой коррозионной стойкости и о недостаточных защитных свойствах естественной окисной пленки обоих материалов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Song, G. L. Corrosion behavior of magnesium alloys and protection techniques //Surface engineering of light alloys. – Woodhead Publishing, 2010. – С. 3-39.
2. Zheng Y. Magnesium Alloys as Degradable Biomaterials. USA: CRC Press, 2015. 578 pСтефанюк, С.Л. Металлургия магния и других легких металлов / С.Л. Стефанюк. – М.: Металлургия, 1985. – 200 с.
3. Characterization and corrosion behaviour of biodegradable Mg-Ca and Mg-Ca-Zn implant alloys / Н. R. Bakhsheshi-Rad, et. al. // Applied Mechanics and Materials. 2012. V. 121-126, P. 568-572. [ Н. R. Bakhsheshi-Rad, et. al., "Characterization and corrosion behavior of biodegradable Mg-Ca and Mg-Ca-Zn implant alloys", in Appl. Mech. Mat., vd.121, pp. 568-572, 2012.]
4. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов: Учебное пособие для вузов. – Металлургия, 1976.
5. Рахимов, У. Т. и др. Изучение влияния цинка Zn на размер зерна и коррозионную стойкость сплавов системы Mg-Nd-Y-Zr //Scientific progress. – 2021. – Т. 2. – №. 2. – С. 1488-1490.
6. Němec, M. Influence of alloying element Zn on the microstructural, mechanical and corrosion properties of binary Mg-Zn alloys after severe plastic deformation / M. Němec, A. Jäger, K. Tesař et al. // Materials Characterization. – 2017. – V. 134. – P. 69 – 75.
7. Альтман, М.Б. Магниевые сплавы I. Справочник. Металловедение магния и его сплавов. Области применения / М.Б. Альтман, А.П. Антипова, В.А. Блохина и др. под редакцией М.Б. Альтмана, М.Е. Дрица, М.А. Тимоновой, М.В. Чухрова. – М.: Металлургия, 1978. – 234 с.
8. Li, R. Effect of Li addition on the mechanical behavior and texture of the as-extruded AZ31 magnesium alloy / R. Li, F. Pan, B. Jiang et al. // Materials Science and Engineering A. – 2013. – V. 562. – P. 33 – 38.
9. Peng T., Xuanyong L. Surface modification of biodegradable magnesium and its alloys for biomedical applications // Regenerative Biomaterials. 2015. V. 2, P. 135-151. [ T.Peng, L.Xuanyong "Surface modification of biodegradable magnesium and its alloys for biomedical applications", in Regenerative Biomaterials, vol. 2, pp. 135-151, 2015. ]
10. B. Jia, H. Yang, Yu Han, Z. Zhang, X. Qu, Y. Zhuang, Q. Wu, Yu. Zheng, K. Dai, In vitro and in vivo studies of Zn-Mn biodegradable metals designed for orthopedic applications. Acta Biomaterialia 108 (2020) 358-372.

А. М. КАЗАКОВ  
ezabfarm@mail.ru

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. Е. А. КОРЗНИКОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИСЛОКАЦИЙ С РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ В ОЦК РЕШЕТКЕ

**Аннотация.** Вольфрам широко используется в качестве материала, способного выдержать условия работы в ядерных реакторах и других экстремальных условиях. Под воздействием облучения в металле образуются такие дефекты, как пары Френкеля, поры и дислокационные петли. Поэтому важными на сегодняшний день являются исследования, направленные на изучение взаимодействий этих дефектов друг с другом и влияния данных взаимодействий на механические свойства металла. В статье представлено теоретическое исследование, основанное на методе молекулярной динамики, целью которого является изучение механизма деформационного упрочнения вольфрама, связанного с взаимодействием дислокаций с порами. Решение данной задачи получено с использованием пакета LAMMPS. Исследуемая модель представляет собой монокристалл ориентации  $[111]$ ,  $[-1-12]$ ,  $[1-10]$  вдоль основных координатных осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно, в котором рассматривается скольжение краевых дислокаций в основной системе скольжения металлов с объемно-центрированной кубической кристаллической решеткой и их взаимодействие с порами. Изучено влияние размера пор на величину сдвигающего напряжения: рост диаметра поры пропорционален росту напряжения. Рассчитаны зависимости сдвигающего напряжения от деформации сдвига в интервале температур 600–1400 К, причем изменение температуры не оказывает значительного влияния на величину напряжения. Показано, что дислокации перерезают поры, и при повторном взаимодействии с порой наблюдается меньшее значение пикового сдвигающего напряжения, чем при первом. Описан механизм взаимодействия краевых дислокаций и пор под воздействием сдвигающего напряжения.

**Ключевые слова:** вольфрам; метод молекулярной динамики; поры; дислокации; взаимодействие дефектов; сдвиговая деформация.

### **Введение**

Проблема выбора и разработки материалов для ядерной энергетики остается актуальной. Выбор таких материалов определяется их физическими, химическими, механическими свойствами. Вольфрам – один из перспективных материалов, который может быть применен в различных установках для ядерных и термоядерных реакторов. Разработка и выбор передовых материалов естественным образом обусловлены необходимостью увеличения диапазона рабочих температур и флюенса, что позволит расширить возможности проведения современных экспериментальных исследований. Например, в обзорной статье [1] авторы

обсуждают возможность использования вольфрама как обращенного к плазме материала термоядерных установок и пути устранения недостатков вольфрама, таких как высокая температура перехода из хрупкого состояния в пластическое, радиационное охрупчивание и др. Под воздействием облучения в материале накапливаются радиационные повреждения, образуются полости и другие дефекты на различной глубине [2]. Кроме того, авторами работы [3] получена зависимость плотности и размера пор от температуры и дозы облучения.

В качестве основного метода исследования был использован метод молекулярной динамики, который ранее зарекомендовал себя как эффективный инструмент анализа различных аспектов трансформации структуры кристаллических решеток в результате внешних воздействий, в том числе при изучении дефектов краудиионного типа [4-6], устойчивости к нагреву нанокристаллов, армированных углеродными нанотрубками [7], анализе деформационно индуцированных фазовых переходов [8], формоизменения кристаллов в результате внешних электромагнитных воздействий [9] и многих других.

### *Методика проведения исследования*

Моделирование проводилось с использованием пакета LAMMPS и многоатомного межатомного потенциала для вольфрама [10]. Для визуализации результатов использовалась программа OVITO (Open Visualization Tools). Ранее данное программное обеспечение неоднократно использовалось для моделирования экстремальных воздействий в решетках металлов и сплавов, включая такие динамические дефекты, как краудиионы и воидионы – внедренные в плотноупакованный ряд межузельные дефекты, которые могут обеспечить высокую скорость массопереноса в металлах [11-14]. Вольфрам – ОЦК металл с параметром решетки  $a=3,160 \text{ \AA}$ . Основная система скольжения в ОЦК металлах –  $\{110\}\langle -111 \rangle$ . Моделирование проводилось для пор различного диаметра (0,5, 1, 2, 4, 6 нм) и для различных температур (600, 800, 1000, 1200, 1400 К), при которых совершалась пластическая деформация.

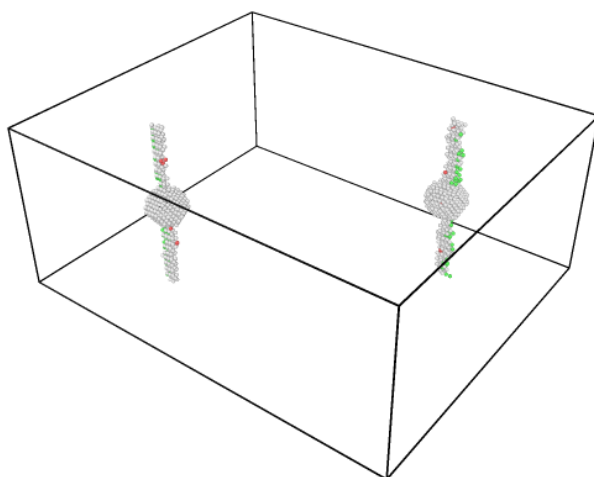


Рис. 1. Стартовое положение дислокаций и пор.  $D=2$  нм,  $T=600$  К

### *Результаты исследования*

В результате приложения монотонно увеличивающейся сдвиговой деформации дислокации начинали двигаться в поле сдвигающего напряжения. Итоги моделирования позволяют получить зависимости «напряжение – деформация» и изучить механизм взаимодействия поры и дислокации.

На рис. 2 и 3 показаны зависимости сдвигающего напряжения от деформации для различных диаметров пор при  $T=600$  К и для различных температур при диаметре пор 4 нм соответственно.

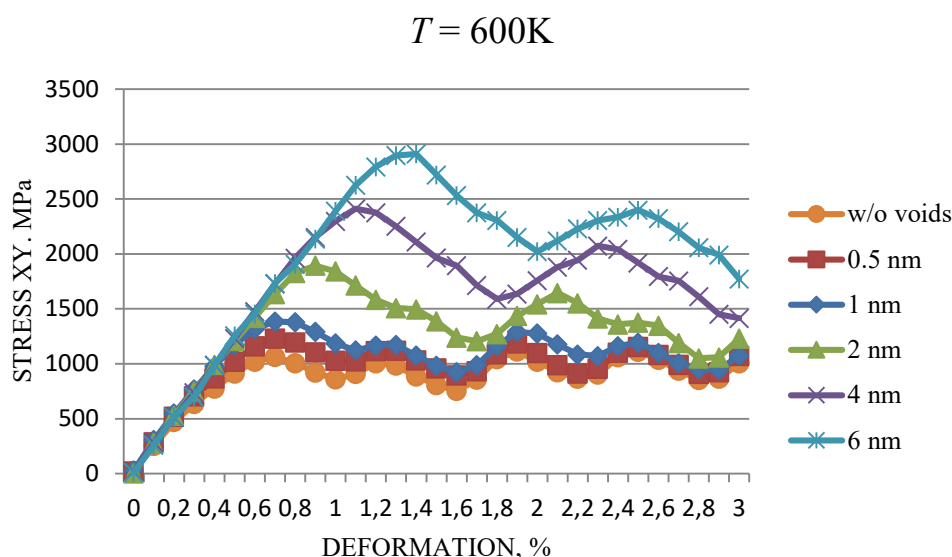


Рис. 2. Зависимость сдвигающего напряжения от деформации для различных диаметров пор от 0,5 до 6 нм при температуре  $T=600$  К

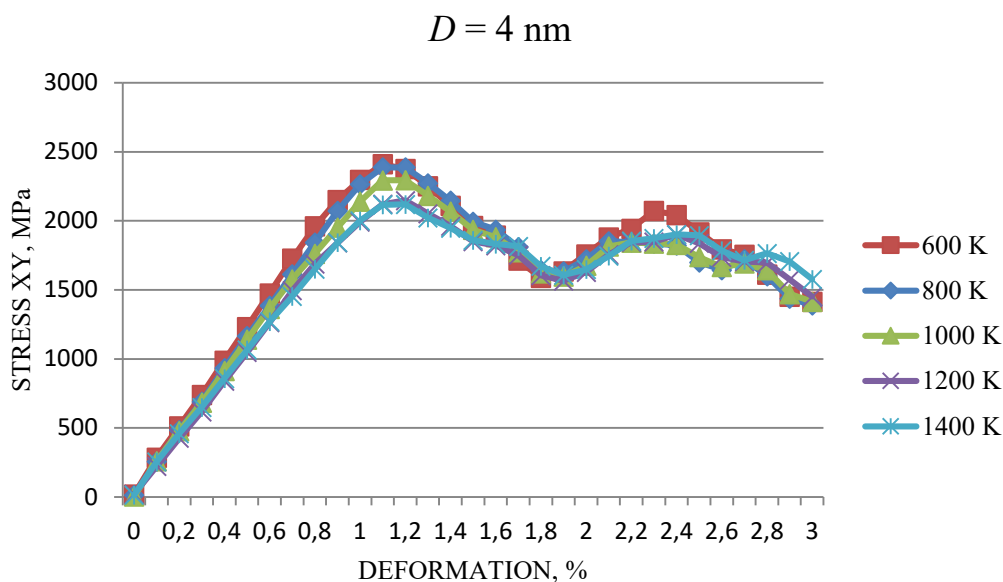


Рис. 3. Зависимость сдвигающего напряжения от деформации для различных температур от 600 до 1400 К при диаметре пор  $D=4 \text{ nm}$

С помощью OVITO был изучен механизм взаимодействия дислокаций с порами. С повышением сдвигающего напряжения дислокации начинают выгибаться, затем происходит их отрыв от поры, и дислокации бегут к следующим порам в силу периодических граничных условий. При рассмотрении поры после отрыва дислокации заметно, что дислокация перерезает препятствие (рис. 4).

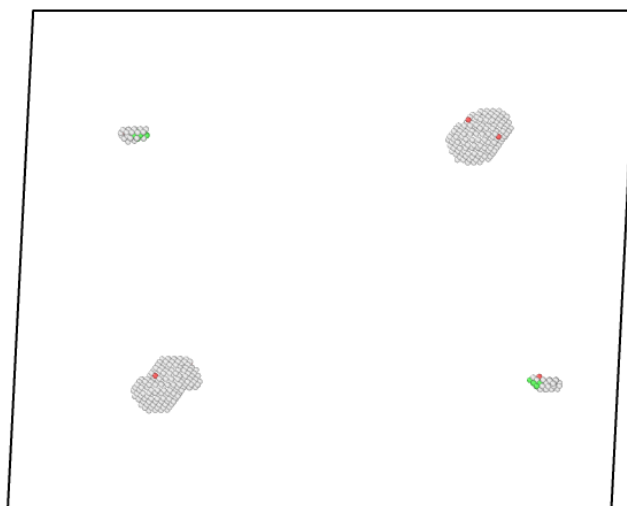


Рис. 4. Поры после прохождения через них дислокаций. Видно, что дислокации перерезают поры.  $D=2 \text{ nm}$ ,  $T=600 \text{ K}$



## **Выводы**

Для пор диаметра 1 нм и менее характер зависимостей напряжения от деформации практически одинаков как для ячеек с порами, так и без пор, наблюдается лишь небольшое повышение уровня напряжений с ростом диаметра пор. С увеличением температуры величина напряжения течения уменьшается, однако при температурах 1200 и 1400 К уже практически не меняется по значению. Будущие исследования будут направлены на изучение влияния скорости деформации и расстояния между порами на величину напряжения течения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «УГАТУ» (соглашение № 075-03-2022-318/1) «Молодежная научно-исследовательская лаборатория НОЦ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» для Ю.Р. Шараповой (проведение расчетов), гранта № НШ-4320.2022.1.2 для А.М. Казакова (анализ и обсуждение полученных результатов), гранта РФФИ № 21-12-00275 для Е.А. Корзниковой (постановка задачи, концептуализация исследования).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубева А.В., Черкез Д.И. Накопление водорода в разработанных для термоядерных установок сплавах вольфрама (обзор) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. № 4. С. 26–37.
2. Хрипунов Б.И., Койдан В.С., Рязанов А.И., Гуреев В.М., Корниенко С.Н., Латушкин С.Т., Муксунов А.М., Семенов Е.В., Столярова В.Г., Унежев В.Н. Радиационно-поврежденный вольфрам: получение и исследование в потоке стационарной плазмы // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. № 4. С. 40–49.
3. Ipatova I., Harrison R.W., Donnelly S.E., Rushton M.J.D., Middleburgh S.C., Jimenez-Melero E. Void evolution in tungsten and tungsten-5wt.% tantalum under in-situ proton irradiation at 800 and 1000 °C // Journal of Nuclear Materials. 2019. Vol. 526. Article number 151730.
4. Shelepev I.A., Bayazitov A.M., Korznikova E.A. Modeling of supersonic crowdion clusters in FCC lattice: Effect of the interatomic potential // Journal of Micromechanics and Molecular Physics. 2021. Vol. 6. № 1. Article number 2050019.
5. Kolesnikov I.D., Shepelev I.A. Excitation and propagation of 1-crowdion in bcc niobium lattice // Materials. Technologies. Design. 2022. Vol. 4. № 1. P. 5–10.
6. Chetverikov A.P., Shepelev I.A., Korznikova E.A., Kistanov A.A., Dmitriev S.V., Velarde M.G. Breathing subsonic crowdion in Morse lattices // Computational Condensed Matter. 2017. Vol. 13. P. 59–64.

7. Янковская У.И., Захаров П.В. Устойчивость к нагреву кристалла платины, армированного углеродными нанотрубками // *Materials. Technologies. Design*. 2021. Т. 3. № 4. С. 64–67.
8. Chen H.-Y., Tsou N.-T. The Analysis of Thermal-Induced Phase Transformation and Microstructural Evolution in Ni-Ti Based Shape Memory Alloys By Molecular Dynamics // *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2019. Vol. 120. № 2. P. 319–332.
9. Yoon T., Kang S., Kang T.Y., Kim T.-S. Detection of Graphene Cracks By Electromagnetic Induction, Insensitive to Doping Level // *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2019. Vol. 120. № 2. P. 351–361.
10. Zhou X.W., Johnson R.A., Wadley H.N.G. Misfit-energy-increasing dislocations in vapor-deposited CoFe/NiFe multilayers // *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 2004. Vol. 69. № 14. Article number 144113.
11. Shepelev I.A., Dmitriev S.V., Kudreyko A.A., Velarde M.G., Korznikova E.A. Supersonic voidions in 2D Morse lattice // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020. Vol. 140. Article number 110217.
12. Shepelev I.A., Korznikova E.A., Bachurin D.V., Semenov A.S., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V. Supersonic crowdion clusters in 2D Morse lattice // *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*. 2020. Vol. 384. № 1. Article number 126032.
13. Babicheva R.I., Evazzade I., Korznikova E.A., Shepelev I.A., Zhou K., Dmitriev S.V. Low-energy channel for mass transfer in Pt crystal initiated by molecule impact // *Computational Materials Science*. 2019. Vol. 163. P. 248–255.
14. Shepelev I.A., Bachurin D.V., Korznikova E.A., Bayazitov A.M., Dmitriev S.V. Mechanism of remote vacancy emergence by a supersonic crowdion cluster in a 2D Morse lattice // *Chinese Journal of Physics*. 2021. Vol. 70. P. 355–362.

К. А. КИМ

kari2001kim@gmail.com

Науч. руковод. – д-р техн. наук Д. В. ГУНДЕРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СПЛАВА Ti18Zr15Nb, ПОДВЕРГНУТОГО РКУП

**Аннотация.** Исследование сплава Ti18Zr15Nb после РКУП показали, что ОЦК  $\beta$  является основной фазой в исходном сплаве Ti-18Zr-15Nb и после РКУП. В результате РКУП прочность и предел текучести сплавов значительно увеличиваются за счет измельчения структуры. При увеличении количества циклов РКУП ( $n$ ) с 4 до 8 прочностные свойства сплав продолжают расти. Увеличение предела текучести сплава Ti18Zr15Nb после РКУП вместе с сохранением  $\beta$ -состояния позволяет ожидать повышения функциональных свойств сплава.

**Ключевые слова:** Ti18Zr15Nb, сплав, равноканальное угловое прессование (РКУП), импланты, рентгеноструктурный анализ (РСА),  $\beta$ - фаза.

Особую привлекательность, как материалов для имплантатов, имеют сплавы Ti18Zr15Nb, разработанные командой проф. Прокошкина С.Д., НИТУ МИСиС, Москва. Основной фазой сплавов Ti18Zr15Nb является  $\beta$  - фаза с пониженным модулем упругости. Данный сплав имеет такое важное свойство как эффект памяти формы. [1] Возможным способом улучшением свойств металлов и сплавов, включая сплав Ti18Zr15Nb – является формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры методом РКУП. Исходные образцы - прутки сплава Ti-18Zr-15Nb, обработанные методом радиально - сдвиговой прокатки (РСП) при температурах до 800 С, были получены от команды проф. Прокошкина С.Д., НИТУ МИСиС, Москва. Ранее приведенные исследования показали, что при РКУП сплава Ti18Zr15Nb 200°С, что ниже температуры активного выделения вторичных фаз альфа и омега), с количеством циклом ( $n$ ) более 3 невозможно, поскольку образцы разрушаются.

В данном исследовании было использовано Ti18Zr15Nb РКУП при 500°С, что выше температуры активного выделения паразитных альфа и омега фаз. Равноканальное угловое прессование (РКУП) было проведено на оснастки с диаметром  $d=20$ , угол оснастки 120° при температуре 500°С, (образцы предварительно разогревались при 550°С). Количество проходов  $n=4$  и  $n=8$ .

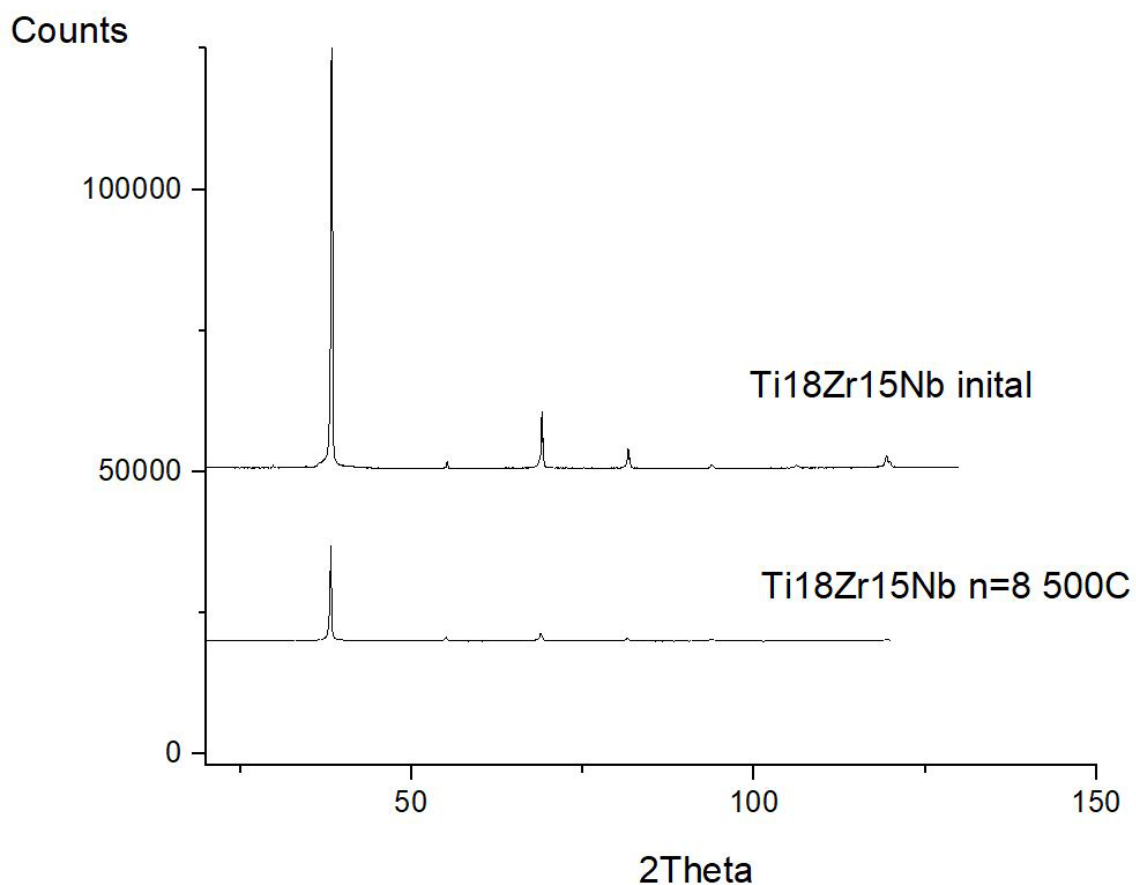


Рис 1. TZN 700 С 30 мин исходный и TZN n=8 500

Результаты рентгеноструктурного анализа (РСА) показали, что ОЦК  $\beta$  является основной фазой в сплаве Ti18Zr15Nb и до и после РКУП.

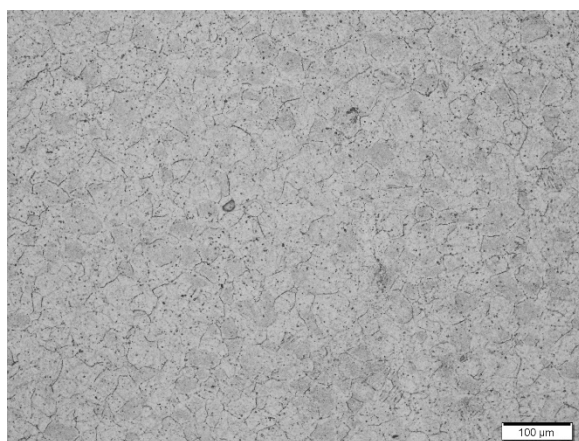


Рис. 2. Микроструктура (ОМ) прутков Ti18Zr15Nb после ТМО, отжиг 700° 30 мин, (исходный для РКУП)

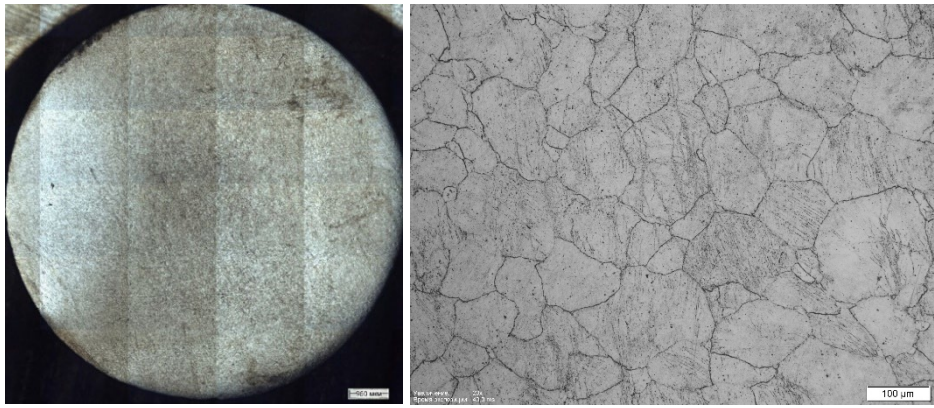


Рис. 3. Микроструктура ОМ образца Ti18Zr15Nb РКУП n =4 500 °С

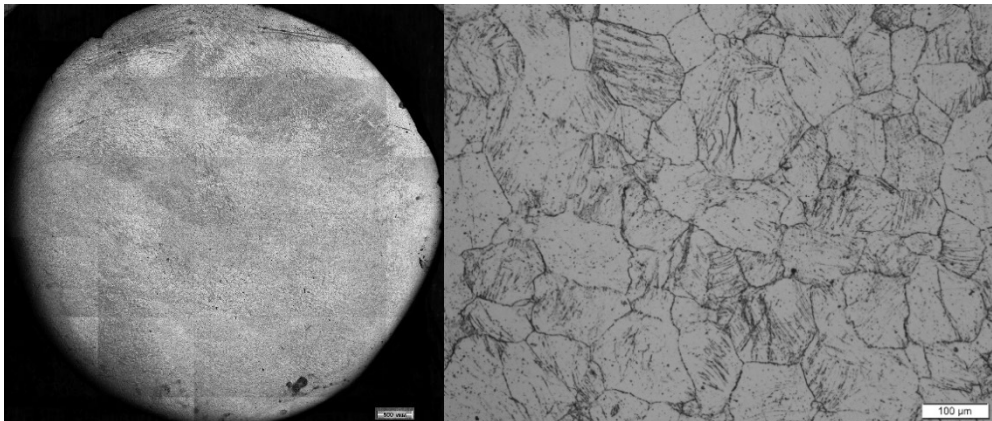


Рис. 4. Микроструктура ОМ Ti18Zr15Nb РКУП n =8 500 °С

При повышении температуры РКУП до 500 °С подавляется формирование магистральных макрополос деформации (которые наблюдались при РКУП 200 °С в ранних исследованиях). Согласно оптической металлографии (ОМ) после РКУП n=4 и n=8 при 500 °С внутри исходных зерен наблюдаются микрополосы и пакеты микрополос, а также после РКУП n=8 500 °С в сплаве формируется деформированная субструктура бета-фазы с размерами фрагментов около 500 нм.

Таблица 1

Результаты мех. испытаний сплава Ti18Zr15Nb до и после РКУП при 200° и 500° 4 цикла (образцы для испытаний вырезались в поперечном направлении РКУП-прутков)

Материал	$\sigma_{max}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	Енласт, %	FWHM
Исходный	630	510	27	0,16
РКУП n=4 500 °С	825	665	16	0,245
РКУП n=8 500 °С	910	880	6	0,235

Результаты анализа механических свойств после РКУП  $n=4$   $500^\circ$  показали, что значения прочности ( $\sigma_{\max} = 825$  МПа), предела текучести ( $\sigma_{0,2} = 665$  МПа) повысились при пластичности 16 %. После РКУП  $n=8$   $500^\circ$  были получены следующие значения  $\sigma_b = 910$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 880$  МПа и  $\delta = 6\%$ . Повышение прочности и предела текучести при сохранении состояния с основной ОЦК  $\beta$  фазы позволяет ожидать реализации в РКУП сплаве Ti18Zr15Nb повышенных эффектов сверхупругости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheremet'ev V.A., Akhmadkulov O.B., Komarov V.S., Korotitskii A.V., Lukashevich K.E., Gal'kin S.P., Andreev V.A., Prokoshkin S.D. 2021. Thermomechanical Behavior and Structure Formation of Shape Memory Ti – Zr – Nb Alloy for Medical Applications. Metal Science and Heat Treatment. Vol. 63, pp. 3 – 12
2. Ультрамелкозернистые сплавы с памятью формы: Учеб. пособие / С.Д. Прокошкин, И.Ю. Хмелевская, Е.П. Рыклина и др. – М.: МИСиС, 2005.
3. Цвиккер У.-Титан и его сплавы
4. D. Gunderov, S. Prokoshkin, A. Churakova, V. Sheremetyev, I. Ramazanov. Effect of HPT and accumulative HPT on structure formation and microhardness of the novel Ti18Zr15Nb alloy. Materials Letters, 2021, v. 283, #128819., Sheremetyev V., Churakova A., Derkach M., Gunderov D., Raab G., Prokoshkin S. Effect of ECAP and annealing on structure and mechanical properties of metastable beta Ti-18Zr-15Nb (at.%) alloy. Materials Letters, 2021, v. 305

УДК 669.35

К. Э. КИРЬЯНОВА, А. С. СЕЛИВАНОВ, А. Р. САДРИСЛАМОВ

*kristina.kiryanova.2002@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук А. Е. МЕДВЕДЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕДНОГО СПЛАВА**

**Аннотация.** Проведено исследование влияния сварки трением перемешиванием (СТП) на микроструктуру и свойства медного сплава марки М2. Показано, что СТП приводит к уменьшению среднего размера зерна до 17,5 мкм в обработанной зоне. Выбранный в исследовании режим СТП привел к формированию полости в объеме сварного шва. Установлено, что микротвердость в зоне сварного шва на 20% ниже, чем в основном материале. Данный эффект связан с наличием полостей в сварном шве, и, возможно, с протекшими процессами возврата и/или рекристаллизации.

**Ключевые слова:** сварка трением перемешиванием; медный сплав; М2; микротвердость; оптическая микроскопия.

Медь – металл без полиморфных превращений с кристаллической ГЦК решеткой. Среди металлов медь занимает особое место из-за высоких показателей электрической проводимости, уступает только золоту и серебру, и поэтому является важнейшим проводниковым материалом. Медь легко поддается обработке давлением и пайке. Обладая невысокими литейными свойствами, медь тяжело режется и плохо сваривается. На практике медь используется в виде прутков, листов, проволоки, шин и труб.

К безусловным достоинствам меди можно отнести пониженный показатель твердости и химической активности. С другой стороны, твердость и высокая стоимость «чистой» меди негативно влияют на спрос и использование металлоизделий из меди. Поэтому на производстве к ней добавляют различные материалы: получается сплав с повышенной плотностью при сохранении всех положительных сторон. Медь и ее сплавы широко используются во многих областях техники, поскольку обладают особыми свойствами, такими как электрическая и теплопроводность, пластичность, механическая прочность, коррозионная стой-

кость и др. Однако данные материалы трудно свариваются традиционными способами сварки из-за высокой теплопроводности и более высокой скорости окисления при значениях температуры, близких к температуре плавления.

В частности, из меди изготавливают электротехнические шины для пропускания большого количества электричества. Для изготовления шин большой длины и разной геометрии необходимо применять соединения. Существуют разные способы соединения электротехнических шин, и сварка является наиболее предпочтительным из них, так как обеспечивает непрерывное соединение, не увеличивая габариты соединения и обеспечивая широкий выбор схем соединения. Таким образом, перспективным способом соединения медных шин является сварка трением с перемешиванием.

Качество получаемых соединений напрямую зависит от параметров режима сварки, включающих в себя скорость вращения инструмента, скорость сварки, глубину погружения инструмента в стык заготовок, угол наклона, а также геометрию инструмента. Неправильно подобранные режимы могут привести к образованию ряда дефектов, которые влияют на структуру и прочность сварного соединения [3,4]. - т.н. «туннельный эффект», когда вдоль шва образуется полость. Это обусловлено тем, что комбинация параметров сварки определяет температуру процесса, которая, в свою очередь, оказывает прямое влияние на процессы динамической рекристаллизации и адгезионно-диффузионного взаимодействия инструмента со свариваемым материалом. Наличие такого дефекта критическим образом сказывается на прочности и электропроводности, поэтому получение бездефектного шва является важной задачей СТП.

В данном исследовании изучалось влияние СТП на формирование сварного шва с целью выявления потенциальных дефектов: усадочных раковин, непроваров, шлаковых включений, скоплений газовых пор и др.

В качестве материала исследования были взяты пластины исходного материала толщиной 5 мм из меди марки М2, предоставленные кафедрой СМСиКК УГАТУ, химический состав которой представлен в таблице 1.



Состав сплава (масс. %)

Материал	Cu	Pb	Ni	Sb	Nb
Cu	99.87	0.032	0.014	0.010	0.010

Эксперимент проводился со следующими параметрами сварки:

1. Скорость вращения инструмента: 1120 об/мин;
2. Скорость сварки: 25 мм/мин;
3. Угол наклона инструмента: 1°;
4. Глубина погружения заплечика инструмента: 0,49 м

Геометрические параметры инструмента для сварки трением с перемешиванием: длина пина: 3,8 мм; диаметр пина: 6 мм; диаметр заплечика: 20 мм.

Внешний вид образца представлен на Рис 1. Рентгенографический анализ образца показал, что вдоль всего сварного шва образовалась полость (Рис. 1, в).

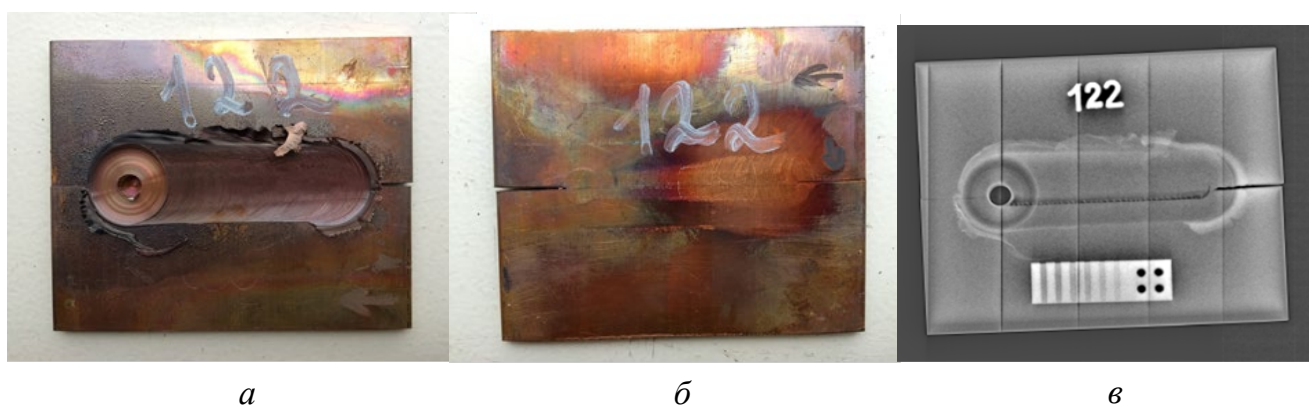


Рис. 1. Внешний вид:  
*а – с лицевой стороны; б – с обратной стороны  
и рентгенографический снимок образца (в)*

Изучение и фотографирование микроструктуры образцов осуществлялось на оптическом микроскопе Olympus. Микротвердость в соответствии с ГОСТ 2999-75 по методу Виккерса (Hv) определяли с помощью Buehler Omnimet Microtest - 5101 по 10 замеров в каждой области при нагрузке 0.1 Н и длительности выдержки под нагрузкой 15 секунд. В качестве индентора использовали четырехгранную алмазную пирамидку.

В ходе исследования было установлено, что в отличие от основного металла, в металле шва и зоны термомеханического влияния наблюдаются принципиальные изменения структуры основного металла, являющиеся следствием измельчения исходных зерен в процессе СТП (Рис. 2 а, б). Если в основном материале средний размер зерна составляет 21,6 мкм, то в зоне обработки средний размер зерна составляет 17,5 мкм.

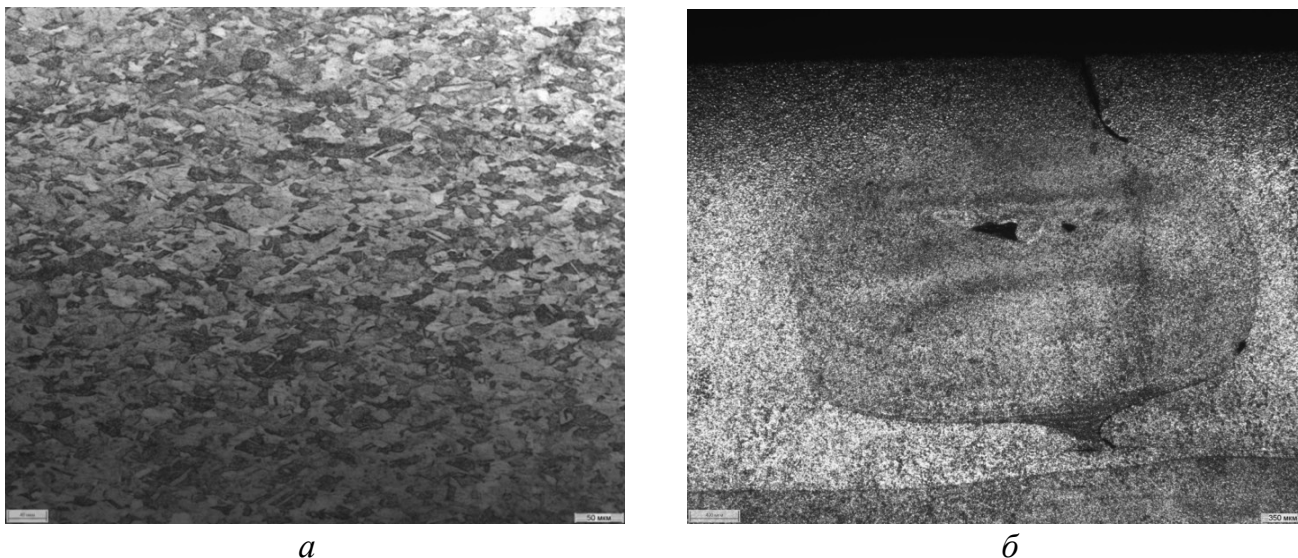


Рис. 2. Микроструктура медного сплава:  
а – основной материал; б – после СТП

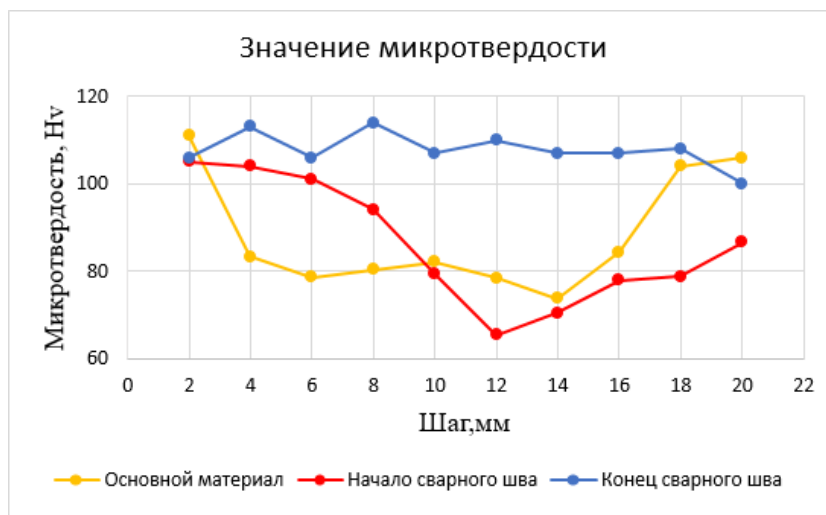


Рис. 3. Распределение микротвердости по длине медного образца

Распределение значений микротвердости по ширине образца в исходном состоянии достаточно однородно (Рис. 3). Максимальное значение микротвердо-

сти медный сплав имеет в исходном состоянии. Сварка трением перемешиванием приводит к некоторому разупрочнению материала. Это связано с повышенной концентрацией макродефектов вследствие СТП.

Можно сделать вывод, что после СТП произошло изменение микроструктуры сплава: в месте сварочного шва размер зерен уменьшился по сравнению с исходным материалом вследствие деформации, наведенной СТП. По результатам измерения микротвердости можно сказать, что в зоне сварочного шва значения микротвердости уменьшается на 20%. Вполне вероятно, что данный эффект связан с процессами возврата и/рекристаллизации, происходящими в сварном шве в процессе СТП. Сварка трением перемешиванием показала себя как эффективный способ создания сварных соединений металлических деталей без создания жидкой фазы и особенностей, связанных с кристаллизацией сплава. Тем не менее, необходимы дальнейшее изучение и подбор режимов СТП для достижения бездефектной структуры получаемых изделий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудак Д.П., Черневич К.В., Штемпель // О. П Сварка трением с перемешиванием: особенности, область применения, анализ технологичности.
2. Структура и свойства соединений медных компенсаторов, полученных по гибридной технологии с использованием сварки трением с перемешиванием / Т.А. Калашникова, К.Н. Калашников, М.А. Шведов, П.А. Васильев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 85–93.– DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-85-93.
3. Challenges in the detection of weld-defects in friction-stir-welding (FSW) / М.А.Wahab, M.W. Dewan, D.J. Huggett, A.M. Okeil, T.W. Liao, A.C. Nunes // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2019. – Vol. 5, N 2. – P. 258–278. – DOI: 10.1080/2374 068X.2019.1575713.
4. Khodir S.A., Shibayanagi T. Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys // Materials Science and Engineering: B. – 2008. – Vol. 148, N 1. – P. 82–87. – DOI: 10.1016/j.mseb.2007.09.024.
5. Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys / P. Kah, R. Rajan, J. Martikainen, R. Suoranta // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. – 2015. – Vol. 10, N 1. – P. 26. – DOI: 10.1186/s40712- 015-0053-8.
6. Hwang Y.M., Fan P.L., Lin C.H. Experimental study on friction stir welding of copper metals // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210 (12). – P. 1667–1672. – DOI: 10.1016/j. jmatprotec.2010.05.019.

Е. С. КУДРЯШОВА

elenakudrasova749@gmail.com

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук, доц. М. М. АБРАМОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

**Аннотация.** В работе приведено исследование влияния интенсивной пластической деформации кручением и последующей термической обработки в интервале температур от 450°С до 600°С. Показано, что в результате интенсивной пластической деформации микротвердость увеличивается в 4 раза. Последующий отжиг не приводит к снижению уровня микротвердости, более того, после отжига при 500°С наблюдается увеличение микротвердости до 10%.

**Ключевые слова:** нержавеющая сталь, прочность, ИПДК, отжиг.

Сталь - основной металлический материал, широко применяемый для изготовления деталей машин, литейных аппаратов, приборов, различных инструментов и строительных конструкций. Широкое использование сталей обусловлено комплексом механических, физико-химических и технологических свойств. Стали сочетают высокую жесткость с достаточной статической и циклической прочностью. Эти параметры можно менять в широком диапазоне за счет изменения концентрации углерода, легирующих элементов и технологий термической и химико-термической обработки. Изменяя химический состав, можно получать стали с различными свойствами и использовать их во многих отраслях техники и народного хозяйства.

В данной работе исследовалась нержавеющая сталь типа AISI 321. Она относится к высоколегированным низкоуглеродным хромоникелевым металлам. В ее состав входит хром, никель, повышенное количество титана (таблица 1). Она хорошо выдерживает высокую температуру (до 800 градусов) и сваривается в заводских условиях. 321 сталь незаменима при изготовлении оборудования для химического машиностроения, для производства электронагревательных элементов, труб, котлов.

Таблица 1

Химический состав стали 321

C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	P	S
≤0.08	17.0-19.0	9.0-12.0	0.7	≤2.0	≤0.1	≤0.035	≤0.03

Развитие современных отраслей машиностроения предъявляет все более возрастающие требования к качеству конструкционных материалов. В связи с этим одной из главных задач современного материаловедения стало создание новых высокопрочных металлических сплавов. Возможно два направления развития: создание совершенно новых материалов [1, 2], либо разработка новых методов упрочняющей обработки промышленных сталей и сплавов [3]. Несмотря на множество достоинств 321 стали, она имеет низкий предел текучести. Исходя из всего вышесказанного весьма актуальной является работа по повышению прочностных характеристик стали.

В качестве методов для повышения прочностных характеристик хорошо себя зарекомендовали методы интенсивной пластической деформации (ИПД). В процессе ИПД могут быть сформированы ультрамелкозернистые (УМЗ) состояния с размером зерен менее 100 нм с наноструктурными особенностями (наноструктурные состояния), которые могут оказывать существенное влияние на механические и функциональные свойства материала. Применение методов ИПД показывает, что свойства сплавов после обработки определяются не только наноструктурными особенностями (элементами) [4]. В зависимости от режимов ИПД в сплавах могут происходить фазовые превращения, связанные с распадом твердого раствора и образованием выделений и частиц вторых фаз, образованием субструктуры и так далее [5-6]. В данном исследовании применяется метод ИПДК (интенсивной пластической деформации кручением) на установке «СКРУДЖ-200». При данной обработке использовались модифицированные бойки с канавкой. Температура деформации  $T=20^{\circ}\text{C}$ . Давление  $P=6\text{ГПа}$ . Число оборотов верхнего бойка составило  $n=10$  оборотов. В качестве исходного состояния было использовано состояние, полученное в результате закалки с температуры  $1050^{\circ}\text{C}$ , охлаждение на воздухе.

Измерения микротвердости проводили на автоматическом микро-макротвердомере Emco-Test Durascan 50, сер. № 119 путем вдавливания стандартной алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине  $136^{\circ}$  (ГОСТ

9450-76), нагрузкой 500г. Для вычисления микротвердости делалось не менее 10 измерений на образец. Расстояние между точками – 1 мм.

Исследование микроструктуры в исходном состоянии проводили на оптическом микроскопе, для выявления микроструктуры использовали реактив Марбле.

В исходном состоянии структура представляла собой равноосные зерна аустенита с размером около 30 мкм, в некоторых наблюдались двойники отжига. Микротвердость составила  $163 \pm 17 \text{ Нв}$

В результате ИПД микроструктура претерпела значительные изменения и стала не различима в оптический микроскоп. Микротвердость возросла до  $604 \pm 29 \text{ Нв}$ . Распределение твердости однородно по сечению образца (Рисунок 1).

Как было показано на примере стали 316 [7], дополнительная обработка в качестве отжига может привести к дальнейшему увеличению твердости. В связи с этим был проведен отжиг образцов при температурах от  $450^\circ\text{C}$  до  $600^\circ\text{C}$ . Измерения микротвердости показали, что действительно наблюдается увеличение твердости после отжига при  $500^\circ\text{C}$  на 10% (Рисунок 2). При этом не наблюдается значительного снижения микротвердости вплоть до температуры отжига  $600^\circ\text{C}$ . Что говорит о стабильности свойств и структуры вплоть до данной температуры.

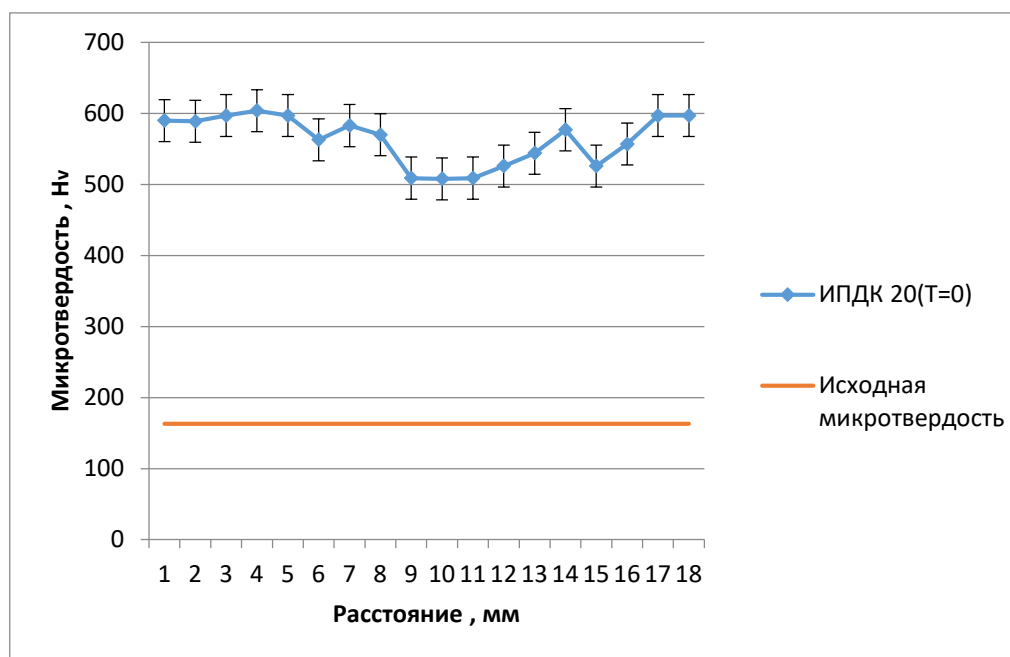


Рис. 1. Микротвердость стали 321 в исходном состоянии и после ИПДК

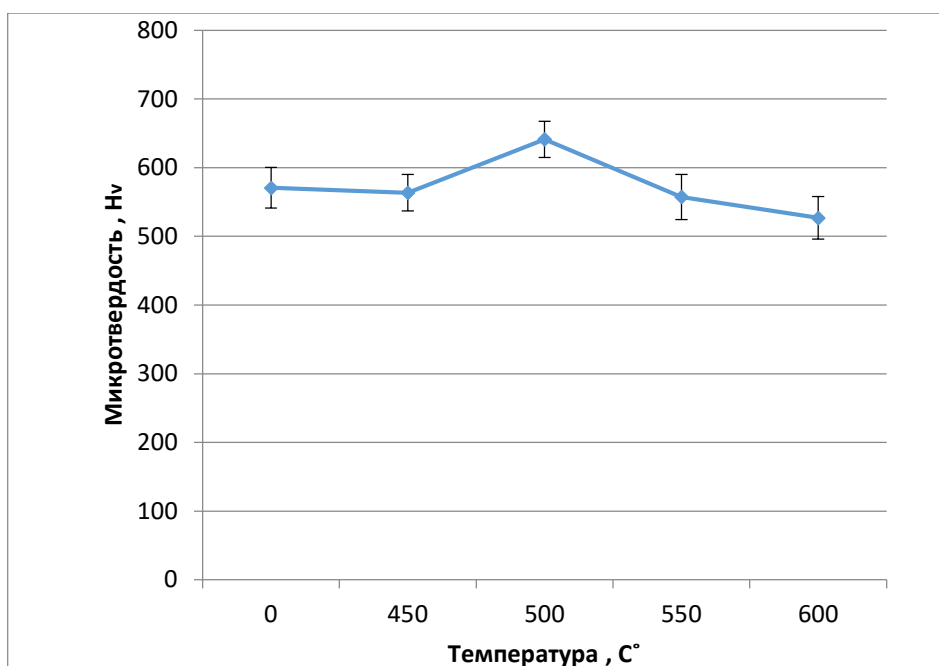


Рис. 2. График зависимости микротвердости от температуры

Таким образом, в результате применения методов ИПД удалось повысить прочностные характеристики в 4 раза, так микротвердость возросла до  $604 \pm 29$  Hv по сравнению с исходным состоянием  $163 \pm 17$  Hv. Постдеформационный отжиг привел к дальнейшему росту микротвердости до 10% в результате отжига при 500 °C. Свойства остаются стабильными вплоть до отжига при 600 °C.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фриндлярдер И. Из века сталей - в эру композитов. // Вестник АН СССР, №2, 1992.
2. Уайтэтг С. Дью-Хьюз Д. Металлы, керамики, полимеры. - М.: Атомиздат, 1979, - 578 с.
3. Манохин А.И., Масленков СБ. Современные тенденции развития легированных сталей. - Изв. АН СССР, сер. Металлы, 1981, №3, - с.17-24.
4. Valiev, R.Z. On the origin of the extremely high strength of ultrafinegrained Al alloys produced by severe plastic deformation [Текст] / Valiev R.Z., Enikeev N.A., Murashkin M.Yu., Kazykhanov V.U., Sauvage X. // Scripta Materialia. – 2010. – Vol. 63, Iss. 9. – P. 949-952.
5. Sauvage, X. Grain boundaries in ultrafine grained materials processed by severe plastic deformation and related phenomena [Текст] / Sauvage X., Wilde G., Divinski S.V., Horita Z., Valiev R.Z. // Mat. Sci. and Eng. A. – 2012 – Vol. 540. – P. 1-12.
6. Lacroix, F. Martensitic transformations induced by plastic deformation in Fe-NiCr-C system [Текст] / F. Lacroix, A. Pineau // Metall. Trans. – 1972. – Vol. 3. – P. 387-396.
7. Thermal stability and extra-strength of an ultrafine grained stainless steel produced by high pressure torsion / M. M. Abramova, N. A. Enikeev, R. Z. Valiev [et al.] // Reviews on Advanced Materials Science. – 2015. – Vol. 43. – No 1-2. – P. 83-88.

УДК 538.9

А. Н. ЛАКАТКИНА

*allkatkina@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук А. А. Чуракова

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭКВИАТОМНОГО СПЛАВА TiNi В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ

**Аннотация.** Исследование сплава TiNi после термоциклирования в различных структурных состояниях с помощью оптической металлографии и определение прочностных свойств.

**Ключевые слова:** Никелид титана, эффект памяти формы, термоциклирование, равноканальное угловое прессование.

Сплавы на основе никелида титана (TiNi) принадлежат к классу функциональных материалов с эффектами памяти формы (ЭПФ), обусловленными термоупругими мартенситными превращениями, протекающими в диапазоне температур, близких к комнатным [1, 2].

Среди материалов с эффектом памяти формы, никелид титана отличается наибольшими функциональными характеристиками, повышенной прочностью, пластичностью, коррозионной стойкостью, биосовместимостью и т.д. Вследствие этого сплавы TiNi широко используются в технике и медицине [3]. Сплавы с памятью формы, обладают уникальной способностью восстанавливать форму при нагреве, при этом известно, что многократные теплосмены через температурный интервал мартенситных превращений приводят к изменению их функциональных свойств [2,4].

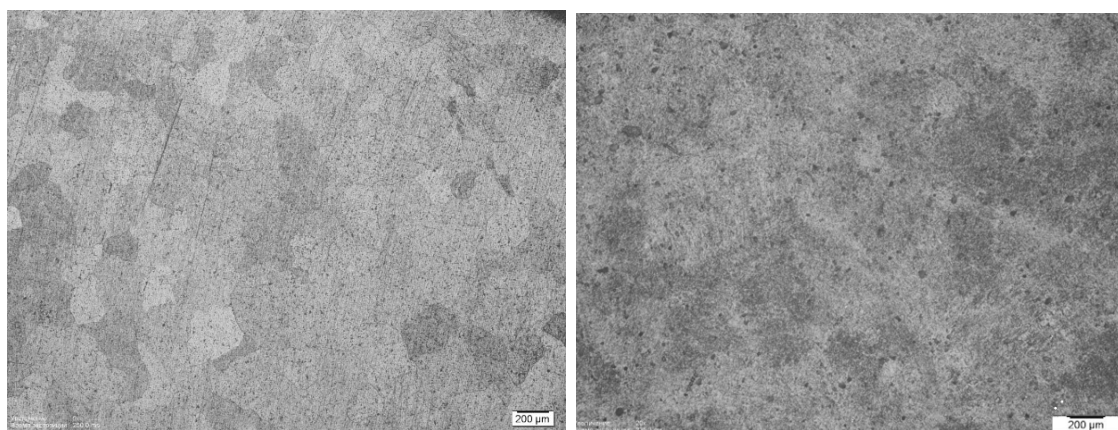
В данной работе был выбран сплав –  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$ . Шлифы для исследований готовились в следующей последовательности: механическая шлифовка на абразивной бумаге с постепенно уменьшающейся зернистостью и полировка. Для качественного и количественного анализа макроструктуры сплава TiNi использовался металлографический микроскоп OLYMPUSGX51 с программным обеспечением. Для выявления структуры использовали травитель с составом 60% $H_2O$



+ 35%HNO<sub>3</sub> + 5%HF. Ультрамелкозернистая структура была сформирована методом равноканального углового прессования (РКУП) на гидравлическом прессе с использованием оснастки конструкции УГАТУ. Был выбран режим, при котором заготовки из сплава TiNi цилиндрической формы с диаметром 20 мм и длиной 100 мм были подвергнуты 8 проходам при температуре 450 °С. Механические испытания на растяжение малых плоских образцов с рабочей частью 1'0,25'4 мм проводились со скоростью деформации 1'10<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>.

В данной работе было проведено исследование микроструктуры и механических свойств сплава Ti<sub>50.0</sub>Ni<sub>50.0</sub> в крупнозернистом (КЗ) и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях, до и после термоциклирования.

Структура крупнозернистого сплава в исходном состоянии, представляет собой крупные зерна аустенитной размером 237±34мкм с четкими границами (рис.1, а). Ультрамелкозернистая структура, полученная методом РКУП, представляет мартенсит с размером исходных аустенитных зерен 214±26 мкм, имеющие преимущественно неправильную кристалло-геометрическую огранку (рис.1, б).



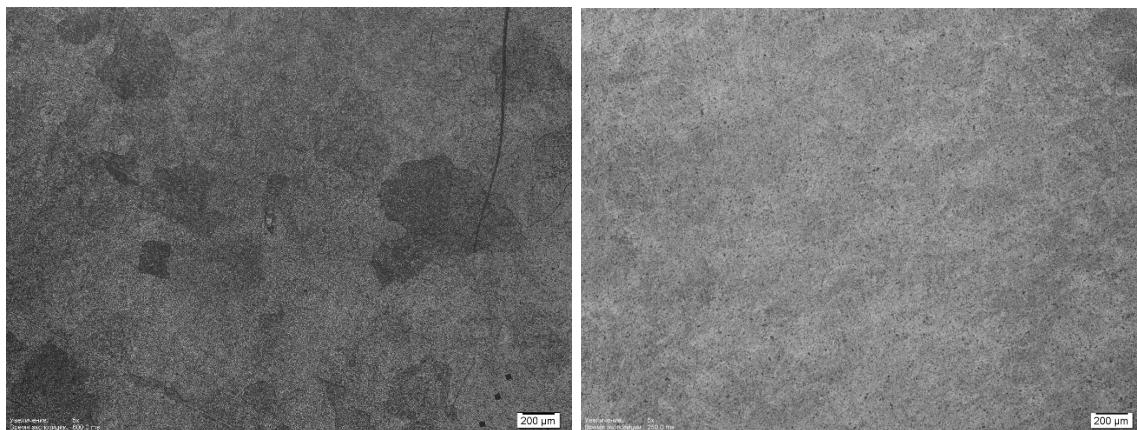
*а*

*б*

Рис. 1 Микроструктура сплава Ti<sub>50.0</sub>Ni<sub>50.0</sub>:  
*а – структура сплава Ti<sub>50.0</sub>Ni<sub>50.0</sub> в КЗ состоянии;*  
*б – структура сплава Ti<sub>50.0</sub>Ni<sub>50.0</sub> в УМЗ состоянии*

В результате термоциклирования крупнозернистого Ti<sub>50.0</sub>Ni<sub>50.0</sub> с количеством циклов n=100, сплав имеет мартенситную структуру с размером зерна по-

рядка  $264 \pm 25$  мкм (рис.2, а). В ультрамелкозернистом состоянии после термоциклирования с  $n=100$  циклами, средний размер структурных элементов с наследованными аустенитными границами составляет: мартенситные пластины размером  $\sim 221 \pm 30$  нм (рисунок 2, б).



*а*

*б*

Рис.2 Структура сплава сплава  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$  после термоциклирования:

*а* – Структура КЗ сплава  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$  в закаленном состоянии после 100 термоциклов;  
*б* – Структура УМЗ сплава  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$  в закаленном состоянии после 100 термоциклов

В дополнение к структурным исследованиям были проведены исследования механических свойств, установлена зависимость прочностных характеристик по отношению к числу тепловых циклов в сплаве  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$  после многократных мартенситных превращений. Полученные данные представлены в таблице.

Таблица 1

Результаты механических испытаний на растяжение

Состояние	Предел прочности, $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	Предел фазовой текучести, $\sigma_M$ , МПа	Пластичность, $\delta$ , %
КЗ	844	430	230	58
КЗ+ТЦ 100	845	547.5	255	64
УМЗ	1065	935	250	44.5
УМЗ+ТЦ 100	1175	1120	290	43

В сплаве  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$  в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях термоциклирование позволяет повысить прочность материала за счет накопления дефектов. При многократных мартенситных превращениях происходит увеличение значений пределов прочности, текучести и фазовой текучести. Также при помощи оптической металлографии были определены основные

фазы, которые появляются в результате термоциклирования и размеры зерен этих фаз. В дальнейшем планируются дальнейшие изучения влияния пластической деформации и термообработки на механические свойства сплава Ti50.0Ni50.0 .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуракова, А.А. Трансформация микроструктуры и физико-механические свойства ультрамелкозернистых сплавов TiNi при многократных мартенситных превращениях/Дис. ... канд. физ.- мат. наук. – Уфа, 2016. – 165 с.
2. Чуракова, А.А. Влияние термоциклирования в диапазоне фазовых превращений B2-B19' на микроструктуру и механические свойства УМЗ сплава Ti49.8Ni50.2 / А.А. Чуракова, Д.В. Гундеров, А.В. Лукьянов, Ю.А. Лебедев // «Письма о материалах». – 2013. – Т.3. – С. 166–168.
3. Сибирев А. В. Необратимая деформация при многократной реализации эффекта памяти формы в сплаве TiNi/Дис. ... канд. физ.- мат. наук. – Уфа, 2016. – 132 с.
4. Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations / H. Warlimont//J Mater. Sci. 1974. Vol. 9. P. 1521-1535.

А. Ю. МОРКИНА, Ю. Р. ШАРАПОВА, Е. А. КОРЗНИКОВА

*alinamorkina@yandex.ru*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. Е. А. КОРЗНИКОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ВЫБОР МЕЖАТОМНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В РЕШЕТКЕ ВОЛЬФРАМА**

*Аннотация.* Моделирование кристаллических решеток в условиях, далеких от равновесных, в настоящее время является все более актуальным предметом исследований и требует уверенности в достоверности применяемых межатомных потенциалов в широком диапазоне отклонений атома от равновесного состояния. Чтобы выполнить такую оценку для моделирования вольфрама, являющегося перспективным материалом для различных применений атомной энергетике, мы проанализировали нелинейную динамику решетки, используя несколько межатомных потенциалов. В ОЦК кристалле вольфрама изучалась динамика нескольких делокализованных нелинейных колебательных мод – точных решений уравнений движения атомов, геометрия которых определяется симметрией решетки при любых амплитудах и не зависит от типа взаимодействия между узлами.

*Ключевые слова:* вольфрам; метод молекулярной динамики; делокализованные нелинейные колебательные моды.

### *Введение*

Моделирование кристаллических решеток в условиях, далеких от равновесных, являясь в настоящее время все более актуальным предметом исследований [1-3], требует достоверности применяемых межатомных потенциалов в широком диапазоне отклонений атома от равновесного состояния. Чтобы выполнить такую оценку для моделирования вольфрама, являющегося материалом-кандидатом для различных ядерных приложений [4], мы проанализировали нелинейное поведение решетки, используя несколько межатомных потенциалов.

В ОЦК W моделирование колебаний проводилось по закономерностям нелинейных делокализованных колебательных мод - точных решений уравнений движения атомов, геометрия которых определяется симметрией решетки [5, 6]. Рассмотрены двумерные случаи колебаний в одной из плотноупакованных плоскостей и трехмерные случаи, когда движения атомов имеют три составляющие в пространстве. Амплитудно-частотные характеристики этих мод рассчитаны для

нескольких межатомных потенциалов, имеющихся в библиотеке LAMMPS. Обнаружено, что несколько межатомных потенциалов показывают практически совпадающие результаты, что является косвенным подтверждением их справедливости и возможности их использования для моделирования экстремальных ударов в рассматриваемой решетке.

### *Детали компьютерного эксперимента*

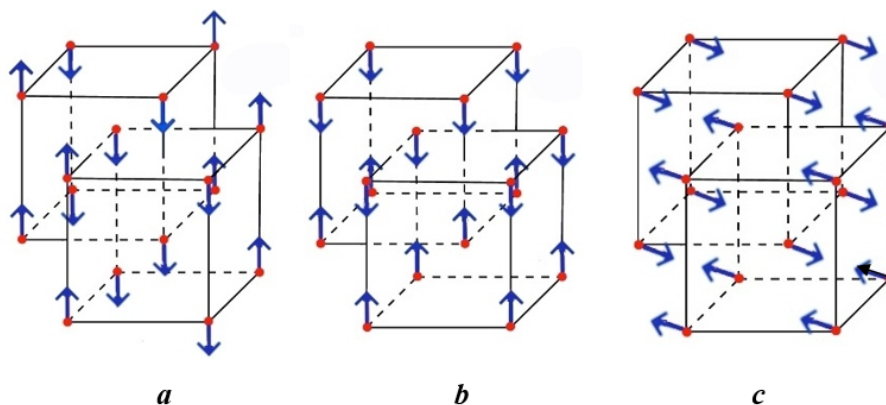


Рис. 1. Начальные смещения атомов, используемые для возбуждения однокомпонентных делокализованных мод в ОЦК решетке вольфрама:  
*a* – мода 1; *b* – мода 13; *c* – мода 15

Стрелки в данном случае показывают смещения атомов из положений равновесия, которые использовались для задания начальных условий, порождающих ту или иную моду колебаний. Все векторы смещения имеют одинаковую длину, равную нулю. Начальные скорости всех атомов равны нулю.

Важно отметить, что для этих мод характерно вовлечение в колебательный процесс всех атомов. Это, как правило, приводит к тому, что амплитудно-частотная характеристика этой моды будет иметь жесткий тип нелинейности.

ОЦК-решетка W с параметром решетки  $a = 3,160 \text{ \AA}$  и межатомным расстоянием  $1,414 \text{ \AA}$ . Общее количество атомов 2000. Используются периодические граничные условия. Атомная масса вольфрама составляет  $183,84 \text{ а.е.м.}$  Моделирование проводилось с помощью пакета программ LAMMPS и анализировались следующие потенциалы: *eam.fs*, *eam2.fs.*, *eam3.fs*, *eam4.fs*, *meam.fs*, Olsson и Zhou.

## Результаты исследования

В данной работе мы проанализировали амплитудно-частотные характеристики этих мод для ОЦК-кристалла вольфрама для нескольких межатомных потенциалов. На рис. 2 представлены амплитудно-частотные характеристики для мод 1, 13, 15 как наиболее показательные для решетки вольфрама с использованием всех рассмотренных потенциалов. Из всех рассмотренных потенциалов были отобраны 4 потенциала, для которых установлена удовлетворительная степень совпадения, представленные на рис. 3. Именно эти потенциалы в дальнейшем использовались для анализа амплитудно-частотных характеристик мод и влияния делокализованных нелинейных колебаний на макроскопические свойства кристаллов - теплоемкость, давление (как характеристика внутренних напряжений). Моде 15 демонстрирует наиболее сильную нелинейность.

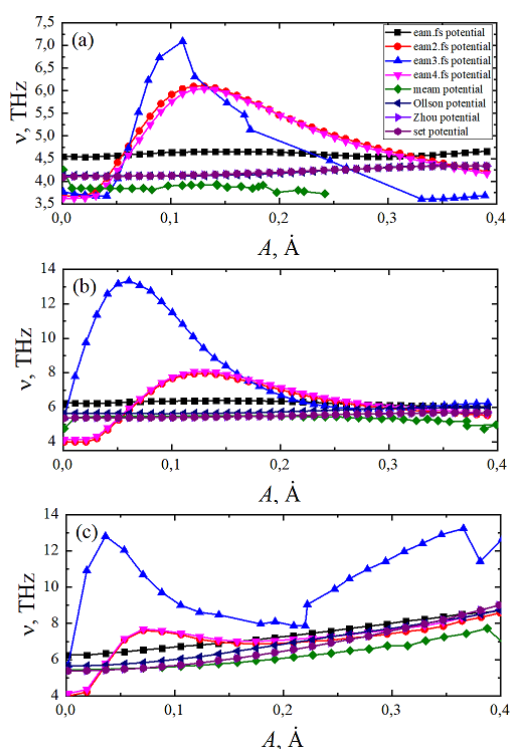


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики для мод 1 (a), 13 (b), 15 (c) для потенциалов eam.fs (черный квадрат), eam2.fs (красный круг), eam3.fs (синий треугольник), eam4.fs, set (розовый треугольник), meam (зеленый ромб), Olsson (сиреневый треугольник) и Zhou (фиолетовый круг)

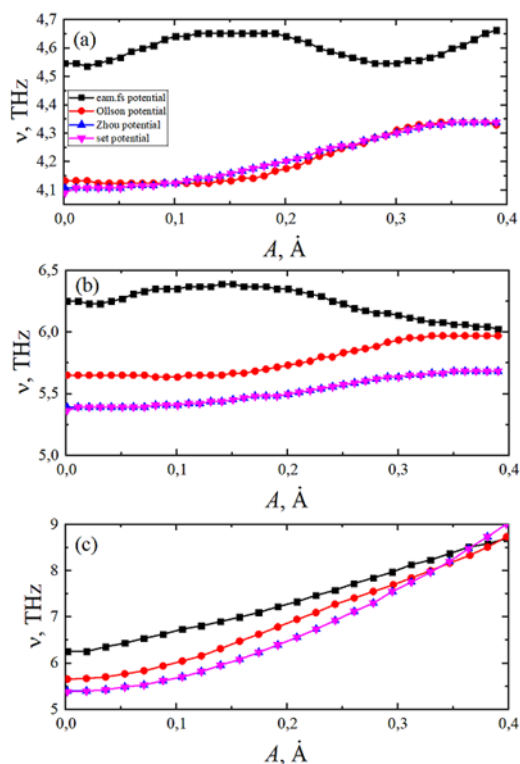


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики для мод 1 (a), 13 (b), 15 (c) для потенциалов eam.fs (черный квадрат), set (розовый треугольник), Olsson (сиреневый треугольник) и Zhou (фиолетовый круг)

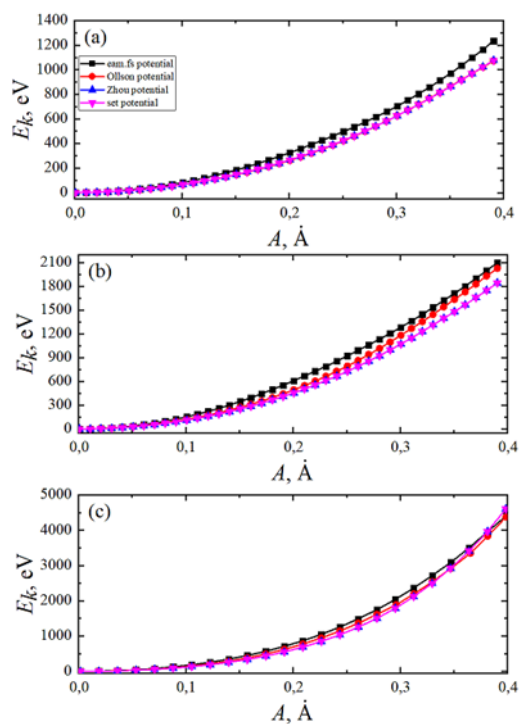


Рис. 4. Зависимости кинетической энергии от амплитуды для мод 1 (a), 13 (b), 15 (c) для потенциалов eam.fs (черный квадрат), set (розовый треугольник), Olsson (сиреневый треугольник) и Zhou (фиолетовый круг)

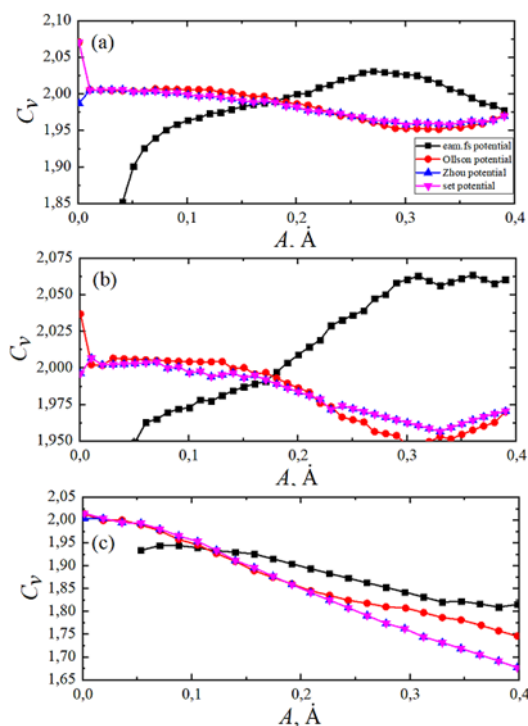


Рис. 5. Зависимости теплоемкости от амплитуды для мод 1 (a), 13 (b), 15 (c) для потенциалов eam.fs (черный квадрат), set (розовый треугольник), Ollson (сиреневый треугольник) и Zhou (фиолетовый круг).

На рис. 4 показаны зависимости кинетической энергии от амплитуды для мод 1 (a), 13 (б), 15 (в). В этом случае мода 15 также показывает наиболее интенсивный рост значения кинетической энергии при увеличении начальных перемещений, что, вероятно, связано с вовлечением в движение этой моды большого числа атомов. Этот мод можно рассматривать как один из перспективных способов реализации локализованных состояний на его основе.

На рис. 5 представлены зависимости теплоемкости от амплитуды для мод 1, 13, 15. Для моды 15 теплоемкость уменьшается с ростом начальной амплитуды, что связано с ее жесткой нелинейностью и ростом кинетической энергии при увеличении амплитуды колебаний. Для остальных мод характер изменения теплоемкости немонотонный и коррелирует с амплитудно-частотными характеристиками моды.

### **Вывод**

Проведено исследование ДНКМ в вольфраме методом молекулярной динамики с использованием различных межатомных потенциалов. Выяснено, что



потенциалы *eam.fs, set, Olsson, Zhou* наиболее реалистично отражают поведение атомов в структуре, находящейся в состоянии, далеком от равновесия.

С помощью этих потенциалов были рассчитаны АЧХ ДНКМ, изменения кинетической энергии, теплоемкости и давления. Выявлена немонотонная зависимость ряда АЧХ от амплитуды. Установлено, что мода 15 имеет частоту выше фоннного спектра, что в перспективе может приводить к возникновению локализованных энергетических состояний. Полученные результаты позволяют оценить применимость различных межатомных потенциалов для моделирования высокоэнергетического воздействия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marinica M.-C., Ventelon L., Gilbert M., Proville L., Dudarev S.L., Marian J., Bencteux G., Willaime F. Interatomic potentials for modelling radiation defects and dislocations in tungsten. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2013, vol. 25, no. 39, article number 395502. DOI: 10.1088/0953-8984/25/39/395502.
2. Babicheva R.I., Evazzade I., Korznikova E.A., Shepelev I.A., Zhou K., Dmitriev S.V. Low-energy channel for mass transfer in Pt crystal initiated by molecule impact. *Computational Materials Science*, 2019, vol. 163, pp. 248–255. DOI: 10.1016/j.commatsci.2019.03.022.
3. Sand A.E., Nordlund K., Dudarev S.L. Radiation damage production in massive cascades initiated by fusion neutrons in tungsten. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, vol. 455, no. 1-3, pp. 207–211. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.06.007.
4. Chetverikov A.P., Shepelev I.A., Korznikova E.A., Kistanov A.A., Dmitriev S.V., Velarde M. Breathing subsonic crowdion in morse lattices. *Computational Condensed Matter*, 2017, vol. 13, pp. 59–64. DOI: 10.1016/j.cocom.2017.09.004.
5. Shelepev I.A., Bayazitov A.M., Korznikova E.A. Modeling of supersonic crowdion clusters in FCC lattice: Effect of the interatomic potential. *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*, 2021, vol. 6, no. 1, article number 2050019. DOI: 10.1142/S2424913020500198.
6. Shepelev I.A., Dmitriev S.V., Kudreyko A.A., Velarde M.G., Korznikova E.A. Supersonic voidions in 2D Morse lattice. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2020, vol. 140, article number 110217. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110217.

УДК 541.6

Р. А. МУСТАКИМОВ, Б. Ф. АЛМАЕВ, В. В. КАЛЕЕВА  
*robmust@mail.ru, almaevbulat@yandex.ru, viktoriakaleeva892@gmail.com*  
Науч. руковод. – канд. хим. наук, доц. М. В. БАЗУНОВА

*Башкирский государственный университет*

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ N-СУКЦИНИЛХИТОЗАНА С ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЕМ

**Аннотация.** Работа посвящена изучению реологических свойств полимерных гидрогелевых систем на основе комплексов N-сукцинилхитозана с полиэтиленгликолем в зависимости от состава реакционной смеси. В случае использования полимерных комплексов формирование дополнительных связей с ростом структурированности полимерной системы приводит к изменению механических свойств получаемых гелей при сравнительно невысоких концентрациях компонентов, и таким образом появляется возможность регулирования их реологических свойств в широком диапазоне напряжений. Добавление неионогенного полимера полиэтиленгликоля к полисахариду N-сукцинилхитозану приводит к формированию сетки зацеплений при меньших концентрациях N-сукцинилхитозана в смеси, чем в индивидуальном полимере. В смеси с массовым соотношением 70:30 % мас. происходит уменьшение модуля упругости во всей изучаемой области частот колебаний, что дополнительно может свидетельствовать об ограниченной совместимости компонентов в смеси. Доказано, что с увеличением массового соотношения в системе «неионогенный полимер-полисахарид» формирование сетки зацеплений геля в случае растворов смесей происходит при меньших концентрациях полисахарида, чем в случае индивидуального N-сукцинилхитозана. Полученные гели характеризуются как упруго-вязкие тела, модуль упругости которых растет с увеличением частоты осцилляции.

**Ключевые слова:** гидрогели; полимерные комплексы; N-сукцинилхитозан; полиэтиленгликоль; упруго-вязкое тело.

Полимерные гидрогели находят широкое применение в медицине (для создания контактных глазных линз, терапевтических транспортных систем и микросфер, в эндопротезировании, ожоговой терапии), а также в санитарии и сельском хозяйстве - как влагопоглощающее средство [1-3]. Очень часто в качестве полимерной основы гидрогелей используются сшитые полимеры на основе гидрофильных макромолекул, способные к равновесному и обратимому набуханию в воде и водных растворах. Главным недостатком сшитых полимеров является необходимость использования дорогих и токсичных сшивающих агентов при их создании. Поэтому, к одному из простейших, эффективных и безопасных приемов создания гелевых материалов можно отнести непосредственное смешение

ние двух и более функциональных полимеров с образованием полимерных комплексов (ПК). В случае использования ПК формирование дополнительных связей с ростом структурированности полимерной системы приводит к изменению механических свойств получаемых гелей при сравнительно невысоких концентрациях компонентов, и таким образом появляется возможность регулирования их реологических свойств в широком диапазоне напряжений. Иными словами, подбор параметров при приготовлении ПК позволяет реализовать ситуацию, когда на основе одних и тех же исходных полимеров могут быть получены материалы с совершенно различными свойствами.

Одними из наиболее перспективных компонентов гидрогелей можно считать полисахарид хитозан и его производные, например, натриевую соль N-сукцинилхитозана (СХТЗ), в которой сукцинильные остатки обеспечивают водорастворимость, совместимость с тканями и клетками организма, антиагрегантную и антиоксидантную активность [4]. В качестве модифицирующего компонента СХТЗ в данной работе использовали полиэтиленгликоль (ПЭГ), который также широко применяется в биомедицинских целях. Так, ПЭГ повышает агрегативную устойчивость гидрофобных по природе лекарств во время их нахождения в организме или во время хранения, что обусловлено стерической «маскировкой» или изоляцией молекул лекарств с образованием «конформационного облака» [5]. *Целью работы* явилось изучение изменения реологических свойств полимерных гидрогелей на основе ПК СХТЗ-ПЭГ в зависимости от состава реакционной смеси.

### ***Экспериментальная часть***

Для формирования гидрогелевых материалов использовались следующие полимеры: СХТЗ с молекулярной массой 200 кДа со степенью замещения по аминогруппам 75% (ЗАО «Биопрогресс»); ПЭГ марки CAS 25322-68-3 с молекулярной массой 15 кДа (Loba-Chemie, Wein-Fischamend, Австрия).

Растворы исходных компонентов ПЭГ и СХТЗ были приготовлены путем растворения предварительно высушенной навески полимера в очищенной воде,

полученной из питьевой воды методом дистилляции<sup>1</sup> или в фосфатном буферном растворе (рН=6,86), приготовленном согласно ОФС.1.3.0003.15 «Буферные растворы» (ГФ РФ, XIII издания). Массовая концентрация ПЭГ и СХТЗ в растворах составляла 0.1 – 4.0 %. ПК получали постепенным добавлением по каплям раствора СХТЗ к раствору ПЭГ при непрерывном перемешивании.

Реологические исследования растворов ПК проводили на модульном динамическом реометре “Haake Mars III” (Thermo Fisher, Германия) при  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  с использованием системы плоскость-конус диаметром 35 мм и углом при вершине конуса  $2^\circ$  в двух режимах - непрерывного сдвигового деформирования в диапазоне скоростей сдвига от 0.1 до  $100 \text{ c}^{-1}$  и в осцилляционном режиме. Тесты с частотной разверткой проводили при значении напряжения сдвига, входящего в LVR-диапазон (диапазона линейной вязкоупругости), а именно при 1 Па. Пределы текучести гелей определяли в режиме с установленной линейной скоростью сдвига с расчетом по методу Хершеля-Бакли и Кассона [6].

Также из рассчитанных значений равновесного модуля накоплений  $G'_p$  [7] были вычислены: концентрация эластически активных цепей сетки на единицу объема ( $\nu_e, \text{м}^3$ ) и расстояние между двумя точками сшивания в полимерном геле ( $\xi, \text{нм}$ ) согласно уравнениям [8]:

$$\nu_e = \frac{G'_p N_A}{RT},$$
$$\xi = \left( \frac{G'_p N_A}{RT} \right)^{-\frac{1}{3}},$$

где  $G'_p$  – равновесный модуль упругости,  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура измерения.

### ***Обсуждение результатов***

Формирование ПК между полисахаридами с протонодонорными неионногенными полимерами происходит прежде всего за счет водородных связей. Наличие водородных связей между компонентами в смеси может способствовать

---

<sup>1</sup> ФС.2.2.0020.15 «Вода очищенная». Государственная фармакопея РФ. XIV изд. М.: 2018.

их совместимости и смешиваемости, а также оказывает значительное влияние на структурные свойства смесей.

Известно, что молекулярная совместимость в смеси уменьшается с ростом концентрации компонентов, что влияет на закономерности взаимодействия полимеров. Так, при добавлении к полисахариду СХТЗ и сравнительно низкомолекулярного полимера ПЭГ наблюдаются изменения в структурно-механическом поведении исследуемых полисахаридов. При этом наиболее существенные в реологическом поведении изменения происходят в смесях, содержащих от 30% мас. неионогенного компонента, что связано с образованием определенного количества внутри- и межмолекулярных водородных связей. Поэтому дальнейшее рассмотрение закономерностей изменения структурно-механических свойств получаемых гелей будет производиться для систем с массовыми соотношениями от 30 % мас. ПЭГ.

Для систем ПЭГ-СХТЗ с массовым соотношением 30:70 % мас. установлено, что формирование сетки зацеплений в смесях происходит при меньших концентрациях СХТЗ, чем в индивидуальном СХТЗ. Так, начало формирования сетки зацеплений соответствует растворам с концентрацией СХТЗ 1.2 % мас. в случае индивидуального СХТЗ и 0,9 % мас. в случае систем ПЭГ–СХТЗ. Более раннее формирование сетки зацеплений в случае растворов ПК объясняется образованием дополнительной узлов сетки за счет взаимодействия комплементарных групп [9].

Переход системы из состояния вязкоупругой жидкости в область упруго-вязкого тела определяется моментом гелеобразования, который может быть определен, как точка пересечения кривых модулей упругости ( $G'$ ) и вязкости ( $G''$ ). При достижении точки гелеобразования формируется трехмерная сетка зацеплений, и полимерная система теряет текучесть. При прочих равных условиях для полимерных комплексов момент «золь-гель» перехода может происходить раньше, чем для индивидуальных полимеров в виду дополнительного взаимодействия между макромолекулами компонентов комплекса.

Как показано в работе [10] для СХТЗ концентрация перехода системы из вязкоупругой жидкости в вязкоупругое тело соответствует 4,0 % мас. При данной концентрации макромолекулы индивидуального СХТЗ начинают формировать плотную трехмерную сетку геля.

Для смесей СХТЗ с ПЭГ формирование упруго-вязкого тела начинает происходить при меньших концентрациях полисахарида в смеси (табл. 1). Т.к. для ПЭГ характерна самоассоциация, взаимодействие между одноименными макроцепями с образованием гомоассоциатов более предпочтительно чем взаимодействие ПЭГ-СХТЗ. Поэтому при изменении массового соотношения полимеров с 30:70 до 70:30 % мас. существенного снижения концентрации гелеобразования не происходит. Также исходя из значений концентрации эластически активных цепей сетки на единицу объема и расстояния между двумя точками сшивания в полимерном геле можно сделать вывод, что рост количества ПЭГ в смеси не приводит к более интенсивному взаимодействию в системе.

Таблица 1

Некоторые структурно-механические характеристики для гидрогелей на основе ПК ПЭГ-СХТЗ

Система	Массовое соотношение, % мас.	$C_{\text{СХТЗ/кМЦ}}$ в смеси ( $G'=G''$ ), % мас.	$\tau_t$ , Па	$n_e^* 10^{-21}$ , м <sup>3</sup>	$\xi$ , нм
СХТЗ	-	4,00±0,30	19,70±1,67	-	-
ПЭГ-СХТЗ	30:70	3,40±0,25	23,80±2,01	60,3	26
	50:50	3,30±0,25	25,40±2,15	58,2	29
	70:30	3,40±0,29	20,80±1,76	42,7	32

Таким образом, посредством кооперативного взаимодействия за счет водородных связей и ван-дер-ваальсового взаимодействия, концентрации полисахарида, необходимые для перехода системы из состояния вязкоупругой жидкости к упруго-вязкому телу в смесях уменьшаются.

В экспериментах с частотной разверткой, проведенных в LVR-диапазоне (1-10 Па), водные растворы индивидуальных полимеров и смесей до концентрации гелеобразования показывали жидкостное поведение, т. е.  $G' < G''$ . С ростом

содержания неионогенного компонента формируется упруго-вязкая система, которая демонстрирует рост модуля накоплений ( $G'' < G'$ ) и характеризуется наличием пределов текучести  $\tau_T$  (табл. 1).

Т.к. в системе ПЭГ-СХТЗ имеет место ограниченная совместимость компонентов, до определенного массового соотношения наблюдается рост упругих свойств системы, однако уже при соотношении компонентов 50:50 % мас. значения  $G'$  уменьшается, что, по всей видимости, связано с меньшим взаимодействием между компонентами, самоассоциацией ПЭГ и образованием гетерофазной системы (рис. 1). Более того, несовместимость полимеров демонстрирует тот факт, что полученные смеси ПЭГ-СХТЗ в соотношении 50:50 % мас. по массе и выше подвергаются визуально отличимому фазовому разделению по прошествии 72 часов. Выделившаяся жидкая фаза обогащена ПЭГ, в более концентрированной гелеобразной фазе находится преимущественно комплекс ПЭГ-СХТЗ, что доказывают данные ИК-спектроскопии.

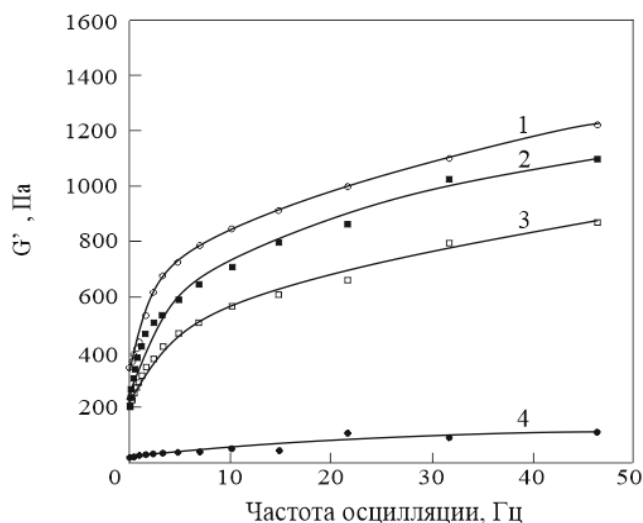


Рис. 1. Зависимость модуля накоплений  $G'$  от частоты осцилляции (Гц) для ПК ПЭГ-СХТЗ различных массовых соотношений (% мас.): 70:30 (1), 50:50 (2), 30:70 (3), индивидуальный СХТЗ 4% мас. (4)

Таким образом, показано, что добавление неионогенного полимера ПЭГ к полисахариду СХТЗ приводит к формированию сетки зацеплений при меньших концентрациях СХТЗ в смеси, чем в растворе индивидуального полимера. В смеси с массовым соотношением 70:30 % мас. происходит уменьшение модуля

упругости во всей изучаемой области частот колебаний, что дополнительно может свидетельствовать об ограниченной совместимости компонентов в смеси.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Catoira M. C., Fusaro L., Francesco D. D. et al. Overview of natural hydrogels for regenerative medicine applications // *J. Mater. Sci. - Mater. Med.* 2019. Т. 30. № 10. С. 1.
2. Шуршина А. С., Галина А. Р., Лаздин Р. Ю. и др. Влияние модифицирующих добавок на процесс высвобождения лекарственных веществ из жидких лекарственных форм // *Хим. физика.* 2021. Т. 40. № 7. С. 58.
3. Bazunova M. V., Mustakimov R. A., Kulish E. I. Obtaining biocompatible materials based on polymer complexes of succinyl chitosan С poly-N-vinylpyrrolidone or polyethylene glycol // *Russian Journal of Physical Chemistry B.* 2021. Т. 15. № 5. С. 888-894.
4. Колесов С. В., Гурина М. С., Мударисова Р. Х. Об устойчивости водных нанодисперсий полиэлектролитных комплексов на основе хитозана и N-сукцинилхитозана // *Высокомолекулярные соединения. Серия А.* 2019. Т. 61. № 3. С. 195-202.
5. Кноп К., Hoogenboom R., Fischer D., Schubert U.S. Poly (ethylene glycol) in drug delivery: pros and cons as well as potential alternatives // *Angewandte chemie international edition.* 2010. Т. 49. № 36. С. 6288-6308.
6. Ильин С. О., Куличихин В. Г., Малкин А. Я. Необычные реологические эффекты, наблюдаемые в растворах полиакрилонитрила // *ВМС. Сер. А.* 2013. Т. 55. № 8. С. 1071
7. Karvinen J., Ihalainen T. O., Calejo M. T. et. al. Characterization of the microstructure of hydrazone crosslinked polysaccharide-based hydrogels through rheological and diffusion studies // *Mater. Sci. Eng., C.* 2019. Т. 94. С. 1056
8. Nurkeeva Z. S., Mun G. A., Khutoryanskiy V. V. Interpolymer complexes of water-soluble nonionic polysaccharides with polycarboxylic acids and their applications // *Macromolecular Bioscience.* 2003. Т. 3. № 6. С. 283-295.
9. Базунова М. В., Силантьева А. Ю., Мустакимов Р. А. Гелеобразные материалы на основе полимерных комплексов карбоксиметилцеллюлозы с поли-(N-винилпирролидоном) // *Бутлеровские сообщения.* 2022. Т. 69. № 3. С. 94-103.
10. Lazdin R.Y., Chernova V.V., Bazunova M.V., Zakharov V.P., Kulish E.I. Possibility of producing semisolid dosage forms based on aqueous solutions of chitosan succinamide in the presence of modification additives // *Russian Journal of Applied Chemistry.* 2020. Т. 93. № 1. С. 65-71.



Р. А. МУСТАКИМОВ, А. Ю. СИЛАНТЬЕВА, В. В. КАЛЕЕВА

*Silantjeva.anushka@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. хим. наук, доц. М. В. БАЗУНОВА

*Башкирский государственный университет*

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ N-СУКЦИНИЛХИТОЗАНА С ПОЛИ-N-ВИНИЛПИРРОЛИДОМ

**Аннотация.** Работа посвящена изучению сорбционных свойств полимерных пористых материалов на основе комплексов N-сукцинилхитозана с поли-N-винилпирролидоном в зависимости от состава реакционной смеси. Определено, что максимальная равновесная степень сорбции, равная 0,307, превышающая данный показатель для трехмерного матрикса на основе индивидуального N-сукцинилхитозана (0,288), характерна для образцов на основе комплексов ПВП:СХТЗ с массовым соотношением 30:70 мас. %. Следовательно, варьирование состава комплексов обеспечивает регулирование конформационно-надмолекулярного состояния макромолекул, что отражается на возможности управления сорбционными и транспортными свойствами пленочных материалов на их основе.

**Ключевые слова:** матриксы для тканевой инженерии, полимерные комплексы, N-сукцинилхитозан, поли-N-винилпирролидон, сорбционные свойства.

### *Введение*

Направление в области разработок систем на основе комплексов полисахаридов является крайне актуальной задачей. Полисахариды обладают несколькими видами функциональных групп, обуславливающими особенности их поведения при образовании комплексов. Также в качестве особенностей полисахаридов можно выделить неравномерность распределения заряда на поверхности макромолекул [1, 2], большое количество функциональных групп (гидроксильные, аминогруппы), структурная схожесть с внеклеточным матриксом клеток кожи [3]. Особенности строения полисахаридов и сочетание их с другими биологически активными полимерами позволяет исследователям создавать большое количество полезных биоматериалов на их основе [3, 4]. Также использование полисахаридов в качестве основы для формирования полимерных комплексов (ПК) является интересным с точки зрения разработки биосовместимых, биodeградируемых медицинских материалов и рационального использования биоресурсов, так как полисахариды являются возобновляемым источником полимерного сырья [4, 5].

В данной работе в качестве компонентов ПК использованы полианион полисахарид натриевая соль N-сукцинилла хитозана (СХТЗ), который не проявляет

токсичности, водорастворим и характеризуется биосовместимостью с тканями организма [6, 7] и неионогенный функциональный поли-N-винилпирролидон (ПВП), обладающий высокой адсорбирующей способностью, склонностью к комплексообразованию и связыванию токсинов, что делает получаемые ПК перспективными для использования в медицинских материалах.

Процессы агрегации в растворах ПКК могут привести к формированию трехмерной макромолекулярной структурной сетки. Следовательно, данный подход может использоваться для получения гидрогелей без применения сшивающих агентов, с последующим формированием на основе гелей пористых трехмерных материалов.

*Целью работы* явилось изучение влияния состава ПК ПВП-СХТЗ на свойства трехмерных пористых матриц на их основе.

### ***Экспериментальная часть***

Для формирования пористых материалов использовались следующие полимеры: СХТЗ с молекулярной массой 67, 200 и 500 кДа со степенью замещения по аминогруппам 75% (ЗАО «Биопрогресс»); Поли-N-винилпирролидон (Povidone K-17 USP 26) с М.м.=11000, производства CNSG Anhui Hongsifang Co., Ltd. (Китай).

Растворение СХТЗ в водных средах происходило в течение 48 часов, в случае ПВП растворы получали за 1-2 часа.

Полимерные комплексы получали постепенным добавлением по каплям равноконцентрированных растворов полимерных компонентов в определенном соотношении при непрерывном перемешивании (300 об/мин).

Состав смесей СХТЗ с ПВП выражали в массовых соотношениях 30:70, 50:50, 70:30. Данные соотношения характеризуют поведение систем с недостатком, избытком или равным количеством неионогенного компонента и полисахарида.

Приготовление трехмерных матриц осуществляли методом сублимационной сушки, заключающейся в заморозке исходных растворов смесей СХТЗ-ПВП с разными массовыми соотношениями в форме при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$  при

атмосферном давлении, с последующей сублимационной сушкой полученной заготовки матрикса в вакуумной камере. Замораживание раствора и сублимационную сушку заготовки матрикса проводят на подложке, выполненной из фторопластовой пленки и пластины из водяного льда. Толщина пластины из водяного льда выбрана из условия ее полной сублимации при сушке в вакуумной камере, при этом сублимационную сушку заготовки матрикса на подложке проводят на сетке из пластиковых нитей. Начальное давление в вакуумной камере должно быть не меньше 100 мм. рт.ст., а после испарения растворителя из заготовки матрикса давление в вакуумной камере снижают до  $\sim 0,01$  мм.рт.ст.

Определения суммарного объема пор сорбентов проводили следующим образом: навески сорбента ( $m$ ) выдерживали в этиловом спирте не менее 48 часов при температуре помещения  $23 \pm 4^\circ\text{C}$ , после чего взвешивали с погрешностью не более 0,0002 г ( $m_1$ ).

Суммарный объем пор  $V_{\text{общ}}$  вычисляется по формуле:

$$V_{\text{общ}} = \frac{(m_1 - m)}{m \cdot \rho},$$

где  $m$  – масса навески образца, г;  $m_1$  – масса навески образца, пропитанного этиловым спиртом, г;  $\rho$  – плотность этилового спирта, г/см<sup>3</sup>.

Определение плотности матриксов на основе ПВП-СХТЗ проводили методом гидростатического взвешивания, который основан на определении объема тела путем взвешивания тела в жидкости. Вес тела в воде уменьшается согласно закону Архимеда, на величину веса, вытесненного телом объема жидкости. Образец полимера, имеющий комнатную температуру (около  $20^\circ\text{C}$ ), прикрепляют с помощью тонкой металлической проволоки к коромыслу лабораторных весов, обладающих точностью до 0,01 г, и выполняют взвешивание. Затем производят взвешивание образца в воде. Для этого стакан, наполненный дистиллированной водой с температурой  $20^\circ\text{C}$ , устанавливают на специальную подставку, которая не должна касаться чашки весов. Образец погружают в подставленный стакан. При погружении образца в воду следят за тем, чтобы на его поверхности и на проволоке не было пузырьков воздуха, а сам образец был погружен в воду полностью и не касался дна и стенок стакана.

### ***Обсуждение результатов***

Известно, что, чтобы полимерный материал медицинского назначения мог непосредственно контактировать с организмом, он должен иметь определенную структуру, которая не будет препятствовать формированию нормальной ткани. В том числе полисахаридный материал должен иметь оптимальную шероховатость поверхности и обладать сетью макропор. Оптимальную объемную и поверхностную структуру материала возможно создать в процессе направленного модифицирования исходных полимеров, например, в процессе получения на основе полисахаридов, в том числе СХТЗ, полимерных комплексов. Данный вид модификации открывает пути управления надмолекулярной структурой, формируемой макромолекулами полимера, а, следовательно, должен приводить и к варьированию морфологией создаваемого материала.

Так, на основе растворов ПК ПВП-СХТЗ с разным массовым соотношением компонентов методом сублимационной сушки были получены пористые трехмерные матриксы (Рис. 1).

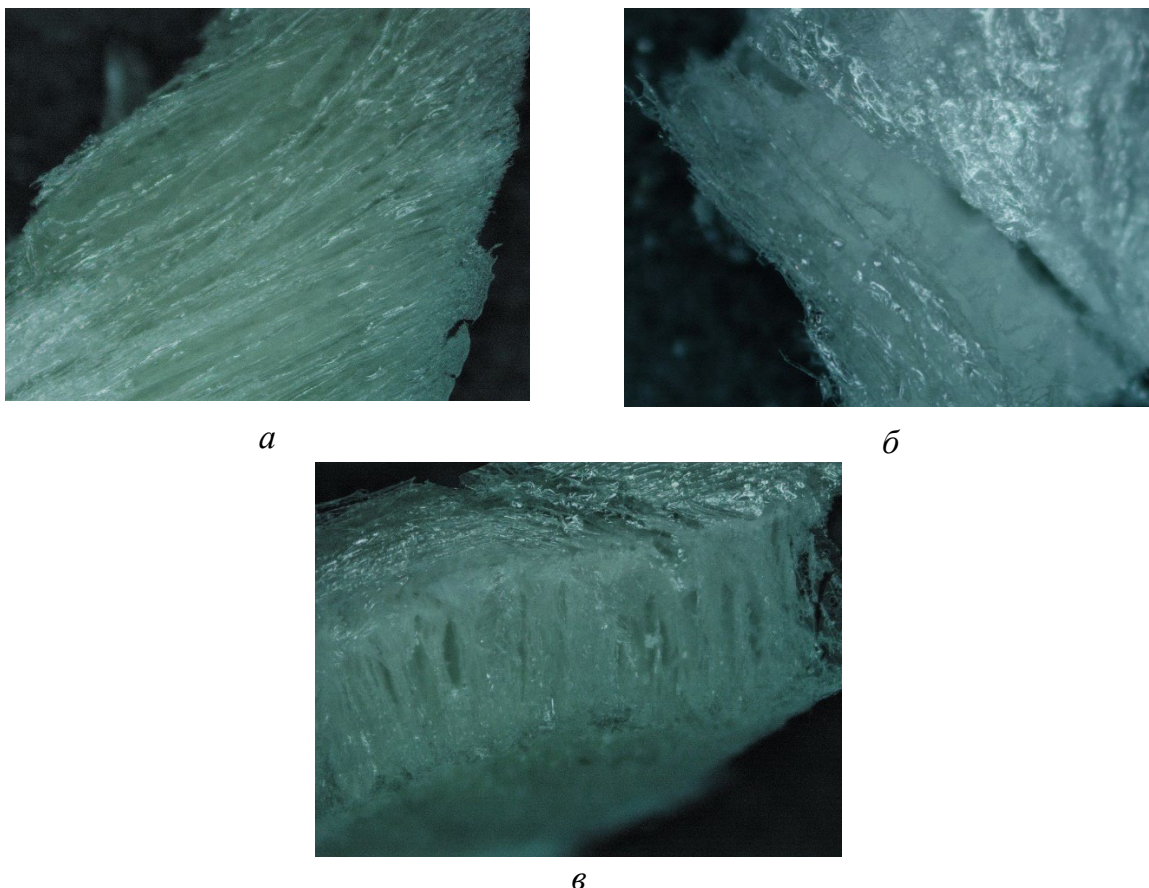


Рис. 1. Микрофотографии поверхности образцов трехмерного матрикса на основе смесей ПВП-СХТЗ с массовым соотношением а - 30:70, б – 50:50, в- 70:30

На рисунках 2-3 представлены данные о сорбционных свойствах матриц по парам этанола. Установлено, что максимальная равновесная степень сорбции, превышающая данный показатель для матрикса на основе индивидуального СХТЗ, характерна для образцов, с массовым соотношением ПВП:СХТЗ 30:70 мас. %. Понижение степени сорбции образцами, полученными из ПК с соотношением ПВП:СХТЗ 70:30 и 50:50 мас. %, вероятно, связано как с повышенной степенью структурированности растворов исходных ПК, так и с изменением полярности поверхности матриц.

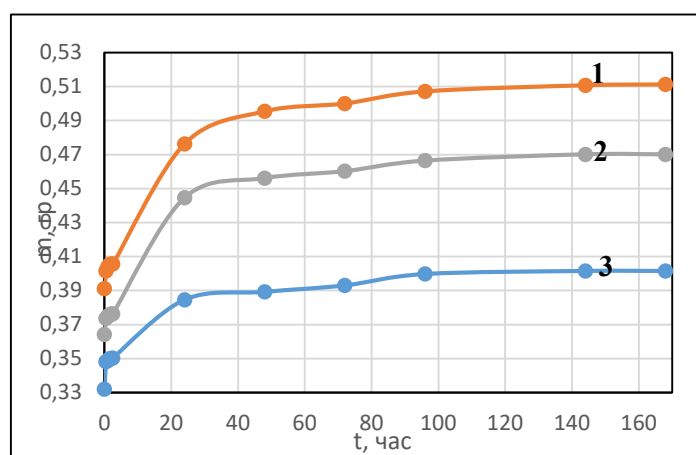


Рис. 2. Кривые сорбции паров этанола матриксами на основе ПВП-СХТЗ с массовыми соотношениями: 30:70 (1); 50:50 (2); 70:30 (3)

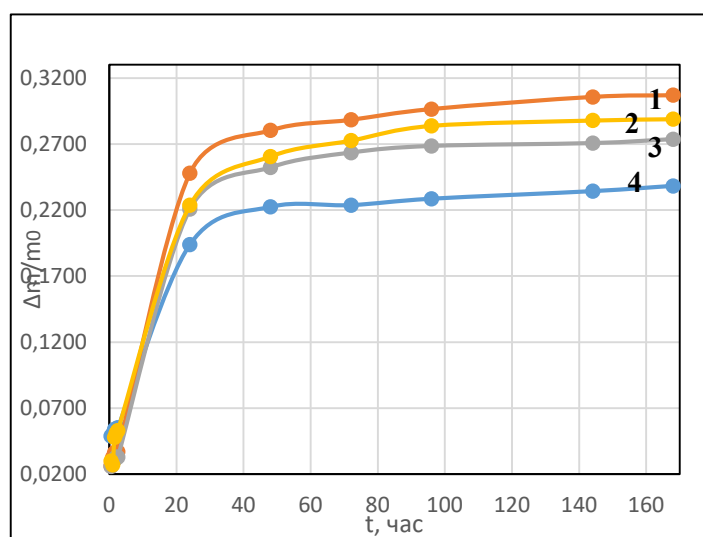


Рис. 3. Зависимость равновесной степени сорбции паров этанола матриксами на основе ПВП-СХТЗ с массовыми соотношениями: 30:70 (1); СХТЗ индивидуальный (2); 50:50 (3); 70:30 (4)

Сорбционные свойства матриц в том числе могут быть связаны с плотностью материалов. Действительно, как следует из данных, представленных в таблице 1, суммарный объем пор и равновесная степень сорбции по парам этанола находится в прямой зависимости от плотности.

Таблица 1

Сравнение свойств трехмерных матриц на основе ПК ПВП-СХТЗ

в зависимости от соотношения компонентов

Образец	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\Delta m/m_0$ max	Суммарный объем пор $V_{\text{общ.}}$ ; см <sup>3</sup> /г
СХТЗ (индивидуальный)	0,937	0,288	1,980
Матрикс ПВП-СХТЗ, 70:30 % мас.	0,951	0,238	2,450
Матрикс ПВП-СХТЗ, 50:50 % мас.	0,993	0,274	2,530
Матрикс ПВП-СХТЗ, 30:70 % мас.	0,859	0,307	3,090

Таким образом, варьирование состава ПК обеспечивает регулирование конформационно-надмолекулярного состояния макромолекул, что отражается на возможности управления сорбционными и транспортными свойствами пленочных материалов на их основе.

### **Выводы**

Определено, что максимальная равновесная степень сорбции, равная 0,307, превышающая данный показатель для трехмерного матрикса на основе индивидуального СХТЗ (0,288), характерна для образцов на основе ПК ПВП:СХТЗ с массовым соотношением 30:70 мас. %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Местечкина, Н. М. Сульфаты полисахаридов и их антикоагулянтная активность / Н. М. Местечкина, В. Д. Щербухин // Прикладная биохимия и микробиология. – 2010. – Т. 46. – № 3. – С. 291–298.
2. Mansur Y. Polysaccharides: Syntheses, Modifications and Structure/Property Relations / Y. Mansur. – Elsevier, 2013. – 522 p.
3. Shelke, N. B. Polysaccharide biomaterials for drug delivery and regenerative engineering / N. B. Shelke, R. James, C. T. Laurencin, S. G. Kumbar // Polymers for Advanced Technologies. – 2014. – Т. 25. – №. 5. – С. 448-460.

4. Zhao Y. et al. In situ cross-linked polysaccharide hydrogel as extracellular matrix mimics for antibiotics delivery // *Carbohydrate polymers*. – 2014. – Т. 105. – С. 63-69.
5. Bazunova M. V., Mustakimov R. A., Kulish E. I. Obtaining Biocompatible Materials Based on Polymer Complexes of Succinyl Chitosan C Poly-N-Vinylpyrrolidone or Polyethylene Glycol // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. – 2021. – Т. 15. – №. 5. – С. 888-894.
6. Базунова М.В., Шарафутдинова Л.А., Лаздин Р.Ю., Чернова В.В., Миксонов Д.Н., Захаров В.П. Материалы медицинского назначения на основе систем сукцинамид хитозана–глицерин. // *Прикл. биохим. и микробиол.* 2018. Т. 54. № 5. С. 472-476. <https://doi.org/10.1134/S0555109918050057MEDICAL>. [Bazunova M.V., Sharafutdinova L.A., Lazdin R.Y., Chernova V.V., Mixonov D.N., Zakharov V.P. Materials based on chitosan succinamide–glycerol systems. // *Appl. Biochem. Microbiol.* 2018. V. 54. N 5. P. 474-477. <https://doi.org/10.1134/S0003683818050058>.
7. Skorik Y.A., Kritchenkov A.S., Moskalenko Y.E., Golyshev A.A., Raik S.V., Whaley A.K., Vasina L.V., Sonin D.L. Synthesis of N-succinyl- and N-glutaryl-chitosan derivatives and their antioxidant, antiplatelet, and anticoagulant activity. // *Carbohydr. Polymers*. 2017. V. 166. P. 166 - 172. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.02.097>.

УДК 620.3

Д. А. НЕСТЕРОВА

*dasha070717@mail.ru*

Науч. руковод. – ст. преп. С. В. СПИРИДОНОВ

***Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева-КАИ***

## **АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются перспективные подходы к хранению водорода. На основе сравнения эксплуатационных характеристик рассмотрены основные преимущества и недостатки каждого подхода. Определено, что наиболее эффективным остается хранение в виде сжатого газа и в сжиженном виде. Способ хранения в связанном с наноструктурами виде представляет интерес в перспективе, но является недостаточно проработанным.

**Ключевые слова:** хранение водорода; наноматериалы; углеродные нанотрубки.

Современную промышленность сложно представить без применения технических газов на различных этапах производства. На сегодняшний день водород входит в тройку наиболее востребованных промышленностью газов, уступая лишь кислороду и азоту. Сфера применения водорода в России достаточно широка. Но, большому распространению мешает сложности с хранением и транспортировкой газа. Поэтому разработка новых и более эффективных методов хранения и транспортировки во многом определяет дальнейший прогресс в развитии водородной технологии и энергетики. [1]

Самый легкий способ хранения водорода – это газообразная форма под давлением. Эта технология не требует больших затрат, но является не слишком эффективной с точки зрения безопасности. Основное преимущество метода – в его обработанности. Подобный подход широко используется при хранении природного газа.[2]

Хранение водорода в сжиженном виде является более эффективным, чем его содержание в газообразном состоянии. Но сама технология хранения сложна. Уже при температуре 20,25 К водород переходит в газообразную фазу, и для поддержания его в жидком виде требуется создания больших величин давлений.



Вследствие этого возникает риск появления утечек, которые могут достигать потери 3% емкости в день. Для предотвращения утечек применяют комбинированный подход, включающий обычную и вакуумную изоляцию. Это помогает уменьшить тепловой дрейф, и позволяет снизить риск утечек. [2]

Одним из перспективных методов является хранения водорода в связанном виде (например, гидридах металлов). Гидриды представляют собой атомы металлов, которые занимают основное место в решетке, и атомы водорода, которые находятся в этих решетках в виде дефектов. Хранение водорода в гидридной форме позволяет не использовать огромные контейнеры или баллоны высокого давления. Хранение в таком виде позволяет уменьшить удельный объем в 4 раза по сравнению хранения в контейнерах. Водород в таком виде легче перемещать, т.к. в связанном виде он не является взрывоопасным. Также снижаются расходы из-за устранения необходимости конверсии или сжижения водорода. [3]

Еще один перспективный подход - криоадсорбционное хранение водорода. Эта технология объединяет гидридную технологию и технологию хранения водорода в жидком виде. Содержание водорода происходит в криогенно-охлаждаемых емкостях, содержащих адсорбирующий водород материал. Подобный подход, по сравнению с гидридным методом, дает большой выигрыш в удельной емкости хранения на единицу массы адсорбента. При этом стоимость адсорбента также ниже. Так как объем адсорбата зависит от температуры, то, чем ниже температура криоадсорбции, тем выше удельная емкость. Это существенно снижает общие затраты на хранение водорода, даже с учетом высоких затрат на охлаждение водорода. [3]

Рассмотрим теперь преимущества и недостатки каждого метода хранения (См. таблицу 1), а также таблицу 2, на котором представлены удельные показатели этих методов хранения.

## Преимущества и недостатки методов хранения

Метод хранения	Преимущества	Недостатки
1.Газообразный водород под давлением	Технология хорошо отработана и доступна, относительно невелика стоимость.	Низкое объемное содержание (около 7,7 кг/м <sup>3</sup> при давлении 10 МПа). Плотность запасенной энергии при высоких давлениях (до 70 МПа) сравнима с жидким водородом, но технология хранения при таких высоких давлениях до конца не отработана. Высокая пожаро- и взрывоопасность.
2.Жидкий водород	Технология доступна, высокая плотность (71 кг/м <sup>3</sup> ).	Высокие энергозатраты на сжижение, потери водорода, необходимость суперизоляции, как следствие, высокая стоимость. Высокая пожаро- и взрывоопасность.
3.Водород в гидридах	Удобство и безопасность хранения в твердой фазе (в связанном состоянии); ряд технологий достаточно хорошо отработан	Самая низкая удельная емкость, необходимость подогрева, деградация со временем, относительно высокая стоимость.
4.Криогенная адсорбция	Технология проста и достаточно отработана, безопасность хранения в твердой фазе (в связанном состоянии). Более высокая удельная емкость чем у гидридного метода.	Относительно низкое объемное содержание водорода (0,5-20 кг/м <sup>3</sup> ). Необходимость охлаждения и компримирования.

Таблица 2

## Удельные показатели пяти способов хранения

Способ хранения	Удельное потребление энергии, кВт*ч/кг H <sub>2</sub>	Требуемый удельный объем для хранения, дм <sup>3</sup> /кг	Требуемая удельная масса для хранения, кг/кг
1.Газообразный водород при низком давлении	0,39	1020	-
2.Газообразный водород при высоком давлении	0,93	81	16,0
3.Водород в гидридах	1,16	22	76,9
4.Жидкий водород	10,5	14	7,0
5.Криогенная адсорбция	3,2	59	20,0

Подводя итог, можно сказать, что классическое хранение водорода под давлением и в жидком виде наиболее экономически выгодно и проверено со временем. Но наиболее безопасными являются подходы к хранению в связанном

виде. Сейчас идут поиски повышения эффективности таких методов. На сегодняшний день наиболее перспективным считается связывание водорода с углеродными материалами. Такие материалы, обладают рядом важных преимуществ. Они достаточно легки, имеют полую структуру, и могут быть использованы в качестве контейнера для хранения водорода, достигая удельной плотности хранения водорода в газообразном виде. При нагревании углеродных материалов водород способен медленно высвобождаться из них. Среди множества предложенных абсорбирующих материалов – одностенные углеродные нанотрубки (ОНТ) и графитовые нановолокна (ГНВ) обладают одним из наиболее высоких сорбционных показателей. Малый диаметр таких структур (от одного до нескольких десятков нанометров) позволяет достичь высокой удельной площади поверхности и, как следствие, высокой плотности хранения [4].

В таблице 3 представлены обобщенные данные по водородсорбционной емкости ОНТ и ГНВ, которая в ряде случаев существенно превышает значения, требуемые для мобильных систем хранения водорода. Так как данные о количестве водорода, аккумулируемого углеродными НМ, в работах разных авторов различаются, в таблице представлены данные из нескольких источников. Причиной расхождений является отсутствие надежных способов получения чистых ОНТ и ГНВ, а также общепринятых методик их аттестации, например, по чистоте, степени "открытости", диаметру нанотрубок, наличию дефектов, величине межслоевых расстояний и количеству металлических катализаторов. Кроме того, на водородсорбционную емкость существенное влияние оказывают предварительная обработка углеродных наноматериалов и чистота используемого водорода. По этой причине результаты, получаемые при исследовании сорбции водорода новыми углеродными наноматериалами, характеризуют только некоторые конкретные образцы и пока не могут быть использованы для убедительного сравнения сорбционной эффективности углеродных НМ разного типа [5].

Сорбционные характеристики различных углеродных наноматериалов  
(ОНТ-Одностенные нанотрубки, ГНВ-графитовые нановолокна)

<i>Материал</i>	<i>Максимальная емкость, масс. %</i>	<i>T, K</i>	<i>P<sub>H<sub>2</sub></sub>, МПа</i>
ОНТ	8.25	80	7.18
ОНТ	5-10	133	0.04
ОНТ	4.2	300	10-12
ОНТ	6.5-7	300	0.1
ОНТ	1.1-5.2	293	10
ОНТ	3.5	300	5-10
ГНВ	11-66	300	11
ГНВ	0.4	298-773	0.1
ГНВ	10-12	373	11
ГНВ	2.5	300	5-10
ГНВ	10	300	12

В ходе анализа выяснено, что углеродные нанотрубки и нановолокна могут обеспечить высокую плотность хранения водорода (30-100 кг/м<sup>3</sup>), они стабильны при нормальных атмосферных условиях, и обеспечивают безопасность хранения при низком остаточном давлении газа. Среди недостатков можно выделить недостаточно отработанное производство наноструктур с заданными параметрами, расхождения при воспроизводстве результатов экспериментов, неясные экономические перспективы.

Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее эффективными способами остаются хранение водорода в газообразном и сжиженном виде. Тем не менее, методы аккумуляции в связанном виде уже превзошли выше упомянутые подходы в безопасности, и демонстрируют заметное сокращение разрыва в удельной емкости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fateev V., Grigoriev S. H<sub>2</sub> technologies in Russia (Book Chapter). Hydrogen in an International Context: Vulnerabilities of Hydrogen Energy in Emerging Markets. River Publishers, 2017. P. 171.
2. Ажажа В.М. Материалы для хранения водорода: анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках / В.М. Ажажа, М.А. Тихоновский, А.Г. Шепелев и др. // Вопросы атомной науки и техники №1 НАЦ «Харьковский физико-технический институт» г.Харьков, Украина; 2006. С. 145-152.
3. <https://metallolome.ru/tehnologii-i-sposoby-hraneniya-vodororo/>
4. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук / –2002. —Т. 172. – № 4
5. Ci L., Wei J., Wei B., Liang J., Xu C., Wu D. Carbon nanofibers and singlewalled carbon nanotubes prepared by the floating catalyst method. // Carbon. 2001. V.39. P. 329-335.

Ю. Р. НУРИЕВА

*yu.nuriewa@yandex.ru*

Науч. руковод. – Д. А. АКСЕНОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ПРОЧНОСТЬ И СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ARB ПРОКАТКИ**

**Аннотация.** Алюминиевые сплавы являются легкими материалами, обладающими высокой удельной прочностью и пластичностью. Данные свойства позволяют алюминиевым сплавам соответствовать высокому уровню современного технологического развития. Существенно повысить прочность алюминиевых сплавов за счет измельчения структуры до ультрамелкозернистого состояния (УМЗ) позволяют различные методы ИПД. В частности, метод аккумулялирующей прокатки (ARB) позволяет создать композитные материалы повышенной прочности. С другой стороны, прочность для алюминиевых сплавов является не единственной важной характеристикой, поскольку они используются в неблагоприятных условиях внешней среды, не менее важна и коррозионная стойкость. Коррозионные свойства УМЗ металлов и сплавов могут существенно отличаться, в зависимости от характеристик структуры и легирующих элементов. В ходе данной работы был получен двухслойный композит Al/D16 методом аккумулялирующей прокатки. Проведены исследования структуры и свойств композитного материала, а также исследована коррозионная стойкость в 3% растворе NaCl. Процесс ARB прокатки пластин Al и D16 позволил получить композит с микротвердостью  $1560 \pm 50$  МПа и алюминиевым поверхностным слоем стойким к коррозии в 3% растворе NaCl.

**Ключевые слова:** ARB, аккумулялирующая прокатка, алюминиевые сплавы, алюминиевый композит, сплав D16.

### ***Введение***

Применение высокопрочных алюминиевых сплавов в различных отраслях техники становится все более популярным. Дополнительное упрочнение таким материалам можно придать посредством измельчения структуры, т.к. материалы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой отличаются высокими прочностными характеристиками. Основным способом получения таких структур остаются методы интенсивной пластической деформации. Среди всех методов ИПД аккумулялирующая прокатка (ARB), разработанная Сайто, имеет свои преимущества [1-2]. Данный процесс не требует сложного оборудования, производительность может быть высокой, а количество производимого материала не ограничено [3]. При этом сплавы алюминия являются наилучшим материалом, поддающимся обработке методом аккумулялирующей прокатки. Алюминиевые сплавы

являются легкими материалами, обладающими высокой удельной прочностью и пластичностью.

На протяжении многих лет сплав Д16 является наиболее широко применяемым конструкционным материалом. По твердости и механической прочности он не уступает стали и обладает в 3 раза более легким удельным весом. Он превосходно деформируется в горячем или холодном состоянии, что позволяет получать различные виды полуфабрикатов такие как: трубы, прутки, плиты, листы и т.д. [4]. Недостатком сплава данной системы считается низкая коррозионная стойкость, поэтому он нуждается в специальных антикоррозионных средствах защиты. В большинстве случаев сплав плакируют или анодируют, что существенно повышает его сопротивление коррозии. Плакировка алюминием применима только для листов, поскольку тонкий слой алюминия (не более 4% от толщины изделия) необходимо наносить с обеих сторон заготовки. Для этого листы дюралюминия, покрывают слоями из чистого алюминия, а затем прокатывают. В результате получают листовые полуфабрикаты, устойчивые к коррозии, царапинам и другим механическим повреждениям [5].

В данной работе были исследованы структура и свойства композита Al/Д16 полученного при помощи аккумулялирующей прокатки, и его коррозионной стойкости в 3% растворе NaCl.

### ***Материалы и методики исследований***

Материалом, использованным в этом исследовании, были чистый Al и сплав Д16 стандартного химического состава (Al-4,4Cu-1,4Mg-0,7Mn, вес.%). Уменьшение толщины за цикл составило 50%. Начальные толщины пластин алюминия и сплава Д16 составляли 1 и 6 мм соответственно. Толщина двуслойной пластины Al/Д16 после прокатки составила 3,1 мм.

Структурные исследования проводили на световом микроскопе «OLYMPUS GX51» и растровом микроскопе JSM6490. Для исследования служили шлифы после шлифовки и полировки. Микротвердость измеряли на готовых шлифах на микротвердомере Duramin-2 с использованием алмазной пирамиды Виккерса.

Исследования коррозионной стойкости композита Al/D16 проводились согласно ГОСТ 9.913-90 с использованием 3% раствора NaCl, при температуре  $T = 20^{\circ}\text{C}$ . Время выдержки образцов в растворе – 5 дней и 30 дней.

### **Результаты и обсуждение**

Были изучены структурные изменения сплава Д16 в исходном состоянии и после ARB с помощью РЭМ (рис.1). Наблюдаются мелкодисперсные частицы вторых фаз, после прокатки средний размер частиц не изменяется  $-5\pm 3$  мкм, в исходном состоянии Д16 размер частиц  $-4\pm 3$  мкм. Толщина алюминиевого слоя составляет 450 мкм.

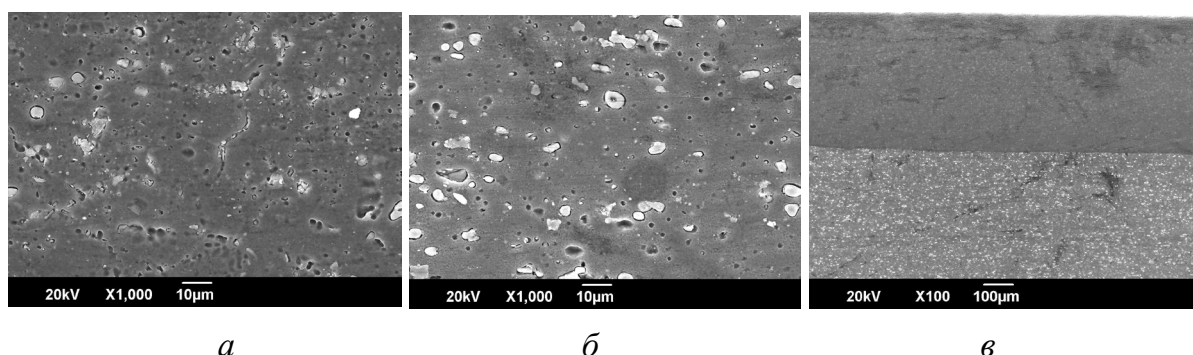


Рис. 1. РЭМ изображения:

*а* – исходное состояние Д16; *б* – Д16 в композите после ARB; *в* – композит после ARB

Механические характеристики композита Al/D16 представлены в таблице 1. ARB повышает прочностные свойства композита в 2 раза.

Таблица 1

Механические свойства сплава в различном состоянии

Состояние	HV, МПа
Д16 исх.сост.	670±50
Д16 ARB	1560±50
Al ARB	360±30

Коррозионные исследования Д16 в 3% растворе NaCl показали, что коррозия имеет точечный характер (рис.2). Алюминиевый слой композита устойчив к коррозии и может служить эффективной защитой для сплава Д16 против коррозии в физрастворе. Размер питтингов после прокатки больше на 45% и составляет в среднем 8,25 мкм, чем у исходного образца, но мест зарождения меньше.

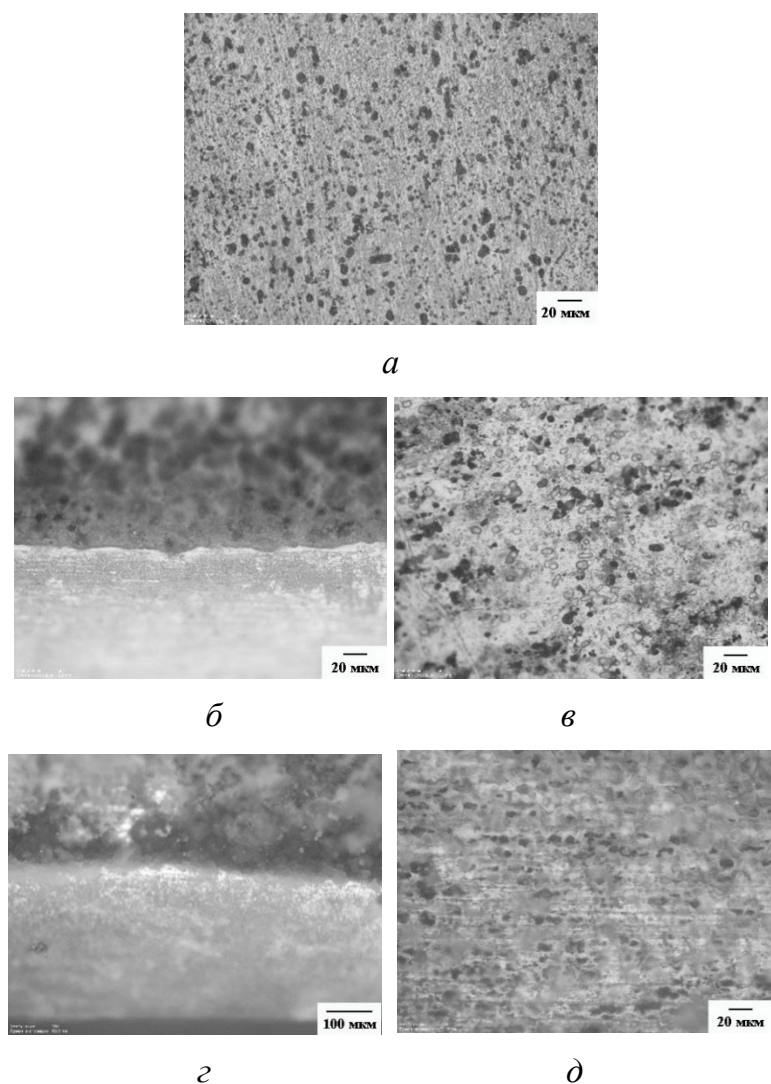


Рис. 2. СМ изображения образцов:  
*a* – после коррозии исходного образца сплава Д16 в течении 5 дней; *б-в* – после ARB прокатки и коррозии 5 дней; *г-д* – 30 дней

На сплаве Д16 после прокатки наблюдается коррозионное растрескивание (рис.3), это вероятно связано с остаточным напряжением на границах зерен.

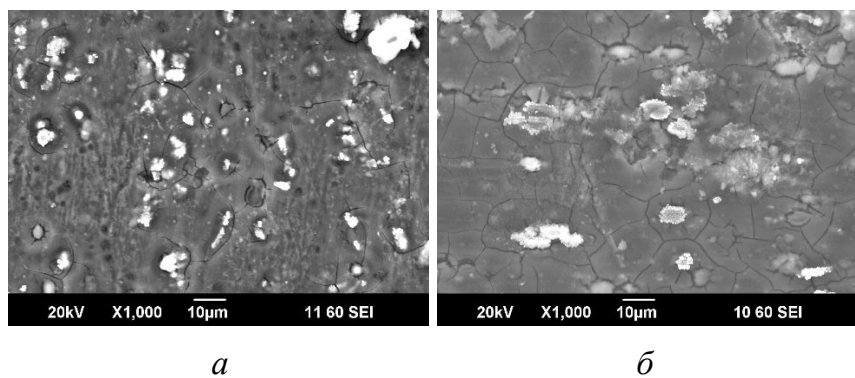


Рис. 3. РЭМ после коррозионного испытания в течении 5 дней:  
*a* – Д16 исходное состояние; *б* – Д16 ARB



## **Выводы**

1) Методом аккумулярующей прокатки пластин чистого алюминия и сплава Д16 возможно получить композитный двухслойный образец с микротвердостью  $1560 \pm 50$  МПа.

2) Слой чистого алюминия обеспечивает хорошую коррозионную стойкость в 3% растворе NaCl на протяжении 30 дней.

3) Сплав Д16 подвержен питтинговой коррозии, размер питтингов после аккумулярующей прокатки больше на 45%, чем у исходного образца, но мест зарождения меньше.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Pazhuhfarb Y., Eghbalib E. Effect of Processing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Al6061/B4C Metal Matrix Composite Fabricated by Using Stir Casting. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2018. Vol. 72. № 2.
2. Lenard J.G. Severe Plastic Deformation – Accumulative Roll Bonding book: Primer on Flat Rolling. 2014. Elsevier.
3. Saito, Y., H. Utsunomiya, N. Tsuji, and T. Sakai, 1999. Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. Acta materialia. Vol. 47. № 2. P. 579-583.
4. Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд. // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
5. <https://cu-prum.ru/alyuminij1/splav-d16.html>

П. В. ПОЛЯКОВА

*polina.polyakowa@yandex.ru*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. РАН, Ю. А. БАИМОВА

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В КОМПОЗИТАХ Mg/Al, Ti/Al, Cu/Al: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**Аннотация.** Композитные материалы с алюминиевой матрицей обладают большим потенциалом, ценность которого заключается в практическом применении из-за их превосходных свойств. В настоящей работе проведено молекулярно-динамическое моделирование для исследования перемешивания атомов в системах Al/Mg, Al/Ti и Al/Cu при одноосном сжатии в сочетании с деформацией сдвига при комнатной температуре. Настоящая работа представляет собой упрощение сценария, экспериментально наблюдаемого ранее для получения композитов Al/металл. Установлено, что существует критическое значение деформации сжатия и сдвига, необходимое для получения прочного композитного соединения на основе Al. Глубина диффузии атомов обоих компонентов зависит от приложенной деформации: линейная зависимость для Al/Mg; логарифмическая зависимость для Al/Ti и Al/Cu. Испытания на растяжение показывают, что из рассматриваемых структур композит Al/Ti имеет самый высокий предел прочности, а Al/Mg – самый низкий.

**Ключевые слова:** композит, молекулярная динамика, алюминий, сдвиговая деформация

### ***Введение***

Композиты с алюминиевой (Al) металлической матрицей являются хорошо известными материалами с превосходными свойствами, такими как малый вес и высокая коррозионная стойкость, что в результате открывает широкую перспективу их применения в аэрокосмической, авиационной, автомобильной промышленности. На сегодняшний день обсуждаются многочисленные методы изготовления таких композитов, например: сварка взрывом, диффузионная сварка, вакуумное горячее прессование и валковая сварка, экструзия. В работах [1-4] было показано, что одним из способов получения подобных композитов является кручение под высоким давлением (КГД) с последующим отжигом. Интенсивная пластическая деформация приводит к уменьшению зерна до наноразмеров, ускоряет диффузию, влияя на формирование интерметаллидных фаз. В экспериментах такие особенности структурных и фазовых превращений не всегда возможно

рассмотреть детально, в таком случае могут быть использованы различные методы моделирования, в частности метод молекулярной динамики.

Целью данной работы является изучение процесса взаимной диффузии атомов Al и Ti (Mg, Cu) на границе между разнородными металлами под действием деформационной обработки. В качестве деформационной обработки выбрано одноосное сжатие перпендикулярное границе перемешивания атомов, в комбинации с деформацией сдвига в плоскости границы. Для исследования прочности и механизмов разрушения полученных композитных структур проводятся испытания на растяжение.

### *Детали моделирования*

Рассмотрены три системы: Al/Ti, Al/Mg и Al/Cu, где Ti и Mg имеют ГПУ-решетку, Cu и Al – ГЦК-решетку. Нижняя часть кристалла всегда представляет собой слой атомов Al, а верхняя часть кристалла – другой металл (Me) (Mg, Ti или Cu) (см. схему начальной структуры на рис. 1). Размеры начальных структур:  $L_x = L_y = L_z \approx 100 \text{ \AA}$ . Расстояние между двумя кристаллами принимается равным среднему значению параметров решетки обоих металлов  $(a_{Al} + a_{Me})/2$ , что составляет  $3.6 \text{ \AA}$  для Al/Mg,  $3.5 \text{ \AA}$  для Al/Ti,  $3.8 \text{ \AA}$  для Al/Cu. Начальная атомная структура формируется путем объединения двух совершенных кристаллов с помощью программы; периодические граничные условия применяются вдоль осей x, y и z.

Моделирование осуществляется с использованием программного пакета LAMMPS. Визуализация данных моделирования и структурный анализ выполняется с помощью программы OVITO. Для описания взаимодействия между атомами используются межатомные потенциалы EAM (embedded atom method), рассчитанные специально для систем Al/Mg [5], Al/Ti [6] и Al/Cu [7]. С помощью термостата Носе-Хувера в системе поддерживается постоянная температура 300 К. Для исследования влияния давления и сдвига на скорость диффузии в пограничном слое между металлами применяется одноосное сжатие в сочетании с деформацией сдвига. Для исследования механических свойств полученных композитных структур проводится одноосное растяжение перпендикулярное границе

перемешивания атомов после комбинированного сжатия до разных степеней деформации, обозначенных точками I, II и III на рис. 1а. Таким образом, структуры композитов, полученных после сжатия до точек I, II и III, являются исходными для испытаний на растяжение без дополнительных релаксаций или изменений. Предел прочности при растяжении ( $\sigma$ ) и модуль Юнга ( $E$ ) для всех композитов нормированы относительно предела прочности ( $\sigma_0$ ) и модуля Юнга ( $E_0$ ) исходного недеформированного образца.

### *Результаты и их обсуждение*

На рис. 1а представлены кривые напряжение-деформация в процессе одноосного сжатия, а также схема начальной структуры и три композита Al/Me (точка III,  $\varepsilon_{сж}=0.16$ ). Структуры на рис. 1б визуализируются в соответствии с анализом типа кристаллической решетки (CNA): зеленые атомы – ГЦК-решетка, синие атомы – ОЦК-решетка, красные атомы – ГПУ-решетка, серые атомы – неопределенное координационное число.

На кривых напряжение-деформация на рис. 1а наблюдаются несколько скачков напряжения, которые можно объяснить высвобождением энергии, накопленной во время деформации, за счет активности дефектов. До точки I наблюдается упругая деформация для Al/Ti и Al/Cu, а для Al/Mg - до точки II. Однако точка I ( $\varepsilon_{сж}=0.04$ ) для Al/Mg была выбрана для дальнейшего анализа, так как на этом участке кривые напряжения-деформации для Al/Mg и Al/Cu практически совпадают.

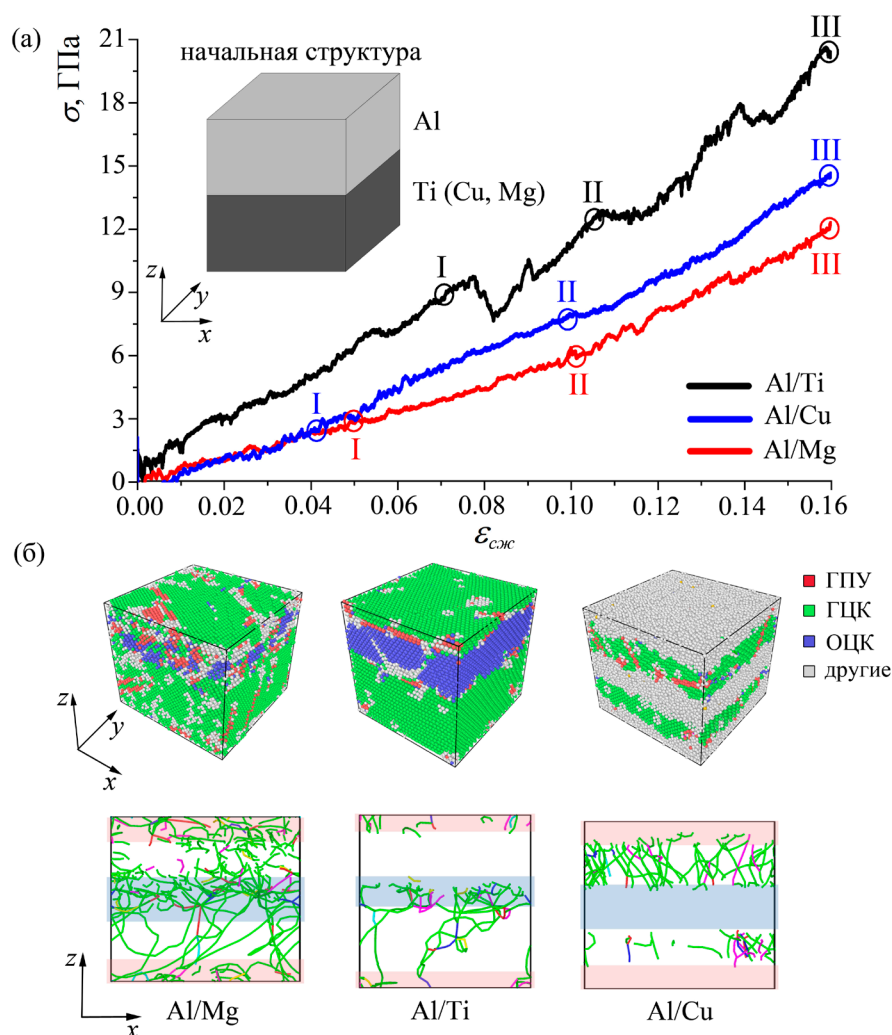


Рис. 1. (а) Кривые напряжение-деформация при одноосном сжатии перпендикулярно границе перемешивания атомов: Al/Ti – черная кривая, Al/Cu - синяя, Al/Mg - красная. Схема начальной структуры. (б) Структуры после деформационной обработки (точка III,  $\varepsilon_{сж}=0.16$ ). Атомы окрашены в соответствии с типом кристаллической решетки

Ход кривых для Al/Mg и Al/Cu имеет линейный характер, с изменением наклона в точке II для Al/Mg и в точках I и II для Al/Cu. Процесс сжатия Al/Ti намного сложнее, наблюдается сразу несколько скачков напряжения, возникающие из-за изменения дислокационной структуры. Каждый спад на кривой (например, после точки I) связан с образованием ОЦК решетки в Ti-части образца в процессе сжатия. Стоит отметить, что область со смешанными атомами металлов (где предположительно появляются интерметаллидные фазы) также окрашена в зеленый цвет (ГЦК) с красными (ГПУ) областями. Для композита

Al/Cu OVITO не смог определить тип кристаллической решетки для межслоевой границы.

Процесс миграции атомов можно описать средним ( $\Delta z_{cp}$ ) и максимальным ( $\Delta z_{max}$ ) расстояниями атомного смещения по сравнению с начальным положением границы (рис. 2а-в). Значение  $\Delta z_{max}$  (глубина диффузии) определяется как разница между координатой  $z$  и начальным положением границы. Значение  $\Delta z_{cp}$  определяется как среднее для всех координат по оси  $z$ , деленное на количество атомов, прошедших через границу. Зависимость глубины диффузии от приложенной деформации аппроксимируются сплошными кривыми.

Глубина диффузии для Al/Mg (рис. 2а) имеет две области, которые могут быть линейно аппроксимированы: область I  $\varepsilon_{сж}^{Mg} \leq 0.49$ ,  $\varepsilon_{сж}^{Al} \leq 0.102$  и область II  $0.49 \leq \varepsilon_{сж}^{Mg} \leq 0.16$ ,  $0.102 \leq \varepsilon_{сж}^{Al} \leq 0.16$ . Показано, что после  $\varepsilon_{сж}^{Mg}=0.49$ , движение атомов Mg замедляется, и глубина диффузии практически не меняется. Связь между глубиной диффузии и деформацией может быть описана как  $\Delta z_{max}=k*\varepsilon_{сж}$ , где  $k$  – скорость диффузии, которая может быть получена из наклона аппроксимирующей кривой. Для Mg на I режиме  $k_{Mg}^I=0.19$  Å/пс и на II режиме  $k_{Mg}^{II}=0$ . Для Al,  $k_{Al}^I=0.11$  Å/пс и на II режиме  $k_{Mg}^{II}=0$ . Таким образом, скорость диффузии до степени деформации  $\varepsilon_{сж}^{Mg} \leq 0.49$  для Mg почти в два раза больше, чем для Al, однако диффузия атомов Al в блок Mg протекала в два раза дольше.

Из рис. 2б видно, что глубина диффузии для Al/Ti и для Al/Cu логарифмически увеличивается с увеличением давления (времени)  $\Delta z_{max}=b*\ln(\varepsilon_{сж})$ , где  $b$  показывает крутизну кривой. Видно, что атомы Ti активнее перемешиваются до  $\varepsilon_{сж} \leq 0.04$  (коэффициент  $b^{Ti}=1.5$  Å/пс), атомы Al непрерывно движутся в сторону части Ti в течение всего процесса деформации ( $b^{Al}=0.9$  Å/пс). Однако кривые  $\Delta z_{cp}$  для Al/Ti практически совпадают, а значит для атомов Al и Ti наблюдается симметричная диффузия. Стоит отметить, что Ti имеет больший атомный радиус и гораздо большую атомную массу, чем атомы Al. Таким образом, на первом этапе атомы Ti легче проникают в блок Al, в то время как атомы Al движутся медленнее на всех стадиях сжатия.

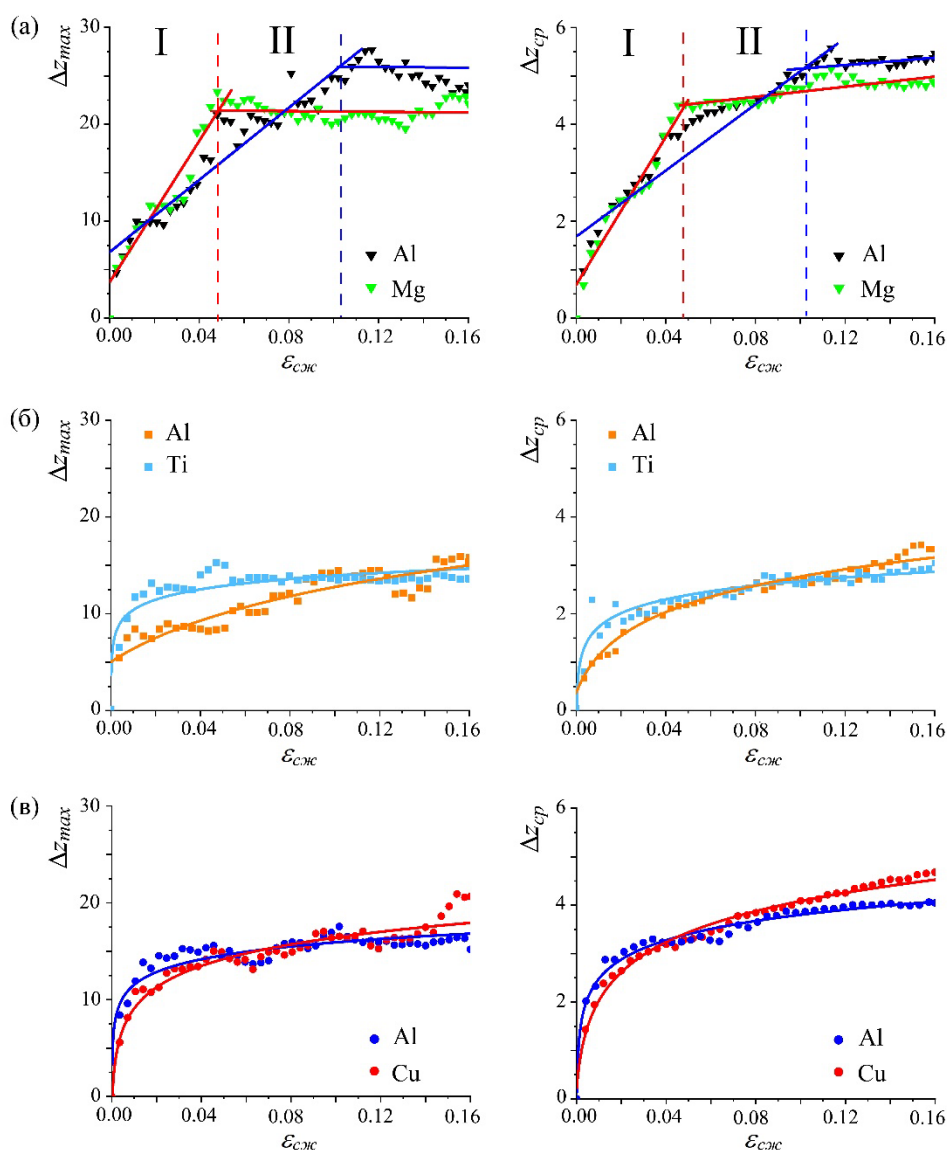


Рис. 2. Изменение положений атомов  $\Delta z$  в зависимости от степени сжатия:  
 а – для Al/Mg; б – для Al/Ti, (в) для Al/Cu

Для Al/Cu (рис. 2в) видно, что наиболее активное перемешивание атомов происходит до  $\varepsilon_{сж} \leq 0.04$ . В этом случае атомы Al активнее проникают в блок Cu, чем атомы Cu в блок Al ( $b_{Al} = 1.9 \text{ \AA/пс}$ ,  $b_{Cu} = 3.2 \text{ \AA/пс}$ ). После  $\varepsilon_{сж} = 0.04$  ход кривых практически совпадает, в результате чего наблюдается симметричная диффузия Al и Cu. Однако средняя глубина диффузии для Cu больше, следовательно, атомы Cu преимущественно диффундируют в блок Al, поскольку радиус атомов Al больше, чем у атомов Cu (для Al –  $1.43 \text{ \AA}$ , а для Cu –  $1.27 \text{ \AA}$ ).

Для исследования механических свойств полученных композитов проводится одноосное растяжение перпендикулярное границе перемешивания атомов

после комбинированного сжатия до разных степеней деформации: после комбинированного сжатия до стадии I (красная кривая), II (зеленая кривая) и III (черная кривая) (рис. 3а-в). Отметим, что для Al/Mg стадии I и II соответствуют деформации сжатия  $\varepsilon_{сж} = 0.05$ ,  $\varepsilon_{сж} = 0.102$ ; для Al/Ti стадии I и II соответствуют деформации сжатия  $\varepsilon_{сж} = 0.068$ ,  $\varepsilon_{сж} = 0.107$ ; для Al/Cu, стадии I и II соответствуют деформациям сжатия  $\varepsilon_{сж} = 0.042$ ,  $\varepsilon_{сж} = 0.1$ ; для всех структур стадия III соответствует деформации сжатия  $\varepsilon_{сж} = 0.16$ . После сжатия до  $\varepsilon_{сж} = 0.16$  для композитов Al/Ti и Al/Cu разрушение происходит в Al части, а для Al/Mg – в Mg части. Таким образом, граница, где произошло перемешивание атомов, прочнее чем в области чистого металла.

Значения предела прочности при растяжении  $\sigma/\sigma_0$ , деформации разрушения  $\varepsilon$  и модуля Юнга  $E/E_0$  для все трех структур представлены в таблице 1. Как видно после сжатия до  $\varepsilon_{сж} = 0.16$ , композит Al/Ti имеет наибольший предел прочности при растяжении, Al/Cu – средний, а Al/Mg – наименьший. Прочность при растяжении композитов Al/Mg и Al/Ti очень близки.

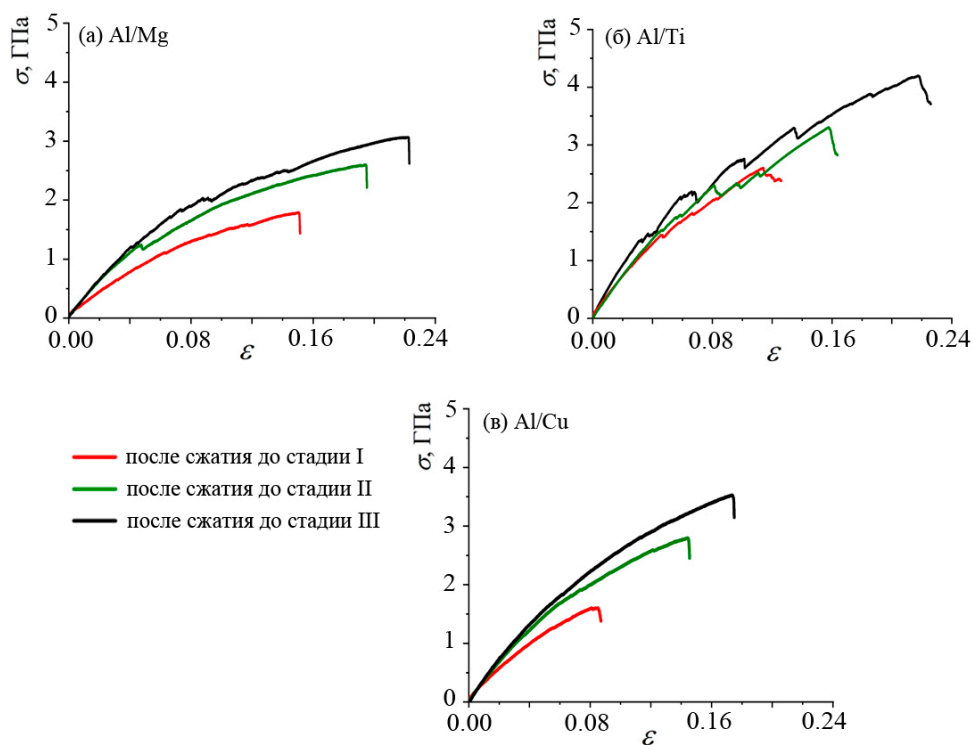


Рис. 3. Кривые напряжение-деформация при растяжении перпендикулярно границе перемешивания атомом:  
*a* – Al/Mg; *б* – Al/Ti; *в* – Al/Cu



Деформация растяжения ( $\varepsilon_p$ ), предел прочности ( $\sigma/\sigma_0$ ) и модуль Юнга ( $E/E_0$ ) после одноосного растяжения перпендикулярного границе перемешивания атомов после комбинированного сжатия до разных степеней деформации

Стадия	Al/Mg			Al/Ti			Al/Cu		
	$\varepsilon_p$	$\sigma/\sigma_0$	$E/E_0$	$\varepsilon_p$	$\sigma/\sigma_0$	$E/E_0$	$\varepsilon_p$	$\sigma/\sigma_0$	$E/E_0$
I	0.15	1.79	0.82	0.11	2.60	1.55	0.084	0.70	0.89
II	0.19	2.58	1.3	0.157	3.30	1.63	0.14	2.80	1.48
III	0.22	3.07	1.3	0.217	4.20	1.95	0.17	3.54	1.60

### Заключение

Молекулярно-динамическое моделирование позволило на атомистическом уровне исследовать перемешивание атомов Al и Mg (Ti, Cu) в процессе одноосного сжатия комбинированного с деформацией сдвига [8, 9]. Настоящая работа представляет собой упрощение сценария, экспериментально наблюдаемого ранее для получения композитов Al/металл методом КГД. Установлено, что глубина диффузии атомов Al и атомов другого Me (Mg, Ti, Cu) зависит от приложенной деформации, а не от температуры. Наблюдается линейная зависимость между глубиной диффузии и приложенной деформацией для Al/Mg, в то время как для Al/Ti и Al/Cu эта зависимость является логарифмической.

Из испытаний на растяжение установлено, что после достижения критического уровня сжатия, значительного упрочнения пограничной области не наблюдается. Однако, чем выше приложенная деформация сдвига, тем выше прочность композитной структуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Danilenko V.N., Korznikova G.F., Zhilyaev A.P., Sergeev S.N., Khalikova G.R., Khisamov R.Kh., Nazarov K.S., Kiekkuzhina L.U., Mulyukov R.R. Effect of annealing on the structure and phase composition of Al-Cu laminated metal-matrix composites produced by shear deformation under pressure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 447 P. 012 - 021.
2. Korznikova G.F., Mulyukov R.R., Zhilyaev A.M., Danilenko V.N., Khisamov R.Kh., Nazarov K.S., Sergeyev S.N., Khalikova G.R., Kabirov R.R. Al-Cu layered composites fabricated by deformation // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 2053. P. 030-028.
3. Danilenko V.N., Sergeev S.N., J.A. Baimova, Korznikova G.F., Nazarov K.S., Khisamov R.Kh., Glezer A.M., Mulyukov R.R. An approach for fabrication of Al-Cu composite by high pressure torsion // Materials Letters. 2019. V. 236. P. 51-55.

4. Mulyukov R.R., Nazarov A.A., Imayev R.M. Current achievements on superplasticity and related phenomena at the Institute for Metals Superplasticity Problems // *Letters on Materials*. 2018. V.8. P. 510-516.
5. Liu, X.-Y., Ohotnicky, P.P., Adams, J.B., Rohrer, C.L., Hyland, R.W.: Anisotropic surface segregation in AlMg alloys // *Surface Science*. 1997. V. 373. P. 357–370.
6. Zope, R.R., Mishin, Y.: Interatomic potentials for atomistic simulations of the Ti-Al system // *Physical Review B*. 2003. V. 68(2). P.024102.
7. Cai, J., Ye, Y.Y.: Simple analytical embedded-atom-potential model including a long-range force for FCC metals and their alloys // *Physical Review B*. 1996. V. 54. P.8398–8410.
8. Polyakova P.V., Baimova J.A. Molecular dynamics simulation of diffusion in Mg-Al system under pressure // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 1008 012052
9. Polyakova, P.V., Pukhacheva, J.A., Shcherbinin, S.A., Baimova, J.A., Mulyukov, R.R.: Fabrication of magnesium-aluminum composites under high-pressure torsion: Atomistic simulation // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. P. 6801.

Я. Н. САВИНА, Р. Р. ВАЛИЕВ  
*Savina12@liveinternet.ru*

*Уфимский государственный авиационный технический университет  
Башкирский государственный университет*

## МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ ПОКРЫТИЕМ

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты механических испытаний конструкционных титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 в ультрамелкозернистом и крупнозернистом состояниях с осажденным на поверхность ионно-плазменным покрытием TiVN. Полученные результаты в настоящей статье свидетельствуют об эффективности комбинации УМЗ структуры в объеме материалов и ионно-плазменного защитного покрытия на поверхности для повышения надежности и долговечности изделий, изготавливаемых из титановых сплавов для современного авиадвигателестроения.

**Ключевые слова:** титановые сплавы; конструкционные титановые сплавы; интенсивная пластическая деформация; ионно-плазменные покрытия; механические свойства.

### ***Введение***

Титановые сплавы ВТ6 и ВТ8М-1 широко используются в качестве конструкционных материалов в авиационной промышленности, благодаря своим эксплуатационным свойствам [1]. Однако развитие авиадвигателестроения приводит к необходимости усовершенствования и поиска новых методов повышения надежности и долговечности, путем улучшения эксплуатационных свойств – прочность, твердость, эрозионная стойкость [2].

В настоящее время наиболее эффективным способом повышения физико-механических свойств является создание в объеме материала ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [3].

Вместе с тем детали из титановых сплавов в ГТД во время работы подвергаются износу поверхности, высоким статическим и циклическим нагрузкам, которые приводят к снижению эксплуатационных характеристик и надежности. Поэтому одновременно с повышением свойств в объеме материала, необходима защита поверхности специальными защитными покрытиями [4].

В настоящей работе рассматривается комбинированный подход к повышению эксплуатационной надежности материалов, подвергающихся эрозионному износу и высоким динамическим нагрузкам [5]. Данный подход сочетает в себе повышение удельной прочности за счет измельчения зерна в объеме металла с помощью методов интенсивной пластической деформации (ИПД), и защиту поверхности, путем напыления ионно-плазменного покрытия.

### *Материалы и методики исследований*

В качестве исследуемых материалов использовали конструкционные титановые сплавы ВТ6 и ВТ8М-1.

Для подготовки структуры к деформации прутки из сплава ВТ8М-1 подвергались предварительной термической обработке, которая представляет собой закалку в воду с температуры 940°C с последующим отжигом при температуре 700°C с охлаждением на воздухе. УМЗ состояние получено ротационной ковкой (РК), с диаметра 70 мм до 30 мм (скорость деформирования около 300 мм\*с<sup>-1</sup>). Более подробно методика проведения РК описана в работе [6].

Для получения УМЗ состояния в сплаве ВТ6 прутки подвергали равноканальному угловому прессованию (РКУП) с углом пересечения каналов 120°, по маршруту В<sub>с</sub> при температуре 650°C, число проходов равно 6 с суммарной накопленной деформацией  $\varepsilon \sim 3$ .

На поверхность образцов осаждали ионно-плазменное покрытие TiVN по методике, описанной в [7]. Осаждение покрытия на образцы проводили за один цикл в специальной вакуумно-плазменной установке ВУ-2М с планетарной схемой движения в среде азота с использованием двух катодов - Ti и V.

Образцы для механических испытаний на растяжение вырезали на токарном станке цилиндрической формы в соответствии с ГОСТ 1497-84. Механические испытания на растяжение проводили на машине «Instron-5982» со скоростью 1 мм/мин при комнатной температуре и при температуре эксплуатации 400°C на образцах с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой.

## **Результаты**

В процессе равноканального углового прессования пластинчатая структура практически полностью трансформировалась в глобулярную и образовалась УМЗ структура со средним размером  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз около 0,3 мкм и деформированная равноосная первичная  $\alpha$ -фаза.

После РК пластинчатый компонент практически полностью трансформировался в глобулярный с размером зерен первичной  $\alpha$ -фазы  $\sim 3$  мкм. Часть первичной  $\alpha$ -фазы после ротационнойковки вытянута по направлению деформации.

В процессе ионно-плазменного осаждения на поверхности титановых сплавов было сформировано покрытие TiVN с общей толщиной около 5,5 мкм. На РЭМ-изображении поперечного шлифа образца с покрытием видны два функциональных слоя TiVN толщиной 2,6-2,7 мкм и более тонкие промежуточные слои толщиной около 0,2-0,3 мкм на границе “подложка-покрытие” и между функциональными слоями, что влияет на формирование более прочных адгезионных связей функционального слоя покрытия к подложке и между собой [8].

Результаты механических свойств титановых сплавов BT6 и BT8M-1 в УМЗ и крупнозернистом (КЗ) состояниях с ионно-плазменным покрытием TiVN при температуре 20°C и 400°C приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Результаты механических испытаний

Состояние	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
BT6 КЗ + покрытие при T=20°C	976±35	1013±37	17,3±2,0
BT6 УМЗ + покрытие при T=20°C	1342±25	1384±43	9,7±1,0
BT6 КЗ + покрытие при T=400°C	638±50	732±16	19,6±4,0
BT6 УМЗ + покрытие при T=400°C	846±47	939±59	25,9±3,0
BT8M-1 КЗ + покрытие при T=20°C	964±8	1019±36	12,5±1,0
BT8M-1 УМЗ + покрытие при T=20°C	1185±40	1274±71	6,8±1,0
BT8M-1 КЗ + покрытие при T=400°C	681±28	802±51	14,0±2,0
BT8M-1 УМЗ + покрытие при T=400°C	885±4	973±42	3,5±0,4

На рисунке 1 приведена зависимость напряжения от относительного удлинения образцов титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 с КЗ и УМЗ структурой. Механические испытания образцов из сплава ВТ6 в УМЗ состоянии с ионно-плазменным покрытием при комнатной температуре показали, что предел прочности достигает 1384 МПа, это на 37% выше КЗ сплава (1013 МПа). Механические испытания образцов из сплава ВТ8М-1 при комнатной температуре и при температуре 400°С показали, что предел прочности образцов с УМЗ структурой и покрытием достигает 1274 МПа и 973 МПа.

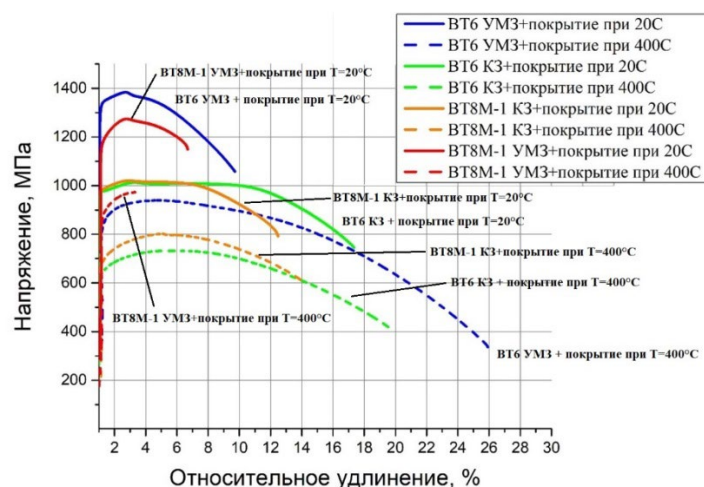


Рис. 1. Кривые растяжения образцов сплавов ВТ6 и ВТ8М-1

с ионно-плазменным покрытием TiVN с УМЗ и КЗ структурой при 20°С и 400°С

Как известно [9], пластическая деформация материалов происходит в приповерхностных слоях с формированием дислокационной субструктуры и дефектов. Повышение предела прочности образцов с УМЗ структурой и ионно-плазменным покрытием возникает вследствие образования упрочненного приповерхностного слоя, который является «барьером» для выхода дефектов на поверхность материала, и перераспределения нагрузки между поверхностными и внутренними объемами металла, что приводит к изменению механических свойств.

### *Заключение*

В данной работе экспериментально доказано, что повышение эксплуатационных механических характеристик может быть достигнуто путем комбинации

УМЗ структуры методами ИПД и осаждения ионно-плазменного покрытия на поверхность.

### ***Благодарность***

*Авторы благодарят за финансовую поддержку в ходе данной работы государственное задание на выполнение научных исследований лабораториями (приказ MN-8/1356 от 20.09.2021).*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. А.А. Илин, В.А. Колачев, I.S. Polkin. "Titanium Alloys. Composition, Structure, Properties". Reference book. Moscow, VILS-MATI, 2009 - 520 pages.
2. Климов В. Н., Козлов Д. М. "Современные авиационные конструкционные сплавы" //Самара: Изд-во Самарского университета. – 2017.
3. Валиев Р. З., Лэнгдон Т. Д., Жилиев А. П. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения. – 2017.
4. Лобанов, М. Л., Кардоина, Н. И., Россина, Н. Г., & Юровских, А. С., "Защитные покрытия: учебное пособие". – 2014.
5. Semenova, I. P., Valiev, R. Z., Smyslov, A. M., Pesin, M. V., & Langdon, T. G. (2021). "Advanced Materials for Mechanical Engineering: Ultrafine-Grained Alloys with Multilayer Coatings. Advanced Engineering Materials", 2100145.
6. Modina, I. M., Polyakov, A. V., Dyakonov, G. S., Yakovleva, T. V., Raab, A. G., & Semenova, I. P., "Peculiarities of microstructure and mechanical behavior of VT8M-1 alloy processed by rotary swaging" //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Т. 461. – №. 1. – С. 012056.
7. Selivanov, K. S., Smyslov, A. M., Dyblenko, Y. M., & Semenova, I. P., "Erosive wear behavior of Ti/Ti (V, Zr) N multilayered PVD coatings for Ti-6Al-4V alloy" //Wear, 2019. – Т. 418. – С. 160-166.
8. Valiev, R. R., Selivanov, K. S., Modina, I. M., Dyblenko, Y. M., Semenova, I. P., & Valiev, R. Z., "Architecture and Increased Adhesive Strength of Vacuum-Plasma Coating on Ultrafine-Grained Titanium Alloy" //Advanced Engineering Materials, 2020, Т. 22. – №. 10. – С. 2000121.
9. Wang C. T. et al. Indentation and scratch testing of DLC-Zr coatings on ultrafine-grained titanium processed by high-pressure torsion //Wear, 2013. – Т. 306. – №. 1-2. – С. 304-310.

Э. И. УСМАНОВ, Л. Р. РЕЗЯПОВА

*usm4nov-emil@yandex.ru, luiza.rezyapova.97@mail.ru, rovaliev@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук Р. Р. ВАЛИЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ ТИТАНА GRADE 4, ПОДВЕРГНУТОГО КОМБИНИРОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

**Аннотация.** В настоящей работе исследуется влияние различных комбинаций деформационно-термических обработок на структуру и прочностные свойства технически чистого титана Grade 4. Деформационную обработку проводили методом интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК). Термическую обработку проводили посредством отжига при различных температурных и временных режимах. По результатам исследования определено, что обработка технически чистого титана Grade 4 используя комбинированный режим: ИПДК + отжиг 700 °С + ИПДК + отжиг 350 °С позволяет сформировать в нем ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру с рекордными показателями прочности ( $\sigma_b \approx 1500$  МПа) и значительной пластичностью ( $\varepsilon \approx 9,5$  %).

**Ключевые слова:** титан Grade 4, ИПДК, термическая обработка, микроструктура, механические свойства.

### ***Введение***

В настоящее время технически чистый титан Grade 4 является весьма перспективным материалом для медицинских применений при изготовлении имплантатов, так как не содержит вредных для организма легирующих элементов. В тоже время повышение его прочностных характеристик является приоритетной задачей для создания имплантатов улучшенной геометрии, наряду с повышенной остеоинтеграцией [1].

Известно, что прочность металлов и сплавов может быть существенно повышена за счет формирования в их объеме ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры используя методы интенсивной пластической деформации (ИПД), наиболее популярными из которых являются равноканальное угловое прессование (РКУП) и интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) [2].

Измельчение структуры титана Grade 4 до УМЗ состоянием методами ИПД позволяет значительно повысить его прочность, величина которой достигает уровня высоколегированных титановых сплавов. Однако при этом, наблюдается



значительное снижение пластичности материала [3]. В связи с этим, актуальной задачей остается поиск новых режимов деформационно-термических обработок, которые позволили бы сформировать в технически чистом титане высокопрочное структурное состояние с повышенной пластичностью.

Целью настоящей работы является исследование влияния различных комбинаций деформационно-термических обработок на структуру и механическое поведение технически чистого титана Grade 4.

### ***Материал и методики исследования***

В качестве материала для исследований использовали технически чистый титан марки Grade 4 (состав, вес. %: Fe – 0,5; O – 0,4; C – 0,08; N – 0,05; H<sub>2</sub> – 0,015; Ti – основа) в виде прутковых горячекатаных заготовок, изготовленных на ВСМПО, г. Верхняя Салда.

Из полученных прутков изготовили образцы диаметром 12 мм и толщиной 6 мм, которые в дальнейшем подвергли ИПДК на установке «СКРУДЖ-200» при удельном сжимающем давлении 6 ГПа с целью формирования в них УМЗ структуры. Скорость вращения подвижного бойка при ИПДК составляла 0,2 об/мин. В результате получили образцы в виде дисков с УМЗ структурой диаметром 20 мм и толщиной около 1 мм.

Термическую обработку проводили в муфельной печи «Nabertherm» при различных температурных и временных режимах с последующим охлаждением на воздухе.

Для комбинированной деформационно-термической обработки применяли режим: 5 оборотов ИПДК + отжиг при температуре 700 °С в течении 30 мин. + 5 оборотов ИПДК + отжиг при температуре 350 °С в течении 30 мин.

Исследование микроструктуры образцов проводили с помощью оптического микроскопа «Olympus GX53» и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) «JEOL JEM-2100», работающего при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Механические испытания на растяжение проводили на малых образцах при комнатной температуре на испытательной машине «Instron 5982» со скоростью деформации  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

## Результаты и обсуждение

На рис. 1а представлена исходная микроструктура образца Grade 4, в которой наблюдается однородная структура с вытянутыми зернами, средний размер которых составляет около  $10 \pm 2$  мкм.

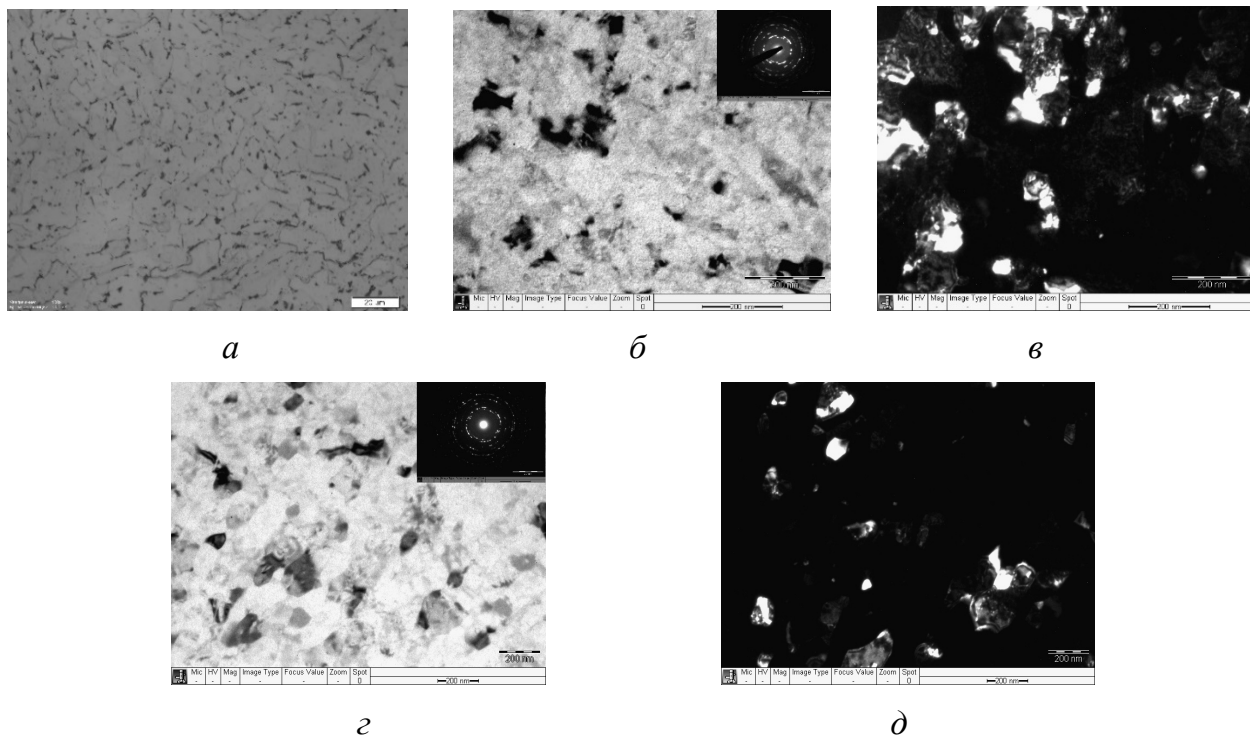


Рис. 1. Микроструктура титана Grade 4 в различных состояниях:

*а* – в состоянии поставки (ОМ); *б* – после ИПДК (светлопольное изображение ПЭМ);  
*в* – после ИПДК (темнопольное изображение ПЭМ); *г* – после  
ИПДК+700+ИПДК+350 (светлопольное изображение ПЭМ);  
*д* – после ИПДК+700+ИПДК+350 (темнопольное изображение ПЭМ)

После деформационной обработки методом ИПДК 10 оборотов при комнатной температуре, в титане Grade 4 формируется однородная по сечению ультрамелкозернистая структура с высокой плотностью дефектов (рис. 1б, в). Средний размер зерен деформированного образца достигает  $120 \pm 30$  нм.

Термическая обработка при  $700$  °С в течение 30 минут после деформации методом ИПДК, привела к развитию процессов рекристаллизации и увеличения среднего размера зерен до  $5 \pm 1$  мкм. С более подробным описанием структуры после данной обработки можно ознакомиться в нашей работе [4].

Повторная обработка методом ИПДК привела к формированию УМЗ структуры, аналогичной состоянию после первого этапа деформационной обработки методом ИПДК.

Последующий отжиг при 350 °С был направлен на снижение внутренних напряжений в материале, образованных после холодной деформации, при этом заметного роста зерен во время отжига выявлено не было. Средний размер зерен составил около  $120 \pm 40$  нм (рис. 1г, д). При данной температуре происходят процессы возврата неравновесных границ и упорядочение дефектной структуры без существенного роста зерен.

На рисунке 2 представлены инженерные зависимости напряжения течения от степени деформации при одноосном растяжении образцов.

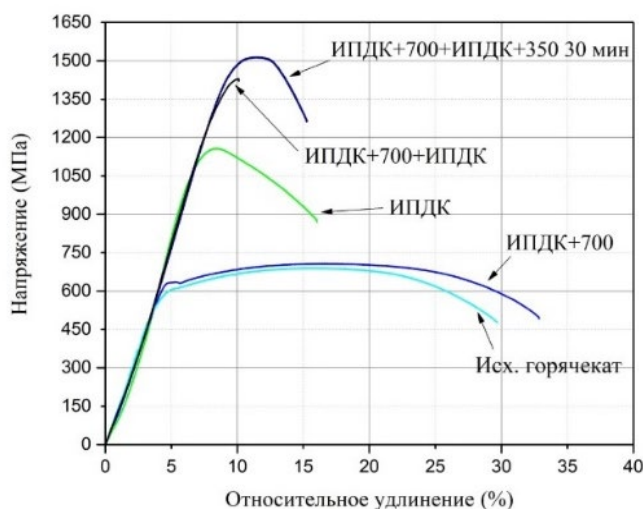


Рис. 2. Кривые зависимости напряжения течения от степени деформации титана Grade 4 в различных состояниях

В исходном состоянии характер кривой типичен для материалов, полученных горячей прокаткой. После достижения предела текучести наблюдается постепенный рост напряжения течения до максимальных значений с последующим снижением, вызванным локализацией деформации. После ИПДК наблюдается уменьшение участка равномерной деформации на кривой, существенный рост предела текучести и прочности со снижением пластичности. Высокотемпературный отжиг образцов в состоянии после ИПДК приводит к развитию рекристаллизации и полному нивелированию эффекта упрочнения от формирования УМЗ структуры и дефектов кристаллической решетки. Повторное ИПДК приводит к резкому росту прочности материала, и значительной потере пластичности до  $\epsilon=0,9$  %. Однако последующий отжиг при температуре 350 °С приводит к увеличению пластичности, за счет снижения внутренних напряже-

ний, с сохранением высокой прочности. Сводные данные по изменению механических свойств представлены в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства титана Grade 4 в различных структурных состояниях

Состояние	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\varepsilon$ , %
Горячекатаное	500±40	680±10	23,9±1,4
ИПДК	1020±10	1170±10	8,9±1,2
ИПДК+700	600±10	720±10	30,8±2,0
ИПДК+700+ИПДК	1200±40	1340±20	0,9±0,4
ИПДК+700+ИПДК+350	1340±20	1510±30	9,5±2,0

### **Заключение**

По результатам проведенного исследования установлено, что комбинированная деформационно-термическая обработка технически чистого титана Grade 4: ИПДК + отжиг 700 °С + ИПДК + отжиг 350 °С позволяет сформировать в нем УМЗ состояние с прочностными характеристиками близкими к рекордным ( $\sigma_B \approx 1500$  МПа), с сохранением при этом значительной пластичности ( $\varepsilon \approx 9,5$  %). Очевидно, такие прочностные показатели связаны с формированием в данном материале УМЗ структуры, используя высокоэффективный деформационный метод ИПДК и со снижением внутренних напряжений, за счет низкотемпературного отжига при 350 °С в течении 30 минут.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Valiev R.Z., Sabirov I., Zemtsova E.G., Parfenov E.V., Dluhoš L., Lowe T.C. Nanostructured commercially pure titanium for development of miniaturized biomedical implants // Titanium in Medical and Dental Applications. Woodhead Publishing. 2018. P. 393–417.
2. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk nanostructured materials: Fundamentals and applications // NJ: TMS-Wiley: Hoboken. 2014. 456 p. (Валиев Р.З., Жилияев А.П., Лэнгдон Т.Дж. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения // СПб.: Эко-Вектор. 2017. 479 с.)
3. Valiev R. Z., Estrin Y., Horita Z. et al. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later. JOM 68, 1216–1226 (2016).
4. Резяпова Л.Р., Валиев Р.Р., Ситдииков В.Д., Валиев Р.З. Исследование выделений вторых фаз в наноструктурном технически чистом титане // Письма о материалах. 2021. Т. 11, № 3. С. 345–350.

Д. Д. ФЕДОТОВА  
*dariafedotowa@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. М. Ю. МУРАШКИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Fe ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ, ПОЛУЧЕННОГО РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ ЛИТЬЯ**

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования физико-механических свойств сплавов Al-1,7Fe (вес. %), полученных разными методами литья, после деформационной обработки (ДО) методом равноканального углового прессования (РКУП) с последующей холодной прокаткой (ХП). Исходные заготовки сплавов были получены литьем в графитовую изложницу и непрерывным литьем в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). Установлено, что заготовки сплава, полученные литьем в ЭМК после ДО демонстрирует наиболее привлекательный уровень физико-механических свойств для практического использования в электротехнике. Предел прочности образцов составил 300 МПа, относительное удлинение до разрушения 27.5% при электропроводности 51.3% IACS.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав Al-Fe; литье в электромагнитный кристаллизатор; деформационная обработка; равноканальное угловое прессование; холодная прокатка; механические свойства; электропроводность.

В настоящее время отмечается значительный интерес к расширению области применения алюминиевых сплавов систем Al-Mg-Si, Al-Zr, Al-Fe и Al-PЗМ в электротехнике из-за их меньшего веса и низкой стоимости в сравнении проводниками на основе меди [1, 2]. Основной проблемой успешного замещения меди алюминием является заметно более низкие характеристики прочности последних. В недавних исследованиях было продемонстрировано, что одним из эффективных подходов, позволяющих значительно увеличить прочность сплавов на основе алюминия, является формирование в них ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры содержащей наноразмерные частицы вторых фаз [3, 4]. Как правило получение таких УМЗ сплавов обеспечивает применение деформационной обработки (ДО), включающей методы интенсивной пластической деформации (ИПД).

Целью данной работы являлось изучение возможности достижения высокой прочности и хорошей электропроводности в сплаве системы Al-Fe полученном разными методами литья за счет использования ДО, включающей равноканальное угловое прессование (РКУП) и холодную прокатку.

В качестве материала исследования использовали сплав Al-1.7Fe (вес. %) с содержанием примесей не более 0.2 вес. %. Первая партия исходных заготовок в виде слитков диаметром 25 мм и длиной 200 мм (Рис. 1а) была получена традиционным методом литья в графитовую изложницу (скорость охлаждения составляла около 20 К/с) группой проф. Белова Н.А. на кафедре обработки металлов давлением НИТУ МИСиС (г. Москва). Перед РКУП, для придания необходимой геометрии, литые заготовки подвергли прокатке на лабораторном 2-х валковом реверсивном стане фирмы HANKOOK M-TECH INDUSTRIES (Южная Корея). Прокатку заготовок осуществляли до диаметра 11 мм за 6 технологических переходов. Вторая партия заготовок сплава в виде прутков диаметром 11 мм (Рис. 1б) была получена с использованием метода непрерывного литья в электромагнитном кристаллизаторе (ЭМК) (скорость кристаллизации около  $10^3$  К/с) группой проф. Тимофеева В.Н. в Сибирском федеральном университете (г. Красноярск).

На первом этапе ДО исходные заготовки сплава подвергли 4 циклам РКУП при комнатной температуре по режиму Вс (с поворотом вокруг оси на  $90^\circ$  после каждого цикла). Угол сопряжения каналов в оснастке для РКУП составил 120 град. На втором этапе ДО, получены после РКУП заготовки квадратного сечения  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup> длиной 60 мм (Рис. 1в) подвергли холодной прокатке (ХП) на ~85 %.

На рис. 2 представлена микроструктура сплава Al-1,7Fe в исходном состоянии – после литья в графитовую изложницу (Рис. 2а) и литья в ЭМК (Рис. 2б). Она представляет собой смесь алюминия и алюминидов железа, закристаллизованных в виде корсета. Интерметаллидные частицы достаточно равномерно распределены в алюминиевой матрице. Размер ячейки образованной интерметаллидами в заготовках сплава, полученного литьем в графитовую изложницу, составляет  $17 \pm 5$  мкм. Объемная доля интерметаллидных частиц составляет  $10,0 \pm 1,9$  %. Средний размер ячейки составляет  $1,7 \pm 0,4$  мкм, а объемная доля интерметаллидных частиц  $12,2 \pm 1,9$  %.

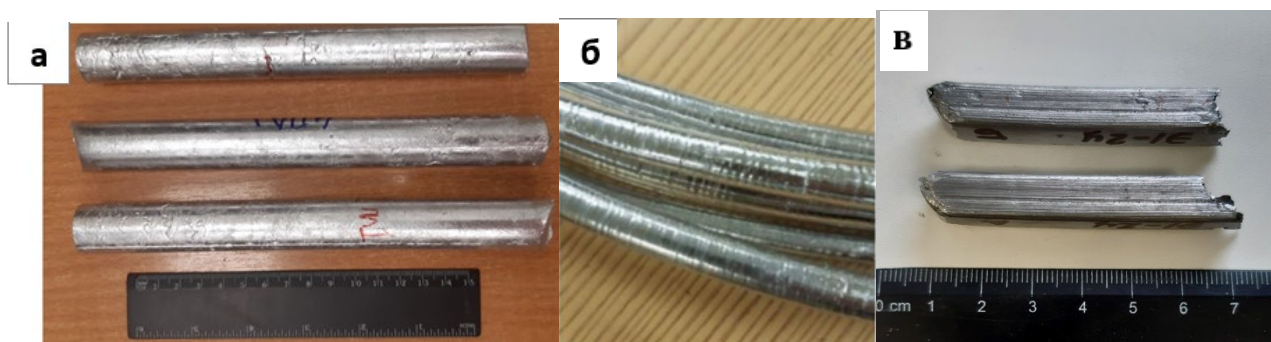


Рис. 1. Внешний вид заготовок сплава Al-1.7Fe полученных:  
*а – литьем в графитовую изложницу; б – непрерывным литьем в ЭМК;*  
*в – после обработки методом РКУП*

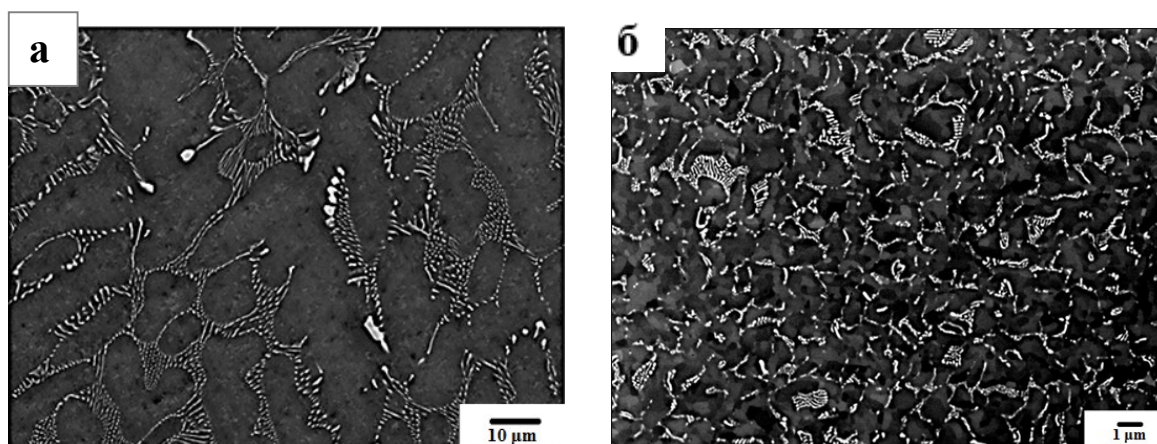


Рис. 2. Микроструктура сплава Al-1.7Fe, РЭМ:  
*а – литого образца; б – ЭМК образца*

За счет значительно более высокой скорости кристаллизации исходная микроструктура заготовок, полученных литьем в ЭМК, позволила сформировать в алюминиевой матрице более высокодисперсные интерметаллидные соединения алюминидов железа, в отличие от обычных используемых методов литья. Это привело к более высокому уровню прочности в заготовках сплава Al-1.7Fe отлитых этим методом (Таблица 1).

Деформационная обработка методом РКУП заготовок сплава Al-1.7Fe, полученных обычным литьем или литьем в ЭМК, привела к повышению их прочности более чем в 2 раза (Таблица 1). Дополнительная ХП после РКУП привела к дополнительному упрочнению заготовок сплава на ~20-30%. Опираясь на результаты ранее проведенных исследований УМЗ сплавов на основе алюминия, в том числе используемых в электротехнике [3, 4], можно полагать, что после РКУП основной вклад в упрочнение, в соответствии с соотношением Холла-

Петча, вносит размер зерна. Также определенный вклад в уровень прочности могут внести решеточные дислокации и дисперсные частицы алюминидов железа. Дополнительное упрочнение после ХП может быть вызвано в первую очередь дополнительным повышением плотности дислокаций.

Электропроводность заготовок сплавов Al-1.7Fe, полученных разными методами литья после обработки РКУП и ХП, отличается незначительно. Подробно взаимосвязь «микроструктура-свойства», с привлечением методов электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа будет изучена в дальнейшем.

Таблица 1

Физико-механические свойства сплава Al-1.7Fe

Обработка	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_6$ , МПа	$\delta$ , %	$\omega$ , МСм/м	IACS, %
Литой	40±7	105±4	18,3±0,5	30,36±0,26	52,2±0,5
РКУП 4 цикла	179±8	201±4	9,6±0,2	30,27±0,34	52,2±0,6
РКУП+ХП	220±4	257±1	15,9±3,3	30,93±0,19	53,3±0,4
ЭМК	82±5	153±3	21,1±1,8	49,6±0,6	49,6±0,6
РКУП 4 цикла	245±8	260±4	17,5±0,2	48,5±0,2	48,5±0,2
РКУП+ХП	275±11	300±13	27,5±1,6	51,3±0,1	51,3±0,1

### Заключение

В результате проведенного исследования было изучено влияние метода литья на механические свойства и электропроводность заготовок сплава системы Al-Fe с содержанием железа 1.7 вес. %, подвергнутых равноканальному угловому прессованию (РКУП) и холодной прокатке (ХП).

Установили, что использование литья в ЭМК позволяет получить в алюминиевой матрице высокодисперсные интерметаллидные соединения алюминидов железа, в отличие от обычного литья в графитовую изложницу, что обеспечивает более высокую прочность литых заготовок.

Показано, что двухэтапная ДО, включающая РКУП и ХП приводит к достижению высокой прочности (предел прочности 300 МПа) и хорошей электропроводности (51,3 % IACS) в заготовках сплава Al-1.7Fe полученных методом



непрерывного литья в ЭМК. Данный метод литья может быть рекомендован для производства сплавов системы Al-Fe электротехнического назначения.

*Данная работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 20–79-10133.*

*Исследовательская часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО УГАТУ»*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.И. Белый, Кабели и провода, Аллюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий. - 2012. - №.1 - С. 8-14.
2. И.Б. Пешков, Кабели и провода, Состояние и перспективы применения алюминия в кабельной промышленности. -2009. - №1. – С. 7-9.
3. M.Yu. Murashkin, I. Sabirov, X. Sauvage, R.Z. Valiev Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity // Journal of Materials Science (2016) 51, P.33–49.
4. М.Ю. Мурашкин Особенности микроструктуры и физико-механические свойства ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов для электротехнических применений / Мурашкина М.Ю., Орловой Т.С., Мавлютова А.М., Медведев А.Е., Бобрук // Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – 200 с. ISBN 978-5-4221-1314-9

Г. А. ФИЛИППОВА<sup>1</sup>, Я. Н. САВИНА<sup>1,2</sup>  
*galina.filin.01@mail.ru, savinal2@liveinternet.ru*  
Науч. руковод. – канд. техн. наук Р. Р. ВАЛИЕВ

<sup>1</sup> *Уфимский государственный авиационный технический университет*

<sup>2</sup> *Башкирский государственный университет*

## **ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ПСЕВДО $\beta$ -ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

**Аннотация.** В работе проведено сравнительное исследование титанового сплава ВТ35 в различных структурных состояниях, которые были получены методом интенсивной пластической деформацией (ИПД) и последующей термической обработкой старением. Установлено, что при применении метода интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) со скоростью вращения бойка 0,2 об/мин после 5 оборотов и после 10 оборотов по сравнению с исходным состоянием наблюдается повышение микротвердости на 40% и 37% соответственно. Последующее старение при 420°C и 380°C с выдержкой 5 часов, повысило значение микротвердости по сравнению с исходным состоянием в 2 раза.

**Ключевые слова:** псевдо- $\beta$ -титановые сплавы, термическая обработка, интенсивная пластическая деформация, детали крепления.

### ***Введение***

Титан и титановые сплавы добились значительного прогресса в промышленном использовании благодаря своим ключевым преимуществам - высокой удельной прочности, низкой скорости коррозии и жаростойкости, по сравнению с другими промышленными металлами и сплавами [1].

Авиационная и космическая промышленности являются крупнейшими потребителями титановой продукции, благодаря высокому соотношению прочности к весу и способности титановых сплавов работать при высоких температурах. Обычно титановые сплавы применяются в конструкциях авиационных реактивных двигателей, для изготовления деталей самолетов, газотурбинных двигателей.

Немаловажная роль отводится деталям крепления. Эти изделия должны сочетать в себе высокую удельную прочность, сопротивление коррозии и др. Из всех титановых сплавов наиболее предпочтительными для изготовления деталей крепления являются сплавы псевдо- $\beta$ -класса, такие как ВТ35 [2].

Возможность холодной деформации ВТ35 обеспечивает дополнительные экономические преимущества для применения в тонколистовой металлургии, например, в качестве облицовки композитных конструкций для использования на сверхзвуковых самолетах [3].

Перспективы развития авиационной техники в настоящее время связаны с развитием новых технологических приемов, которые позволят повысить прочностные характеристики уже имеющихся металлических материалов, обеспечивая более длительный срок эксплуатации силовых элементов конструкций. В частности, к таким приемам относятся методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [4] в сочетании с последующей термической обработкой (ТО), которые позволяют значительно повысить прочностные и усталостные характеристики металлов и сплавов.

Целью данной работы является сравнительное исследование титанового сплава ВТ35 в различных структурных состояниях, которые были получены методом ИПД и последующей термической обработкой старением.

### *Материал и методы исследования*

В качестве материала исследования был использован  $\beta$ -титановый сплав ВТ35. Химический состав сплава показан в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав сплава ВТ35, вес. %.

Ti	Al	V	Cr	Sn	Mo	Zr
основа	2,7%	14,5%	2,8%	2,8%	1,0%	0,9 %

Ультрамелкозернистая (УМЗ) структура в сплаве была получена методом интенсивной пластической деформацией кручением (ИПДК) на установке «СКРУДЖ-200» при удельном сжимающем давлении 6 ГПа. Скорость вращения бойка составляла 0,2 об/мин. В результате были получены образцы в виде диска 20 мм в диаметре и толщиной 1 мм.

Полученные в результате деформации образцы подвергали упрочняющей термической обработке, заключающейся в старении. Термическую обработку (старение) проводили в печи «Nabertherm» в среде воздуха. По проведенному анализу литературы [5-7] были выбраны следующие режимы термообработки: 380°C и 420°C 5 часов. Степень упрочнения материала оценивали по изменению микротвердости.

## Результаты

На рис. 1 приведен график изменения микротвердости исследуемого сплава ВТ35 по диаметру образцов. Представленные результаты свидетельствуют о том, что формирование УМЗ структуры методом ИПДК ведет к значительному повышению микротвердости. Однако микротвердость по диаметру образцов неоднородна, что характерно для этого метода обработки. Наиболее высокий уровень микротвердости наблюдается на периферии, а в центре образца она снижается, что связано с особенностью метода ИПДК, материал деформируется неоднородно по радиусу, вследствие чего зерна, удаленные от центра деформируются больше.

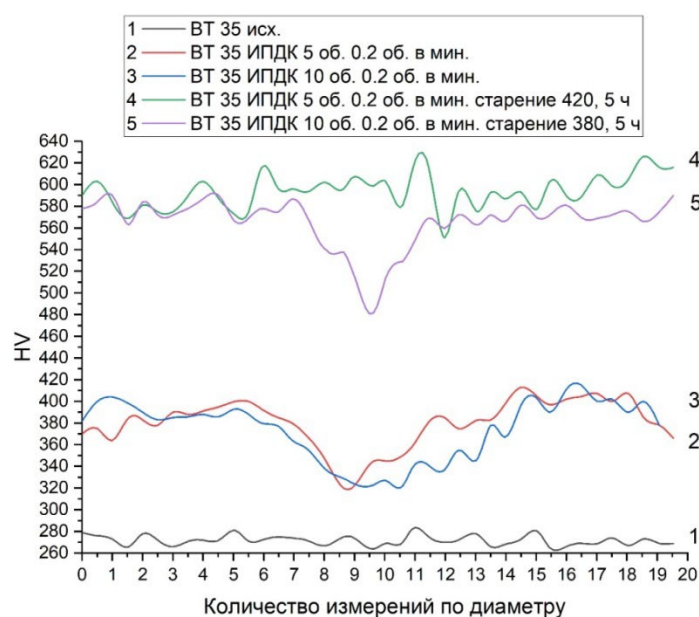


Рис. 1. График изменения микротвердости сплава ВТ35 по диаметру образцов

После проведения старения наблюдается зависимость микротвердости от температуры старения. Распад  $\beta$ -фазы в процессе старения при 380°C происходит с меньшей скоростью, чем при 420°C, так как при этих температурах замедлена диффузия атомов.

Таблица 2

Результаты измерения микротвердости сплава ВТ35

Состояние	Среднее значение микротвердости, HV
Исходное крупнозернистое	272±5
ИПДК 5 об.	380±22
ИПДК 10 об.	373±27
ИПДК 5 об. + старение 420°C, 5ч	593±15
ИПДК 10 об. + старение 380°C, 5ч	565±20

По результатам измерения микротвердости титанового сплава ВТ35 после ИПДК наблюдается повышение на 40% после 5 оборотов и на 37% после 10 оборотов по сравнению с исходным состоянием. Последующее старение при 420°C и 380°C с выдержкой 5 часов позволило повысить значение микротвердости по сравнению с исходным состоянием почти в 2 раза (Таблица 2).

### ***Заключение***

В данной работе рассмотрели влияние интенсивной пластической деформации кручением титанового сплава ВТ35 с последующим старением на микротвердость. По сравнению с исходным состоянием микротвердость после 5 и 10 оборотов ИПДК повысилась на 40% и 37% соответственно, что связано с выполнением закона Холла-Петча для исследованного материала. Уменьшение размера зерна приводит к увеличению микротвердости, поскольку увеличивается общая протяженность границ зерен, которые являются препятствием для миграции дислокаций. Последующее старение повысило микротвердость почти в 2 раза, вероятно вследствие распада метастабильной  $\beta$ -фазы с образованием более стабильных дисперсных частиц  $\alpha$ -фазы при старении.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. А. Г. Илларионов, А. А. Попов / Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.
2. Колачев Б.А. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники / Б.А. Колачев; под редакцией А.Г. Братухина. –М.: Изд-во МАИ, 2001. –412 с.
3. Kazanjian SM, Starke Jr EA. Effects of microstructural modification on fatigue crack growth resistance of Ti–15V–3Al–3Sn–3Cr. *Int J Fatigue* 1999;21:S127–35
4. Horita Z, Langdon TG. *Mater Sci Eng A* 2005; 410-411:422.
5. E.V. Naydenkin, I.P. Mishin, V.A. Oborin, A.I. Manisheva, Effect of combined rolling with subsequent aging on the structure, mechanical and fatigue properties of  $\beta$  titanium alloy, *Materials Letters*, Volume 300, 2021,
6. R. Santhosh, M. Geetha, V.K. Saxena, M. Nageswararao, Studies on single and duplex aging of metastable beta titanium alloy Ti–15V–3Cr–3Al–3Sn, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 605, 2014, Pages 222-229
7. Антипов А.И., Моисеев В.Н., Модер Н.Н. Упрочнение титанового сплава при старении// *МиТОМ*. 1996. № 12. с. 522–526.

М. А. ШИШКУНОВА

*shishkunomasha@gmail.com*

Науч. руковод. – Д. А. АКСЕНОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СПЛАВА МА2**

**Аннотация.** Работа направлена на изучение влияния интенсивной пластической деформации и самостоятельного ультразвукового воздействия на коррозионную стойкость сплава системы Mg-Al-Zn. Установлено, что в разных коррозионных средах (соляная кислота, хлорид натрия) скорость коррозии образцов после ИПД и ультразвукового воздействия различна. При этом ультразвуковое воздействие воздействует на границы зерен таким образом, что они не становятся преимущественными местами зарождения коррозии на начальных этапах.

**Ключевые слова:** магниевые сплавы, ИПД, РКУП, редуцирование, ультразвуковая обработка, коррозионная стойкость.

Магниевые сплавы применяют в автомобильной промышленности, в аэрокосмической промышленности, в текстильном машиностроении [1]. Конкретно из сплава МА2 изготавливают прессованные полуфабрикаты, поковки и штамповки. Однако магний и его сплавы характеризуются низкой прочностью и коррозионной стойкостью. Обозначенные недостатки существенно ограничивают сферы применения магния и его сплавов. Поэтому актуальной задачей является поиск дополнительных возможностей модификации магниевых сплавов для создания контролируемой коррозии, а также увеличение прочности магния и его сплавов, например, методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [2]. Тем не менее, отмечается увеличение скорости коррозии магниевых материалов после деформационной обработки. В работе [3] указано, что коррозия имеет питтинговый характер и развивается преимущественно на дефектах кристаллической решетки. Также большой вклад в развитие коррозии вносят границы зерен. Они являются областями повышенной неравновесности структуры, тем более после деформационной обработки, следовательно, могут приводить к ускорению процессов коррозии металлов [4, 5]. Для того, чтобы снизить неравновесность

системы можно применять ультразвуковую обработку материала [6]. При самостоятельном воздействии ультразвуковых колебаний на образец наблюдается увеличение концентрации вакансий [7] и плотности дислокаций [8, 9] в обрабатываемых материалах.

Объектом исследования данной работы является сплав состава Mg-5.1 Al-2.5 Zn (вес. %). Деформирование исходных заготовок осуществлялось путем совмещения в одной операции процессов редуцирования и равноканального углового прессования (РКУП) при температуре 350°C. Затем эти образцы были подвергнуты объемной ультразвуковой обработке (УЗО).

Структурные исследования проводились при помощи светового микроскопа «OLYMPUS GX51» и растрового микроскопа JSM6490. Коррозионные испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9.908-85. В качестве коррозионной среды использовались концентрированная соляная кислота HCl комнатной температуры и 0,9% раствор хлорида натрия NaCl при температуре 37°C. Образцы выдерживались в кислоте в течение 2 минут, в хлориде натрия – 3 минут. Измерения массы проводились на аналитических весах AR2140.

В исходном состоянии в материале наблюдается крупнозернистая структура со средним размером зерна  $100 \pm 20$  мкм (рис.1).

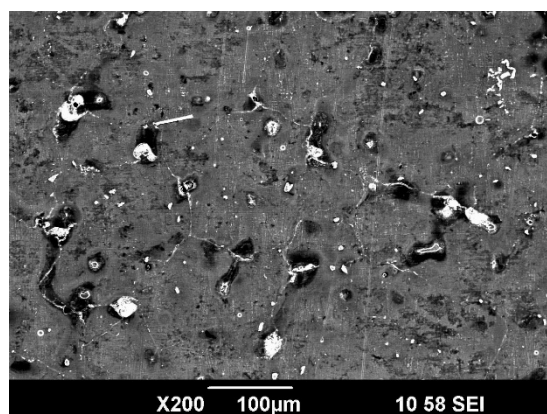


Рис. 1. Структура сплава Mg-5.1 Al-2.5 Zn в исходном состоянии

Деформация исходных заготовок проводилась по совмещенной схеме, включающей редуцирование и последующее РКУП (редуцирование + РКУП) при температуре 350°C, что привело к формированию структуры бимодального

типа. Наблюдались как крупные деформированные зерна с размерами 10-20 мкм, так и мелкие зерна с размерами 1-2 мкм, образовавшиеся, скорее всего, в процессе рекристаллизации.

Исследования по коррозионной стойкости образцов сплава в исходном, деформированном и подвергнутом УЗО состояниях в соляной кислоте показали, что наиболее быстро под действием коррозии разрушается образец после редуцирования + РКУП. На рисунке 2 представлены структуры поверхности образцов после двух минут выдержки в концентрированной соляной кислоте HCl. Следует отметить, что на поверхности образца после интенсивной пластической деформации наблюдаются коррозионные области с шириной, близкой к размеру сформированных зерен, а в исходном и подвергнутом УЗО образцах наблюдается протравливание преимущественно в тонких границах.

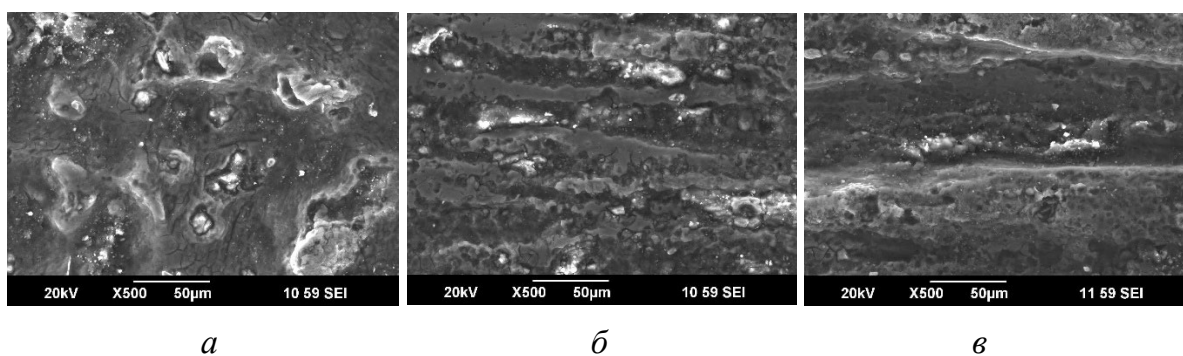


Рис. 2. Структура образцов сплава Mg-5.1 Al-2.5 Zn в исходном (а), деформированном (б), подвергнутом УЗО (в) состояниях после коррозии в соляной кислоте

Анализ результатов коррозионных исследований в соляной кислоте показал, что для исходного состояния глубинный показатель составляет 50 мм/год, деформированного состояния – 144 мм/год, а после УЗО он близок к показателю исходного состояния – 60 мм/год.

На рисунке 3 представлены структуры поверхности образцов после трех минут выдержки в 0,9% растворе хлорида натрия. Видно, что на исходном образце и после УЗО присутствует питтинговая коррозия, средний размер питтингов –  $10 \pm 2$  мкм и  $5 \pm 1$  мкм соответственно, а у деформированного образца размер коррозионных участков больше, до  $50 \pm 10$  мкм в поперечном сечении. Таким образом, коррозионная стойкость сплава Mg-5.1 Al-2.5 Zn в растворе хлорида натрия в первые 3 минуты коррозии выше у образца после УЗО.



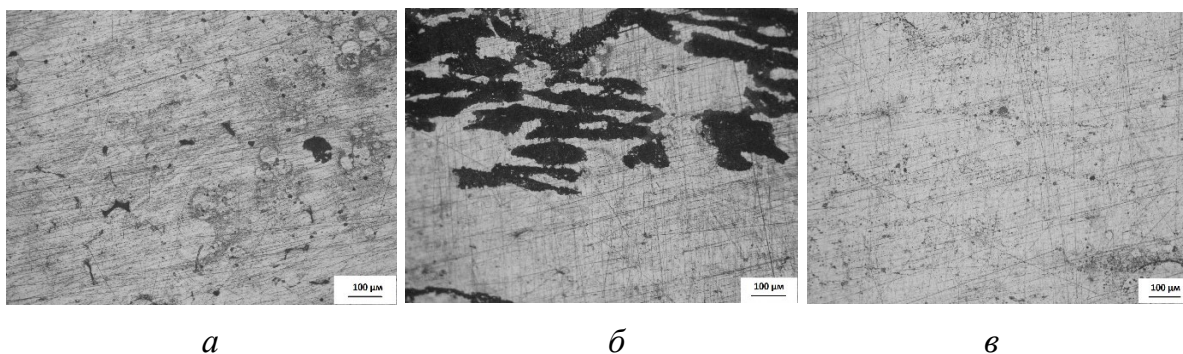


Рис. 3. Структура образцов сплава Mg-5.1 Al-2.5 Zn в исходном (а), деформированном (б), подвергнутом УЗО (в) состояниях после коррозии в 0,9% растворе хлорида натрия

В результате работы установлено, что скорость деградации сплава Mg-5.1 Al-2.5 Zn в соляной кислоте и 0,9% растворе хлорида натрия отличается в зависимости от вида обработки.

В соляной кислоте наблюдается уменьшение коррозионной стойкости сплава после деформации, тогда как последующее УЗО приводит к ее увеличению практически в два раза, что сравнимо с исходным состоянием.

В растворе хлорида натрия наблюдается питтинговая коррозия, причем средний размер коррозионных участков в 5 раз больше у образца после деформации и в 2 раза меньше у образца после УЗО по сравнению с исходным состоянием.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М.Б. Альтман, А.П. Антипова, В.А. Блохина и др. Магниевые сплавы I. Справочник. Металловедение магния и его сплавов. Области применения. – М.: Металлургия, 1978. – 234 с.
2. Figueiredo R. B., Langdon T. G. Achieving microstructural refinement in magnesium alloys through severe plastic deformation //Materials transactions. – 2009. – Т. 50. – №. 1. – С. 111-116.
3. Merson D. et al. On the corrosion of ZK60 magnesium alloy after severe plastic deformation // Letters on Materials. – 2017. – Т. 7. – №. 4. – С. 421-427.
4. Ahmadkhaniha D. et al. Corrosion behavior of severely plastic deformed magnesium based alloys: A review //Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2017. – Т. 53. – №. 5. – С. 439-448.
5. Shen Z. et al. Electrochemical corrosion behavior of ultrafine-grained Mg alloy ZE41A through severe plastic deformation //Procedia Engineering. – 2012. – Т. 27. – С. 1817-1822.
6. Мухаметгалина А. А. и др. Влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и микротвердость ультрамелкозернистого никеля, полученного методом кручения под высоким давлением //Письма о материалах. – 2017. – Т. 7. – №. 2. – С. 85-90.
7. Белостоцкий В. Ф., Полоцкий И. Г. Влияние ультразвукового облучения на концентрацию вакансий и дислокаций в никеле //ФММ. – 1973. – Т. 35. – №. 3. – С. 660.
8. Pratt J. E. Dislocation substructure in strain-cycled copper as influenced by temperature //Acta Metallurgica. – 1967. – Т. 15. – №. 2. – С. 319-327.
9. Kemsley D. S., Paterson M. S. The influence of strain amplitude on the work hardening of copper crystals in alternating tension and compression //Acta Metallurgica. 1960. Т. 8. – №. 7. С. 453-467.

УДК 620

Ю. Р. ЮЗЛЕКАЕВА  
*iuzlekaeva@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Е. Б. МЕДВЕДЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА НВЗ

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу исследования электроэрозионной стойкости никелевого сплава НВЗ в сравнении с другими сплавами на никелевой основе. Показано, что никелевый сплав, содержащий вольфрам, обладает повышенной электроэрозионной стойкостью по сравнению с другими рассмотренными сплавами.

**Ключевые слова:** свеча зажигания, электрический разряд, межэлектродный промежуток, электроэрозионная стойкость, электроэрозионный износ.

Искровая свеча зажигания является одним из наиболее ответственных элементов системы зажигания двигателя внутреннего сгорания. Надежная работа свечи зажигания, определяемая бесперебойностью искрообразования, зависит прежде всего от стабильности размера межэлектродного промежутка свечи, то есть от износа бокового и центрального электродов свечи [1].

В настоящее время в связи с существенным ростом пробивных напряжений в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания, достигающих 25 кВ и более, возникает потребность в применении для электродов свечей зажигания таких материалов, которые бы наряду с высокими жаростойкостью и стойкостью к газовой эрозии обладали бы еще и повышенной стойкостью к электроэрозионному изнашиванию [2].

Основными материалами, применяемыми в настоящее время для изготовления электродов свечей зажигания, являются никелевые безвольфрамовые сплавы НП-1, НП-2, Х15Н60, Х20Н80, НМц5 и др. [3].

Однако, хорошо известно [4], что вольфрам обладает одной из самых высоких электроэрозионных стойкостей. В связи с чем, можно предположить, что никелевый сплав, легированный вольфрамом, может иметь более высокую электроэрозионную стойкость по сравнению с безвольфрамовыми сплавами.

Исходя из вышеизложенного, целью работы является исследование электроэрозионной стойкости никелевого сплава НВ-3 в сравнении с другими сплавами, применяемыми для изготовления электродов свечей зажигания.

В качестве материалов для исследований применялись: сплав никеля с 3% вольфрама НВ3, никель технический полуфабрикатный НП-2, сплав никеля с 5% марганца НМц5 и сплав никеля с 20% хрома Х20Н80.

Все образцы для исследований изготавливались из стандартных проволок диаметром 5,0 мм нормальной точности. Диаметр образцов составлял 5 мм, высота – 10 мм. Торцы образцов, подвергаемые электроэрозионному воздействию, перед испытаниями проходили полирование в соответствии с методикой подготовки микрошлифов для микроструктурного анализа.

Для сокращения длительности испытаний исследования проводили на станке для электроэрозионной обработки модели 4Л721Ф1 [5]. Анодом служил образец, катодом – медный электрод. Испытания проводились на следующих режимах: частота импульсов  $f=440$  Гц; напряжение источника питания  $U_{xx}=270$  В; напряжение горения дуги  $U_d=22\dots24$  В; ток короткого замыкания  $I_{к.з.}=1$  А; длительность импульса  $\tau=1$  минута; скважность  $q=4,5$ . Схема электроэрозионной обработки показана на рис. 1.

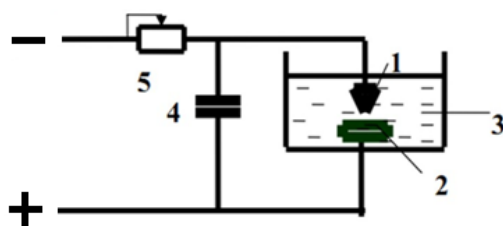


Рис. 1. Схема электроэрозионной обработки материалов:  
1 – электрод-катод (инструмент), 2 – обрабатываемый образец (анод), 3 – жидкая среда, в которой производится разряд, 4 – конденсатор, 5 – реостат

Величина электроэрозионного износа (г/разряд) определялась по следующей формуле:

$$I = \frac{m_0 - m_k}{N}$$

где  $m_0$  – начальная масса образца (г);  $m_k$  – конечная масса образца после электроэрозионной обработки (г);  $N$  – количество электрических разрядов.

Образцы перед испытаниями и после испытаний взвешивались на аналитических весах Mettler Toledo XP 26 с точностью 0,000001 г. Исследование микроструктуры обработанной поверхности проводилось на сканирующем электронном микроскопе JSM-6490LV. Средний размер эрозионной лунки определялся с использованием программы «Grain Size».

На рис. 2, 3, 4 и 5 показана микроструктура поверхности образцов из рассмотренных сплавов, подвергнутых электроэрозионному воздействию. Неправильная геометрическая форма лунок объясняется тем, что электрические разряды распределяются по поверхности образца хаотично.

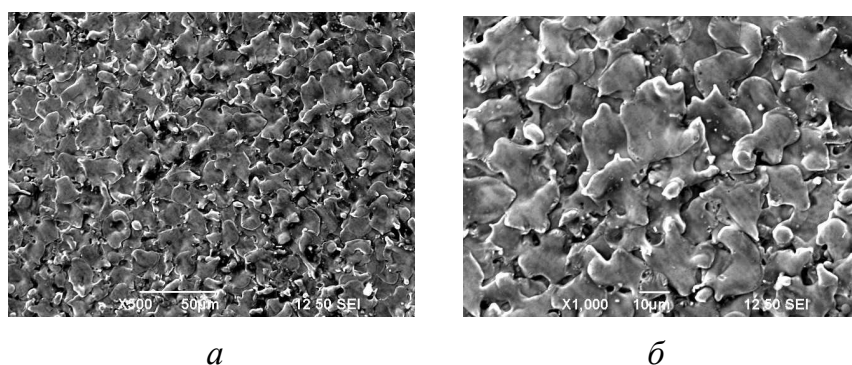


Рис. 2. Микроструктура поверхности образцов из НВ3 после электроэрозионной обработки, *a* –  $\times 500$ ; *б* –  $\times 1000$ . Средний размер эрозионных лунок составляет 14 мкм

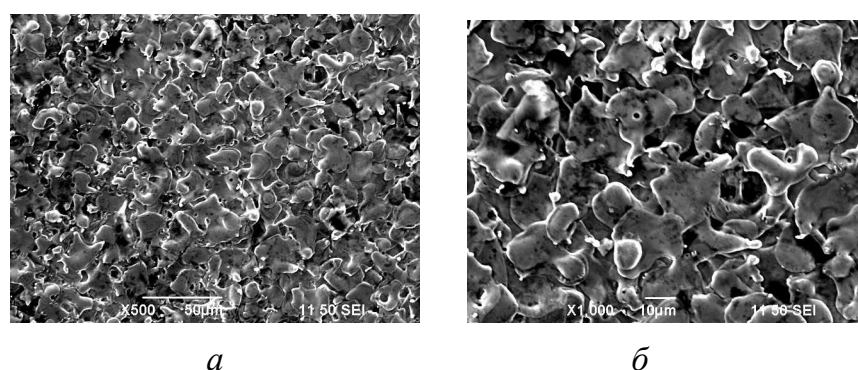


Рис. 3. Микроструктура поверхности образцов из НП-2 после электроэрозионной обработки, *a* –  $\times 500$ ; *б* –  $\times 1000$ . Средний размер эрозионных лунок составляет 17 мкм

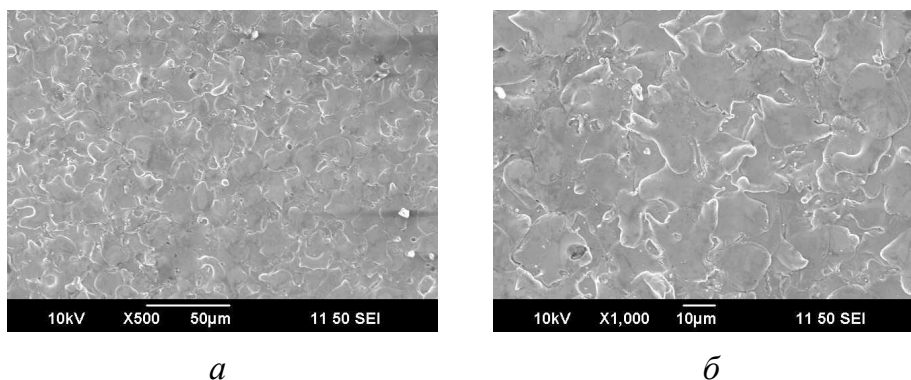


Рис. 4. Микроструктура поверхности образцов из НМц5, после электроэрозионной обработки, а – х500; б – х1000. Средний размер эрозионных лунок составляет 20 мкм

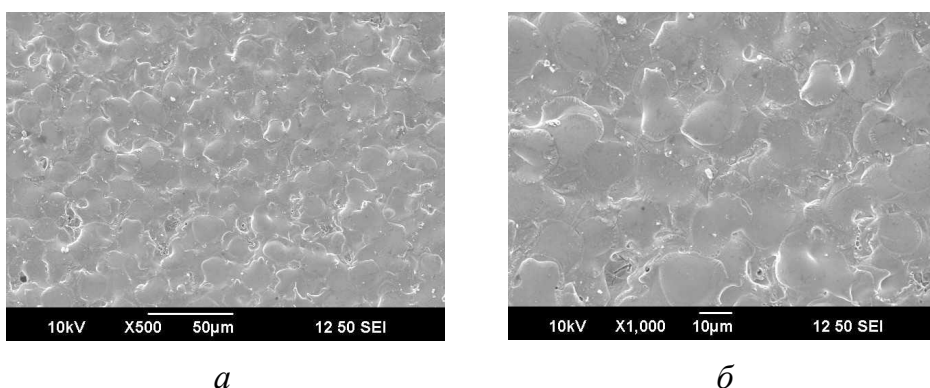


Рис. 5. Микроструктура поверхности образцов из X20H80 после электроэрозионной обработки, а – х500; б – х1000. Средний размер эрозионных лунок составляет 23 мкм

На рис. 6 показана гистограмма распределения размеров лунок для различных материалов после их эрозионной обработки.

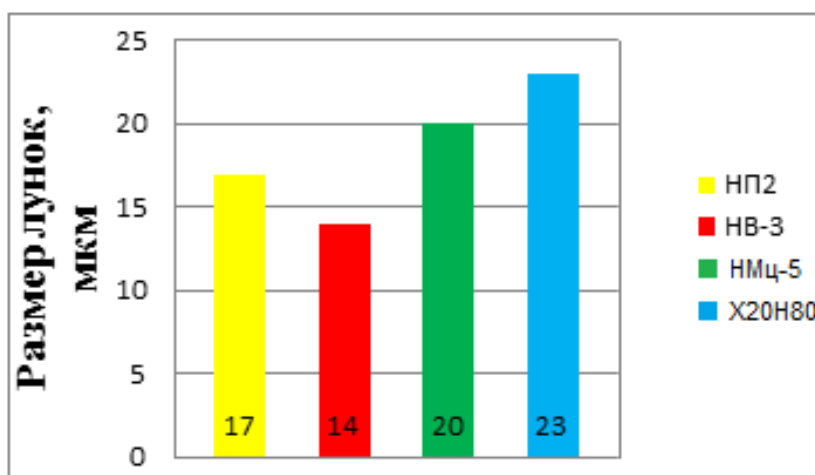


Рис. 6. Гистограмма распределения размеров эрозионных лунок после обработки материалов

Из рисунка видно, что наименьший размер лунок наблюдается у сплава НВ3, что предполагает и наименьший его износ.

На следующем рис. 7 представлена гистограмма распределения рассчитанных по представленной выше формуле величин износа образцов после электроэрозионной обработки. Диаграмма показывает, что наименьшим износом (3,07 г/разряд) обладает сплав НВ3.

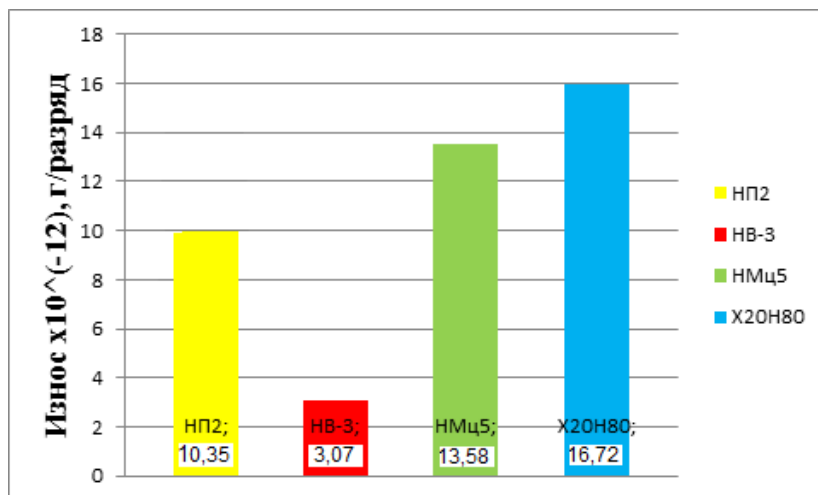


Рис. 7.

### **Выводы**

1. Никелевый сплав НВ3 с содержанием вольфрама 3% имеет наибольшую электроэрозионную стойкость по сравнению с другими рассмотренными безвольфрамовыми сплавами.

2. Корреляция значений параметров, представленных на рис. 6 и 7, показывает, что программа «Grain Size» может быть использована также для определения среднего размера эрозионных лунок на поверхности металла после электроэрозионной обработки.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Басс Б.А. Свечи зажигания. Краткий справочник/ Б.А. Басс. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2002.–120 с.
2. Резник А.М. Электрооборудование автомобилей / А.М. Резник. М.:Транспорт, 1988. – 185 с.
3. Металлы и сплавы. Справочник /под ред. Ю.П. Солнцева. – СПб.: Профessional, Мир и Семья, 2003. – 1016 с.
4. Исследование переноса и коррозии металлов под действием электрических разрядов / Труды Всесоюзн. эл. техн. инст., вып. 34, М.: ВСЭИ, 1978. – 251 с.
5. В.С. Коваленко. Электрофизические и электрохимические методы обработки / В.С. Коваленко, Киев: Вища школа, 1975. – 236 с.

## СЕКЦИЯ 2.2 МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

УДК 006.91

Э. Р. АБДУЛЛИНА

*abdullina1209@mail.ru*

Науч. руковод. – доцент А. Н. ИЛЬИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

### СТЕНД ДЛЯ ПОВЕРКИ И КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ ЭЛМЕТРО-СПУ-А-20

**Аннотация.** В статье рассмотрены назначение, характеристики и принцип действия стенда для поверки и калибровки средств измерений уровня ЭЛМЕТРО-СПУ-А-20.

**Ключевые слова:** поверка; стенд; уровнемер.

В последние годы, особенно в свете произошедших событий, актуальным является вопрос импортозамещения изделий, в том числе, касающихся обеспечения единства измерений.

Одной из задач в области метрологии является реализация поверки (калибровки, градуировки и испытаний) уровнемеров различного принципа действия посредством применения специализированного оборудования отечественного производства, удовлетворяющего требованиям НТД [ГОСТ 8.477–82 «Государственная поверочная схема для средств измерений уровня жидкости», ГОСТ 8.660–09 «Государственная система обеспечения единства измерений. Уровнемеры промышленного применения. Методика поверки»].

Таким оборудованием является Стенд ЭлМетро-СПУ-А-20, который предназначен для передачи единицы уровня (длины) методом имитации изменения уровня жидкости в диапазоне до 20 м. Он может применяться для поверки (калибровки, градуировки и испытаний) уровнемеров различного принципа действия: радарных, рефлекс-радарных, магнитострикционных, волноводных, поплавковых, буйковых, ультразвуковых и радиоволновых уровнемеров в соответствии с ГОСТ 8.321-2013, а также других устройств измерения уровня жидкости,

для которых возможно использование данного стенда, согласно действующей ГПС.

Стенд рекомендуется использовать в поверочных лабораториях государственных метрологических служб, метрологических службах юридических лиц и на промышленных предприятиях.

По согласованию с заказчиком на этапе технического предложения производится определение целесообразности применения входящих в стенд приспособлений (например: приспособления для поверки волноводных, коаксиальных, буйковых, поплавковых уровнемеров, оборудование для поверки радиоволновых уровнемеров и т.д.). При ограниченном и определенном составе приборов, некоторые приспособления в составе стенда могут отсутствовать.

Таблица 1

Основные метрологические и технические характеристики стенда

Тип стенда	Метод воспроизведения единицы длины (уровня)	Тип средства измерения	Дискретность воспроизведения единицы длины (уровня), мм	Предел допускаемой абсолютной погрешности стенда при воспроизведении единицы длины (уровня), мм	Максимальный верхний предел диапазона воспроизведения единицы длины (уровня), м
А	Имитация изменения уровня жидкости	Преобразователь линейных перемещений	0,05	$\pm 0,3$	30

Конструктивно стенд состоит из расположенной горизонтально линейной части, неподвижного основания, подвижного основания, имитирующего изменение уровня и системы измерения и сбора информации.

Неподвижное основание представляет собой установочную плиту, предназначенную для жесткого крепления различных типов средств измерений уровня. В комплект поставки стенда входит набор установочных плит, каждая из которых может быть установлена на неподвижное основание, что позволяет производить поверку датчиков уровня различных типоразмеров.



В установочной плите стенда имеются пазы для установки комплекта вставок или фланца, с помощью которых средство измерений устанавливается на неподвижном основании. Конструкция стенда обеспечивает установку уровнемера таким образом, чтобы плоскость установочного фланца уровнемера была перпендикулярна линейной части стенда.

Линейная часть стенда предназначена для перемещения подвижной части стенда на заданное расстояние и состоит из прецизионного алюминиевого профиля и прецизионных направляющих рельсов, закрепленными на регулируемых опорах. Прецизионные направляющие рельсы предназначены для плавного перемещения подвижной части. Преобразование вращательного движения электропривода в поступательное движение каретки происходит с помощью реечной зубчатой передачи.

Подвижная часть стенда представляет собой узел, который перемещается по линейной части стенда с помощью шариковых направляющих блоков, обеспечивающих точность и плавность хода, в автоматизированном режиме.

Определение местоположения подвижной части стенда относительно неподвижного основания происходит с помощью прецизионного инкрементного преобразователя длины, состоящего из прецизионной магнитной ленты с нанесенными на нее ферромагнитными штрихами и считывающей головки.

Перемещение подвижной части и ее точное позиционирование осуществляется с помощью управляющего ПО. Перемещением подвижной части стенда можно также управлять через панель управления.

Система управления стендом обеспечивает сбор информации и отображение ее на экране персонального компьютера, а также осуществляет управление подвижной частью стенда для исполнений стенда, содержащих преобразователь линейных перемещений. В качестве средства измерения выступает система, состоящая из прецизионного инкрементного преобразователя длины и аппаратно-программного интерфейса стенда.

Программное обеспечение, установленное на персональный компьютер (ПК) системы, осуществляет общее управление стендом, автоматический сбор и математическую обработку результатов измерений, а также архивирование результатов измерений. Обмен данными между ПК и подвижной частью стенда производится по протоколу ModBus/RTU. Программное обеспечение обработки измеренных данных построено по модульному принципу.

В программном обеспечении предусмотрена возможность хранения в архивной базе данных результатов испытаний и информации о поверяемом уровнемере с привязкой к заводскому номеру. В программном обеспечении предусмотрена возможность хранения в архивной базе данных результатов испытаний и информации о поверяемом уровнемере с привязкой к заводскому номеру.

В сравнении с зарубежным аналогичным оборудованием Стенд ЭлМетро-СПУ-А-20 имеет подобные характеристики и не уступает им. Таким образом, в свете вышеизложенного, рассмотренная установка может быть рекомендована к применению на отечественных предприятиях для решения соответствующих метрологических задач.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.477–82 «Государственная поверочная схема для средств измерений уровня жидкости».
2. ГОСТ 8.660–09 «Государственная система обеспечения единства измерений. Уровеньмеры промышленного применения. Методика поверки»
3. Описание типа средства измерений. Стенд для поверки и калибровки средств измерений уровня ЭЛМЕТРО СПУ
4. Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 № 102-ФЗ.
5. 3140.000.00 РЭ «Стенд для поверки и калибровки средств измерения уровня ЭЛМЕТРО СПУ. Руководство по эксплуатации».

УДК 006.91

А. Р. БАДАМШИНА

*Alina\_231001@mail.ru*

Науч. руковод. – ст. преп. А. Ф. САФИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЕРКИ ДАТЧИКОВ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

**Аннотация.** В статье рассмотрены характеристики, принцип работы и методика поверки установок для поверки датчиков крутящего момента моделей 21428 и 21429.

**Ключевые слова:** поверка, крутящий момент, датчики, установки для поверки.

Средства измерений утвержденного типа, то есть внесенные в Государственный реестр средств измерений, подлежат поверке. И следовательно, не могут эксплуатироваться без проведения данной процедуры и занесения информации о ней в систему ФГИС «Аршин». Одними из таких средств измерений являются установки для поверки датчиков крутящего момента.

В рамках данной работы рассматривается поверка установок для поверки датчиков крутящего момента моделей 21428 и 21429, предназначенные для воспроизведения крутящего момента силы при проведении поверки и калибровки датчиков крутящего момента, а также при использовании в эксплуатирующих организациях для контроля датчиков крутящего момента. Что является важным в условиях работы организации.

Принцип действия установок основан на воспроизведении единицы крутящего момента силы посредством приложения силы, действующей на определенном расстоянии относительно центра вращения поверяемого (калибруемого) датчика крутящего момента (далее - датчика). Крутящий момент силы воспроизводится с помощью рычагов и грузов соответствующей массы. Установки выполнены в виде с накладываемыми на грузоприемные площадки грузами. Рычаги симметричны относительно центра вращения датчика, на обоих концах рычагов имеются приспособления для крепления тросов. Диаметры применяемых для подвешивания грузов тросов рассчитаны и изготовлены с высокой точностью и

их изменение при нагружении не оказывает влияния на размер плеча действия силы.

Воспроизведение крутящего момента силы происходит следующим образом: рычаг с помощью специальных присоединительных квадратов, расположенных в центре вращения рычага, крепится к жестко закрепленному на плоской поверхности поверяемому (калибруемому) датчику крутящего момента силы. Далее к правому или левому концу рычага (для воспроизведения крутящего момента силы по часовой, или против часовой стрелки, соответственно), через тросы (металлические стержни) подвешиваются грузы. Изменение воспроизводимых значений крутящего момента силы достигается за счет изменения массы и количества подвешиваемых грузов в пределах диапазонов воспроизведения.

Установки для поверки датчиков крутящего момента моделей 21428 и 21429 обладают основными метрологическими и техническими характеристиками, представленными в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Метрологические характеристики установок для поверки датчиков крутящего момента

Наименование характеристики	Значение	
	21429	21428
Модель	21429	21428
Диапазон воспроизведения крутящего момента, Н*м	от 0,5 до 60,0	от 10 до 1500
Допускаемое отклонение массы грузов от номинального значения <sup>1)</sup> , %	±0,01	
Расстояние от центра вращения рычага до осевой оинии подвеса (длина рычага), мм	250,000±0,025	1000,0±0,1
Пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения единицы крутящего момента силы, %	±0,02	
<sup>1)</sup> - номинальное значение массы грузов для создания соответствующих усилий рассчитывается с учетом плотности воздуха 1,2 кг/м <sup>3</sup> , условной плотности материала грузов 8000 кг/м <sup>3</sup> и ускорения силы тяжести в месте эксплуатации, определенного с погрешностью не более ±0,0001 м/с <sup>2</sup>		

Основные технические характеристики установок  
для поверки датчиков крутящего момента

Наименование характеристики	Значение	
Модель	21429	21428
Размер присоединительного квадрата, мм (дюйм)	6,3 (1/4) 9,53 (3/8)	12,7 (1/2) 19,05 (3/4) 25,4 (1)
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм, не более	600x100x788	2248x248x1610
Масса, кг, не более	2,8	25,42
Диапазон рабочих температур, °С	от +18 до +22	

Проведение поверки установок для поверки датчиков крутящего момента базируется на следующих основных правовых и нормативных документах:

– Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 N 102-ФЗ

– Свидетельство №65684 об утверждении типа средств измерений «Описание типа средства измерений»

– МП АПМ 55-14. Установки для поверки датчиков крутящего момента моделей 21400, 21421, 21427, 21428, 21429, 21842. Методика поверки.

Поверка установок проводится в соответствии с требованиями документа МП АПМ 55-14 и включает в себя следующие этапы:

1) Внешний осмотр

При внешнем осмотре должно быть установлено:

– наличие маркировки/товарного знака изготовителя, тип и заводской номер установки;

– отсутствие механических повреждений и дефектов, влияющих на работоспособность установки;

– соответствие комплектности установки технической документации изготовителя.

2) Опробование

Опробование установок проводят в соответствии с требованиями Руководства по эксплуатации на установки.

### 3) Определение метрологических характеристик

1. Определение расстояния от центра вращения рычага до осевой линии подвеса (действительной длины рычага) и его отклонения от номинального значения

#### 1.1 Подготовка к измерениям

При подготовке к измерениям необходимо выполнить следующие операции:

– установить рычаг поверяемой установки на столе трехкоординатной измерительной машины вдоль оси У;

– на измерительной головке машины смонтировать комбинацию из 2 щупов с удлинителями по 100 мм каждый. Для измерений выбрать сферические наконечники диаметром 2 мм;

– откалибровать машину по калибровочной мере;

#### 1.2 Проведение измерений

Измерения длины рычага проводят в следующей последовательности:

– для установок измеряют не менее трех раз полную длину рычага в направлении вдоль продольной оси рычага, затем в направлении с отклонением от продольной оси на  $8^\circ$ , сначала по часовой стрелке, затем на  $8^\circ$  против часовой стрелки, производя математическое выравнивание оси рычага с помощью программного обеспечения машины;

Измерения диаметра троса, предназначенного для подвеса грузов, проводят с помощью микрометра не менее чем в пяти точках, равномерно распределенных по всей длине троса.

#### 1.3 Обработка результатов измерений

Действительную длину рычага для каждого направления измерений рассчитывают по формуле:

$$L_{\text{изм}} = \frac{L_{\text{рыч.изм}}}{2} + \frac{D_{\text{тросизм}}}{2}, \quad (1)$$

где  $L_{\text{рыч.изм}}$  - среднее арифметическое результатов измерений полной длины рычага, мм;

$D_{\text{тросизм}}$  - среднее арифметическое результатов измерений диаметра троса, мм.

Отклонения действительной длины рычага от номинального значения для каждого направления измерений ( $\Delta_i$ ) рассчитывают по формуле

$$\Delta_i = L_{\text{ном}} - L_{\text{изм}}, \quad (2)$$

Значение отклонения, рассчитанное для каждого направления измерений, не должно превышать значений, указанных в методике поверки.

Относительное отклонение действительной длины рычага от номинального значения для поверяемой установки рассчитывают по формуле

$$\delta_{L_{\text{ном}}} = \frac{\Delta_{L_0}}{L_{\text{ном}}} * 100\% \quad (3)$$

## 2. Определение массы грузов и ее отклонения от номинального значения

Определение массы грузов проводят в следующей последовательности:

– определяют массу грузов в соответствии с приложением ДА «Методика поверки гирь» ГОСТ OIML R 111-1-2009 «Гири классов E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3, M3. Часть 1: Метрологические и технические требования» с помощью компараторов и наборов гирь класса точности F2.

– для грузов 0,5 Н; 1,0 Н; 2,0 Н; 2,5 Н; 4,0 Н; 4,8 Н; 7,2 Н используют гири из набора (1 - 1000) г с номинальными значениями массы, соответственно, 50 г, 100 г, 200 г, (200+50) г, (200+200) г, (200+200+50+20+10) г, (500+200+20) г и компаратор массы СС 1201;

– для грузов 10,0 Н; 12,1 Н; 20,0 Н; 24,0 Н; 48,0 Н; 50,0 Н; 100,0 Н; 222,4 Н используют гири из набора (1 - 10) кг с номинальными значениями массы, соответственно, 1 кг, (1+2+0,1) кг, 2 кг, (2+0,2+0,2) кг, (2+2+0,5+0,2+0,1) кг, 5 кг, 10 кг, (1+2+5+10) кг и компаратор массы СС 30002.

Относительное отклонение массы каждого груза от номинального значения рассчитывают по формуле:

$$\delta_m = \frac{(m_{\text{НОМ}} - m_{\text{ИЗМ}})}{m_{\text{НОМ}}} * 100\% \quad (4)$$

Значения относительного отклонений массы грузов, определенные при каждом измерении, не должны превышать  $\pm 0,01\%$ .

3. Определение относительной погрешность воспроизведения крутящего момента силы

Исходя из уравнения воспроизведения, относительную погрешность воспроизведения единицы крутящего момента силы рассчитывают по формуле

$$\delta_M = 2 * \sqrt{\delta_m^2 + \delta_{L0}^2 + \delta_g^2 + \delta_\alpha^2}. \quad (5)$$

Установки для поверки датчиков крутящего момента по результатам поверки будут признаны пригодными для применения, если все их метрологические характеристики соответствуют требованиям, установленным в методике поверки МП АПМ 55-14.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 N 102-ФЗ
2. Свидетельство №65684 об утверждении типа средств измерений «Описание типа средства измерений»
3. МП АПМ 55-14. Установки для поверки датчиков крутящего момента моделей 21400, 21421, 21427, 21428, 21429, 21842. Методика поверки.



УДК 629.7

Э. А. ВАЛЕЕВА

*ellinaavaleeva@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. хим. наук А. Т. НИГМАТУЛЛИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## АТТЕСТАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье рассмотрены документы, регламентирующие порядок проведения аттестации испытательного оборудования.

**Ключевые слова:** испытательное оборудование, цель аттестации, порядок проведения аттестации.

Аттестация испытательного оборудования – определение нормированных точностных характеристик испытательного оборудования, их соответствия требованиям нормативно-технической документации и установление пригодности этого оборудования к эксплуатации.

Основной целью аттестации испытательного оборудования является подтверждение характеристик испытательного оборудования и возможности воспроизведения условий испытаний продукции или определенных видов испытаний в заданных пределах с допускаемыми отклонениями и установление пригодности использования испытательного оборудования в соответствии с его назначением.

Основные положения и порядок проведения аттестации испытательного оборудования, а также порядок разработки программы и методики аттестации испытательного оборудования приведены в национальном стандарте

ГОСТ Р 8.568-2017. «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения».

Испытательное оборудование подвергают первичной аттестации по программе аттестации и методике аттестации до начала эксплуатации.

Основные этапы аттестации испытательного оборудования

1. Подготовка. На данной стадии подготавливают испытательное оборудование и помещение, в котором будет проходить аттестация.

К примеру, при аттестации климатической камеры размещают внутри камеры несколько датчиков температуры для снятия показаний. В помещении, как правило, не должно быть посторонних людей – только члены аттестационной комиссии и ассистенты. Перечень конкретных подготовительных и опытных работ на каждой стадии зависит от типа, наименования и модели испытательного оборудования.

2. Испытания. Экспериментальная часть составляет основной этап аттестации. Испытательное оборудование в контролируемом и безопасном режиме воспроизводит реальные условия, в которых предстоит работать проверяемому оборудованию, демонстрирует реальные значения определяемых характеристик, которые бы выдало оборудование при настоящей эксплуатации в тех же условиях.

3. Оформление. После окончания экспериментальной части на основании полученных данных представители комиссии фиксируют полученные значения в протоколе мероприятия (обязательный документ). В протоколе указывают марку и модель исследуемого испытательного оборудования, метод исследования, экспериментальные условия и снятые значения характеристик, а также персональный состав комиссии. В конце формулируется вывод о прохождении или непрохождении устройством аттестации и, соответственно, о его пригодности или непригодности к применению, а также выдается аттестат.

Ранее выданные аттестат и протокол аттестации испытательного оборудования являются действующими до проведения повторной аттестации испытательного оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутяйкин, В. Г. Технические средства для измерений, испытаний и контроля: терминология // Компетентность – 2019 - №7 с. 37.
2. ГОСТ Р 8.568-2017. «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения».
3. ГОСТ 16504-8. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения (с Изменением N 1).

УДК 661.961

М. А. ГАМАГА, К. А. САВЧУКОВ

*zeeon5@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. С. В. ЧЕРТОВСКИХ,  
ст. преп. Э. Г. БАЛЫШЕВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ВОДОРОДЕ, РАЗРАБОТКА НОВЫХ СТАНДАРТОВ**

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы и перспективы эксплуатации автомобильных транспортных средств на водородных топливных элементах.

**Ключевые слова:** водородное топливо; водородный двигатель, водородные топливные элементы, водородная энергетика, стандарты.

Одной из главных экологических угроз является глобальное потепление. За счет вредных выбросов в атмосферу (в том числе и от двигателей внутреннего сгорания) температура на планете повышается, что приведет к неминуемому таянию ледников и последующему наводнению и затоплению некоторых островов и частей континентов. Мы можем миновать данную проблему, например, путем установки качественных катализаторов для минимизирования выхлопов двигателей. Также одним из перспективных и актуальных направлений в решении экологической проблемы является частичная замена автотранспорта на топливе нефтяного происхождения с высоким содержанием углерода на автотранспорт, использующий водород как топливо. Автомобили с водородным двигателем в ближайшем будущем так и останутся единичными и крайне взрывоопасными экземплярами, за массовое производство которых не возьмется ни одна компания, пока выгоднее производить и использовать простые ДВС. Но имеется перспективное направление – это автомобильный транспорт с водородными топливными элементами. У таких автомобилей вместо топливного бака, как правило, стоят композитные баллоны с металлическими вставками, а вместо привычного нам двигателя внутреннего сгорания имеется небольшой электрохимический генератор, именуемый топливным элементом. Схема работы топливного элемента про-

ста: при соединении водорода с кислородом, образуются молекулы воды, избыточные электроны оседают на электроды, создавая электрический ток. Водород подается с баллонов под давлением, а воздух поступает с атмосферы самотеком, проходя воздушный фильтр. Получаемый электрический ток подается на электродвигатели, которые приводят в движение электромобиль. Побочным продуктом является вода.

Существуют различные способы получения водорода. На сегодняшний день наиболее дешевый и распространенный способ – это паровой риформинг, в процессе которого обессеренное углеводородное сырье (природный газ - метан) подогревается, смешивается с водяным паром и опционально подвергается конверсии перед подачей на катализаторы в запатентованной установке парового риформинга с верхним пламенем. При этом получают следующие продукты: водород, монооксид углерода (CO) и диоксид углерода (CO<sub>2</sub>). Смесь CO с паром подвергается конверсии, продуктами которой являются дополнительный водород и CO<sub>2</sub>. Затем водород отделяется путем адсорбции. Также широко известен метод получения водорода при помощи электролиза воды. Если использовать электричество, полученное ядерной энергетикой (ядерная энергетика при правильных циклах и алгоритмах энергетически чистая), то при таком производстве водорода выбросы в атмосферу будут минимальны. Иные способы получения водорода на данный момент невыгодны из-за дороговизны. Также не менее интересна идея использование энергии солнца и ветра в производстве водорода, это приведет к минимизации цены водорода. Многие считают, что получение водорода энергозатратно и, в последствии, бесполезно, при этом забывая сколько энергии и ресурсов тратится при производстве бензина и дизтоплива из нефти. Кроме всего водород является крайне взрывоопасным веществом. В любом случае производство водорода требует также дополнительной разработки новых стандартов, которые должны будут отражать не только цикл производства водорода, но и особые условия его хранения (особенно, например, сжиженного водо-

рода, т.к. сжиженный водород получается при его охлаждении до  $-253^{\circ}\text{C}$ ), транспортировки, да и чтобы заправить баллоны автомобиля потребуются иные системы газовых заправок, на которых должны действовать также новые стандарты.

Экологичность является не основным плюсом для водородного транспорта. Эксплуатация транспортных средств на водородных топливных элементах позволит снизить и шумовой фон, повысить удобство и комфорт, например, можно забыть про неприятный запах в салоне и в вашем гараже от выхлопных газов. В автомобиле с водородными топливными элементами будет присутствовать намного меньше деталей по сравнению с автомобилем с ДВС, а это означает, что конструкция получается легче. Известно, чем меньше подвижных деталей, тем меньше возможных отказов от износа таких деталей. В ДВС имеется огромное количество подвижных деталей, многие из которых работают при жестких условиях эксплуатации (высокие температура и давление, агрессивная среда и т.д.), в свою очередь переход на автомобили на водородном топливе приведет нас ждет в ближайшем будущем к более высокой надежности и безотказности в работе по износостойкости сопряжений. Также водородные топливные элементы превосходят ДВС в коэффициенте полезного действия (КПД), у ДВС КПД, как правило, не превышает 35%, а у водородных топливных элементов КПД лежит в диапазоне от 40% до 60% (с учетом энергозатрат на производство топлива). То есть авто на топливных элементах может проехать в 2 раза больше чем автомобиль на базе ДВС, на эквивалентном по энергоемкости и объему количестве бензина. Еще один плюс – транспорт на водородном топливе заправляется намного быстрее, чем сегодняшние электромобили, так, например, заправляется водородом баллон за 2 минуты, а аккумуляторы электрокара приходится заряжать по несколько часов.

Несмотря на то, что становление и развитие мирового рынка водорода связано с серьезными трудностями (стоимость производства, хранение и транспор-

тировка, специфика инфраструктуры водорода), последние научные и прикладные исследования и разработки показали, что в решении этих вопросов наблюдается явный прогресс, который может обеспечить широкое использование водорода в качестве экологически чистого источника энергии. Водородный транспорт, как и водородная энергетика, в целом, является перспективным направлением и породит множество новых рабочих мест и специальностей. Будет открыта новая ниша на мировом рынке, и есть большие перспективы в развитии транспорта. Это поможет нам уменьшить уровень загазованности в городах, а значит в долгосрочном будущем меньше влиять на глобальную энтропию. Переход на водород – это не единое решение глобальной проблемы экологии, это лишь первый шаг к открытию новых альтернативных решений. Новая ниша – разработка и эксплуатация транспортных средств на водородных топливных элементах – будет требовать разработки новых стандартов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канило П.М. Перспективы становления водородной энергетики и транспорта / П.М. Канило, К.В. Костенко // Автомобильный транспорт (Харьков). – 2008. – № 23. – С. 107–113.
2. Каменев В.Ф. Водородное топливо для автомобильных двигателей / В.Ф. Каменев, Н.А. Хрипач, Ю.К. Яркин // Автоперевозчик. — 2006. — № 3(66).
3. Мацкерле Ю. Водород и возможности его применения в автомобиле // Современный экономичный автомобиль = *Automobil s lepší účinností* / Пер. с чешск. В. Б. Иванова; Под ред. А.Р. Бенедиктова. — М.: Машиностроение, 1987. — С. 273 — 282. — 320 с.
4. Макарян И.А. Состояние и перспективы развития мировой водородной энергетики / И.А.Макарян, И.В. Седов // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2021, т. LXV, № 2. DOI: 10.6060/rcj.2021652.1.

УДК 006.91

А. А. ЗАЙЦЕВА

*tatyana-zayceva1@outlook.com*

Науч. руковод. – ст. преп. А. Ф. САФИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ПОДТВЕРЖДЕНИЕ КОМПЕТЕНТНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ НА ПРАВО ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ**

*Аннотация.* В статье рассмотрены вопросы подтверждения компетентности организации на право поверки средств измерений. Приведены этапы подтверждения компетентности, критерии аккредитации, а также документы, на основе которых проводится данная процедура.

*Ключевые слова:* подтверждение компетентности; поверка средств измерений; организация по поверке средств измерений; критерии аккредитации

Подтверждение компетентности (поддержание аккредитации) – подтверждение продолжения аккредитации в определенной области и подтверждение соответствия требованиям, утвержденным при разработке документов по системе менеджмента качества. Подтверждение компетентности, как и аккредитация является важным механизмом для обеспечения общественного доверия к надежности любых исследований, связанных с защитой окружающей среды, безопасностью и здоровьем людей. Данная процедура, проводимая применительно к поверочной лаборатории, имеет своей целью обеспечение единства измерений и общее признание результатов.

Основные вопросы проведения аккредитации изложены в следующих правовых документах:

1) ФЗ "Об обеспечении единства измерений" (№ 102-ФЗ), который рассматривает общие вопросы аккредитации в области обеспечения единства измерений;

2) ФЗ "Об аккредитации в национальной системе аккредитации" (№ 412-ФЗ). В нем указаны участники национальной системы аккредитации, представлены вопросы организации и информационного обеспечения аккредитации;

3) Приказ Минэкономразвития России от 26.10.2020 № 707 (ред. от 29.12.2021) "Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации". В данном документе приведены критерии аккредитации, а также перечень документов, подтверждающих соответствия юридических организаций критериям аккредитации.

4) Постановление правительства РФ № 2050 от 26 ноября 2021 года «Об утверждении Правил осуществления аккредитации в национальной системе аккредитации, Правил проведения процедуры подтверждения компетентности аккредитованного лица, Правил внесения изменений в сведения об аккредитованном лице».

Согласно ФЗ №412 участниками национальной системы аккредитации являются:

1) федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области аккредитации;

2) национальный орган по аккредитации;

3) общественный совет по аккредитации;

4) комиссия по апелляциям;

5) эксперты по аккредитации, технические эксперты;

6) аккредитованные лица;

7) экспертные организации.

Работа по аккредитации метрологических служб юридических лиц на право поверки средств измерений началась в России с 1994 г. С тех пор национальная система аккредитации претерпела значительные изменения. В настоящее время федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции национального органа по аккредитации, является Федеральная служба по аккредитации (Росаккредитация), которая занимается формированием единой национальной системы аккредитации, проведение аккредитации юридических



лиц и индивидуальных предпринимателей в национальной системе, осуществлением контроля за деятельностью аккредитованных лиц.

В соответствии с требованиями п. 1 ч. 1 статьи 24 №412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» аккредитованное лицо должно пройти процедуру подтверждения компетентности:

1) на протяжении первого года со дня аккредитации;

2) за период с момента предыдущего прохождения процедуры подтверждения компетентности до момента ее проведения должно пройти не менее одного раза в два года;

3) каждые пять лет со дня аккредитации;

Для прохождения процедуры подтверждения компетентности заявителям необходимо соответствовать критериям аккредитации, изложенным в Приказ Минэкономразвития России от 26.10.2020 № 707. В числе основных требований к подтверждению компетентности юридических организаций можно назвать следующие: наличие системы менеджмента качества обеспечения выполнения поверочных работ; наличие соответствующего объему предполагаемых работ и номенклатуре проверяемых средств измерений числа сотрудников, аттестованных в качестве поверителей; наличие необходимых рабочих эталонов и вспомогательного оборудования; наличие помещений, обеспечивающий необходимые условия для поверки средств измерений.

Порядок проведения подтверждения компетентности включает следующие этапы:

1) Подача заявления в национальный орган по сертификации.

Аккредитованное лицо, для получения государственной услуги по подтверждению компетентности, подает заявление через личный кабинет во ФГИС Росаккредитации. Вместе с процедурой подтверждения компетентности аккредитованное лицо вправе пройти процедуру расширения области аккредитации, изменения места осуществления деятельности, актуализации области аккредитации.

К заявлению о подтверждения компетентности юридического лица на право поверки средств измерений заявителем должны быть приложены и зафиксированы в описи копии следующих документов и сведений:

- подтверждаемая область аккредитации;
- анкета самообследования;
- копии документов, подтверждающих соответствие заявителя критериям аккредитации, установленных приказом Минэкономразвития России № 707;
- копии документов, подтверждающих полномочия лица, подписавшего заявление и прилагаемые к нему документы и сведения.

1) Создание экспертной группы. Срок – до 20 рабочих дней со дня принятия заявления о подтверждении компетентности до момента направления аккредитованному лицу информации об утверждении состава экспертной группы.

2) Проведение оценки соответствия аккредитованного лица требованиям аккредитации.

Данная процедура может быть документарной и выездной. Если компетентность подтверждается в соответствии с пунктом 3 части 1 статьи 24 Федерального закона № 412-ФЗ, а также при прохождении процедуры расширения области аккредитации, срок проведения мероприятия не должен превышать 65 рабочих дней.

Выездная оценка проводится не более 40 рабочих дней, если компетентность подтверждена согласно пунктам 1 и 2 части 1 статьи 24 Федерального закона № 412-ФЗ, а также если аккредитованный сотрудник вместе с процедурой подтверждения компетентности проходят процедуру внесения изменений в сведения об аккредитованном лице, содержащиеся в реестре аккредитованных лиц, в связи с изменениями местонахождения или мест осуществления деятельности аккредитованного лица.

3) Подготовка и принятие решения Росаккредитацией.

На основании отчета экспертной группы национальный орган по аккредитации либо выносит постановление о прохождении аккредитованным лицом

процедуры подтверждения компетентности, либо составляет для него рекомендации по исправлению выявленных недочетов и приостанавливает действие его аттестата аккредитации.

Документом, официально подтверждающим компетентность и полномочия аккредитованной метрологической службы осуществлять поверку средств измерений, является выписка из реестра аккредитованных лиц (аттестат аккредитации) – документ, формируемый в автоматическом режиме средствами федеральной государственной информационной системы в области аккредитации и удостоверяющий аккредитацию в определенной области аккредитации на момент его формирования. Информация об аккредитованной организации заносится в электронный реестр ФСА.

За деятельностью аккредитованных метрологических служб юридических лиц и индивидуальных предпринимателей осуществляется регулярный контроль со стороны Федеральной службы по аккредитации (Росаккредитации) и Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарта) и его органов.

Таким образом, организации, прошедшие процедуру подтверждения компетентности на право поверки средств измерений, подтверждают свое соответствие установленным критериям и, соответственно, свою компетентность в области обеспечения единства измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 № 102-ФЗ.
2. Федеральный закон «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» от 28.12.2013 № 412-ФЗ.
3. Приказ Минэкономразвития России от 26.10.2020 № 707 (ред. от 30.12.2020) «Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации».
4. Постановление правительства РФ № 2050 от 26 ноября 2021 года «Об утверждении Правил осуществления аккредитации в национальной системе аккредитации, Правил проведения процедуры подтверждения компетентности аккредитованного лица, Правил внесения изменений в сведения об аккредитованном лице».

УДК 006.91

Е. А. МАКЛАКОВА

*maklakatya2404@gmail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. С. В. ЧЕРТОВСКИХ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ НА ПРИМЕРЕ ПЛОТНОМЕРОВ ВИП-2М И ВИП-2МР**

*Аннотация.* Рассмотрены методы и средства измерения плотности жидкостей, а также средства поверки и калибровки измерителей плотности жидкостей.

*Ключевые слова:* метрологическое обеспечение; методы и средства измерения плотности, плотномеры.

Плотность – скалярная физическая величина, равная отношению массы вещества (тела) к занимаемому им объему:  $\rho = m/V$ . Одна из основных характеристик вещества, из которого сделано тело (табличная величина).

### ***Методы и средства измерения плотности жидкостей***

Существуют прямые и косвенные методы измерения плотности жидкостей. К прямым относят методы, основанные на законах механики жидкостей, т.к. плотность в этом случае определяют по результату действия массовых сил жидкости. Сюда относится метод измерения массы определенного объема жидкости, а также методы, использующие законы гидростатики и гидродинамики. К косвенным относятся методы, которые основаны на зависимостях между плотностью и различными физическими свойствами вещества, например, способностью поглощать ультразвуковые волны, радионуклидные излучения и т.д.

Измерители плотности жидкостей вибрационные ВИП-2М и ВИП-2МР (далее – плотномеры) предназначены для измерения плотности жидкостей (кроме эмульсий и суспензий). Область применения – лаборатории предприятий химической, нефтеперерабатывающей, фармацевтической, пищевой и других отраслей промышленности для качественного и количественного контроля при

приемке, отпуске, хранении и транспортировке жидких продуктов, а также в научных исследованиях.

Принцип действия плотномеров основан на измерении периода резонансных колебаний U-образной трубки (капилляра), заполненной исследуемой жидкостью, и последующего вычисления значения плотности этой жидкости. Значение периода колебаний капилляра является функцией плотности находящегося в нем образца жидкости, температуры, геометрических и механических характеристик. Управление плотномерами, градуировка, обработка информации и сохранение всех параметров осуществляются встроенным микроконтроллером. Пломбирование данных плотномеров не предусмотрено.

Выпускаемые модификациях плотномеров ВИП-2М и ВИП-2МР отличаются ценой единицы младшего разряда и пределом допускаемой абсолютной погрешности измерений.

### *Средства поверки и калибровки измерителей плотности жидкостей*

Государственный первичный эталон предназначен для воспроизведения, хранения единицы плотности и передачи ее размера при помощи вторичных и рабочих эталонов рабочим средствам измерений с целью обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон единицы плотности состоит из комплекса следующих средств измерений:

- эталонный стеклянный поплавок №21951 с номинальным значением плотности  $1,0200944 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;
- эталонная сфера из ситалла диаметром 90 мм №1;
- установка для гидростатического взвешивания (компаратор).

Государственный первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы плотности со среднеквадратическим отклонением результата измерений  $S$ , не превышающим  $4 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>. Неисключенная систематическая погрешность  $\Theta$  не превышает  $2,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

В качестве вторичного эталона применяют наборы тел цилиндрической формы, изготовленные из монокристалла кремния, или наборы стеклянных поплавков в диапазоне измерений от 650 до 2000 кг/м<sup>3</sup>. Вторичный эталон применяют для калибровки и поверки рабочих эталонов и высокоточных рабочих средств измерений сличением при помощи компаратора или методом косвенных измерений.

В качестве рабочих эталонов, заимствованных из других государственных поверочных схем, применяют весы эталонные в диапазоне измерений от 0 до 6 кг и гири эталонные в диапазоне измерений от  $1 \cdot 10^{-6}$  до 6 кг по ГОСТ 8.021, а также эталоны сравнения – чистые газы с номинальным значением молярной доли 99,99% по ГОСТ 8.578.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.024-2002 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений плотности.
2. ТУ 4215-016-44229117-2009 Измерители плотности жидкостей вибрационные ВИП-2М и ВИП-2МР. Технические условия с изменениями от 06.09.2017 г.
3. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. Настоящие рекомендации устанавливают основные термины и определения понятий в области метрологии.
4. Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 N 102-ФЗ.
5. ПР 50.2.006-94 ГСИ. Порядок проведения поверки средств измерений.

УДК 006.91

Э. Ф. МУФТАХОВА

*muftakhova.2000@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Э. В. САФИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

### **ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФА «ЭК12Т-01-“Р-Д”»**

**Аннотация.** В статье рассмотрены характеристики, принцип работы и методика поверки Электрокардиографа 12-канальные с регистрацией ЭКГ в ручном и автоматическом режимах миниатюрные.

**Ключевые слова:** поверка, электрокардиограф

Электрокардиограф – это специализированный высокотехнологичный аппарат, предназначенный для измерения и регистрации электромагнитных импульсов, образующихся при работе сердечной мышцы и получения электрокардиограммы – это графическая схема разности потенциалов, которые возникают при работе сердца, визуализированная на дисплее или бумаге.

Поверке подлежат средства измерения утвержденного типа. Идентификация средства измерения проводится с помощью информационного ресурса ФГИС АРШИН. Электрокардиограф «ЭК12Т-01-“Р-Д”» является средством измерения утвержденного типа (номер в госреестре 25081-03).

Электрокардиографы двенадцатиканальные с регистрацией ЭКГ в ручном и автоматическом режимах миниатюрные ЭК 12Т-01-«Р-Д» (далее по тексту – электрокардиографы) предназначены для измерения и регистрации биоэлектрических потенциалов сердца.

Принцип действия электрокардиографа – снятие биоэлектрических потенциалов сердца посредством электродов, последующие усиление, обработка и регистрация сигналов.

Таблица 1

## Метрологические и технические характеристики

Диапазон напряжений регистрируемых входных сигналов, мВ	от 0,03 до 5,0
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения напряжения в диапазонах, не более: от 0,1 до 0,5 мВ от 0,5 до 4 мВ	$\pm 15\%$ $\pm 7\%$
Нелинейность записи каждого отведения	$\pm 2\%$
Чувствительность, мм/мВ	5; 10; 20 или 40
Пределы допустимой относительной погрешности установки чувствительности, не более	$\pm 5\%$
Входной импеданс, не менее	5 МОм
Коэффициент ослабления синфазных сигналов ЭК, не менее	100000 (100 дБ)
Напряжение внутренних шумов, приведенных ко входу, не более	20 мкВ
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения интервалов времени при регистрации на бумагу в диапазоне интервалов времени от 0,1 до 1,0 сек., не более	$\pm 7\%$
Диапазон измерения ЧСС	от 30 до 225 уд/мин
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения ЧСС, не более	$\pm 1$ уд/мин
Неравномерность амплитудно-частотной характеристики $\delta_f$ : в диапазоне частот от 0,5 до 60 Гц в диапазоне частот от 60 до 75 Гц	от 90% до 105% от 70% до 105%
ЭК обеспечивает два значения постоянной времени усилительных каналов, не менее	3,2 с и $0,45 \pm 0,1$ с
Пределы допустимой относительной погрешности регистрации калибровочного сигнала, не более	5 %
Дрейф нулевой линии за время регистрации отведения, не более	1,5 мм
Питание осуществляется	
в исполнении 1:	
- от сети переменного тока, частотой, Гц напряжением, В	от 50 до 60 от 198 до 242
- напряжение питания постоянного тока бортовой сети автомобиля, В	от 10 до 16
- напряжение питания от внутреннего источника питания, В	от 6 до 8
в исполнении 2:	
- от сети переменного тока, частотой, Гц напряжением, В	от 50 до 60 от 100 до 242
- напряжение питания постоянного тока бортовой сети автомобиля, В	от 12 до 16
- напряжение питания от внутреннего источника питания, В	7,4
Потребляемая мощность, В·А, не более	30
Масса в полном комплекте поставки для исполнения 1, кг, не более	3,5
Масса в полном комплекте поставки для исполнения 2, кг, не более	4,0
Масса блока электрокардиографического, кг, не более	1,2
Габаритные размеры блока электрокардиографического исполнения 1, (д×ш×в), мм, не более	260×154×67
Габаритные размеры блока электрокардиографического исполнения 2, (д×ш×в), мм, не более	250×174×63



Поверка осуществляется в соответствии с документом Р 50.2.009-2011 «Электрокардиографы, электрокардиоскопы и электрокардиоанализаторы. Методика поверки».

Основные средства поверки: Генератор функциональный ГФ-07 (Госреестр № 12289-90).

### ***Проведение поверки и обработка результатов измерений***

Внешний осмотр

При проведении внешнего осмотра ЭКП проверяют:

- наличие ЭД [формуляр (паспорт), руководство (инструкции) по эксплуатации, методика поверки ЭКП];
- комплектность в соответствии с ЭД;
- отсутствие механических повреждений, влияющих на его работоспособность;
- наличие и прочность крепления органов управления и коммутации, четкость фиксации их положений, плавность вращения ручек органов регулировки, наличие предохранителей;
- обеспечение чистоты разъемов кабеля отведений;
- состояние лакокрасочных покрытий и четкость маркировки.

Примечание - Допускается проводить поверку ЭКП без запасных частей и принадлежностей, не влияющих на его работоспособность и на результаты поверки.

### ***Опробование***

Соединяют поверяемый ЭКП, ГФ, ПКУ согласно схеме, приведенной на рисунке 1 настоящих рекомендаций, обеспечивая качество заземления и защиту мест контактных соединений от воздействия помех. Схема соединения приборов и электрическая схема ПКУ при использовании функционального генератора ГФ-05 приведена в приложении В.

Включают поверяемый ЭКП и прогревают его в течение времени, указанного в ЭД.

При опробовании в соответствии с ЭД на ЭКП проводят следующие операции (операции по проводятся при нулевом сигнале на входах ЭКП - до включения ГФ).

При проверке действия органов управления и индикации согласно ЭД ЭКП изменяют значения чувствительности, скорости регистрации и режимы фильтрации (при наличии). Органы индикации ЭКП должны отображать установленные значения.

При проверке влияния переключения чувствительности на положение нулевой линии для всех значений чувствительности допускается изменение положения нулевой линии от положения при минимальной чувствительности не более чем на 2 мм для электрокардиографа и электрокардиоанализатора и на 10% ширины изображения для электрокардиоскопа.

При проверке регистрации собственного калибровочного сигнала ЭКП включают ГФ и прогревают его в течение времени, указанного в ЭД на ГФ.

Подают через ПКУ на входы ЭКП испытательный кардиографический сигнал "4" с размахом 2 мВ. В соответствии с ЭД поверяемого ЭКП проводят регистрацию испытательного сигнала при всех значениях чувствительности и убеждаются в наличии изображения калибровочного сигнала во всех отведениях ЭКП.

Определение возможности измерения зубцов с минимальными амплитудами (проводится при *первичной* проверке ЭКП, в ЭД которых предусмотрены такие измерения).

Таблица 2

Сигнал	Параметр малой волны r на входе ЭКП	
	Длительность, мс	Амплитуда, мкВ
7-6	12	31
7-7	17	31

Включают генератор ГФ и прогревают его в течение времени, указанного в ЭД. Определение возможности измерения зубцов с минимальными амплитудами проводят согласно схеме, приведенной на рисунке 1, при установке последовательно на выходе ГФ сигналов "7-6" и "7-7".

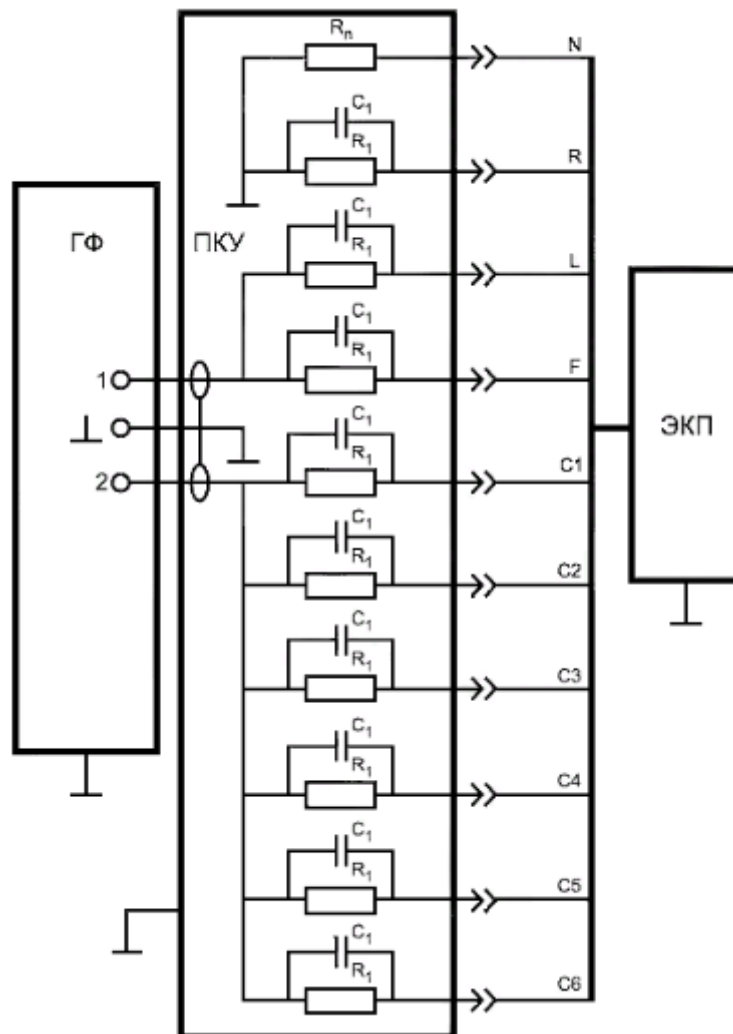


Рис. 1. Схема соединения устройств при проверке электрокардиоприборов.  
 ГФ - генератор функциональный (форма сигнала на выходе "2" генератора ГФ идентична форме на выходе "1", а напряжение в 1,667 раз больше); ПКУ - поверочное коммутационное устройство;  $51,1 \text{ кОм} \pm 2\%$ ;  $47 \text{ нФ} \pm 10\%$ ;  $100 \text{ Ом} \pm 2\%$ ;  
 ЭКП - проверяемый электрокардиоприбор

Производят регистрацию не менее 10 периодов сигнала "7-6" при выбранных на ЭКП значениях чувствительности  $20 \text{ мм/мВ}$  и скорости  $50 \text{ мм/с}$ . Аналогично производят регистрацию сигнала "7-7".

Если по сигналу "7-6" на записи зубец идентифицируется не менее чем в трех периодах сигнала (на "распечатке" при этом амплитудно-временные параметры данного зубца могут не выводиться), по сигналу "7-7" на записи четко идентифицируется зубец r во всех периодах сигнала, а на "распечатке" выводятся значения амплитудно-временных параметров данного зубца, то делают заключение о возможности измерения зубцов с минимальными амплитудами.

При невыполнении любого из требований данного раздела дальнейшую поверку прекращают.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 N 102-ФЗ
2. Свидетельство №15146 об утверждении типа средств измерений «Описание типа средства измерений»
3. ГОСТ Р 50.2.009-2011 «Электрокардиографы, электрокардиоскопы и электрокардиоанализаторы. Методика поверки».

А. А. НЕСТЕРОВА

*nstrv.aa@gmail.com*

Науч. руковод. – ст. преп. Е. А. ФИЛОНИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ОБЗОР ЭЛЕКТРОСЧЕТЧИКОВ: ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИНДУКЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**Аннотация.** В статье рассматриваются тенденции перехода измерительной техники в области электроэнергетики в цифровую (электронную) форму, а также причины применения цифровизации для решения технологических задач; выделены достоинства и недостатки каждого вида представленных средств измерений электрической энергии.

**Ключевые слова:** электроэнергия; электросчетчики; цифровизация.

К одним из самых многочисленных электроизмерительных приборов на протяжении последнего 50-летия относят счетчики электроэнергии. Большое число приборов учета на питающих линиях и понижающих подстанциях крупных потребителей (например, Норникель, Северсталь, Башкирская содовая компания) провоцирует трудности в оперативно-техническом учете электроэнергии [1]. Это в свою очередь объясняет неизбежность смены децентрализованной системы электроучета к той, что предполагает сосредоточение приборов, представляющих, регистрирующих и суммирующих показания на конкретном контрольном пункте выделенного предприятия.

Также велико количество измерительных приборов, применяемых городским и сельским населением, что требует значительных – как трудовых, так и материальных – затрат по использованию приборов и ставит приборостроителям экономически важную проблему – увеличение срока службы электросчетчиков между ремонтными работами.

Следует отметить, что счетчикостроение развивается как по пути расширения выпуска приборов учета, так и освоения совершенно новых видов счетчиков, оптимальных в различных условиях электропотребления. Именно этот факт определил возникновение и последующий тотальный переход на электронные приборы учета.

Индукционные (электрохимические) электросчетчики были широко распространены в советское время благодаря очевидной дешевизне и простоте конструкции, однако они имеют ряд несовершенств, приведших к постепенному выводу их из эксплуатации. Так, эти счетчики для измерения активной электрической энергии в соответствии с ГОСТ 31819.11 имеют достаточно низкие классы точности 0,5; 1,0 и 2,0 [2]. К тому же они обладают крупными габаритами, обуславливающими их существенный вес (более 1 кг) и ограниченность применения в связи с проблемами их рационального размещения в замкнутых пространствах.

Аспектом недопустимости использования индукционных электросчетчиков в современном мире является и то, что они практически не защищены от хищения электрической энергии. Цена по одноставочному тарифу на электроэнергию для населения в городах по РБ на 2 полугодие 2022 года составляет 3,68 руб./кВт·ч (с учетом НДС) [3], а среднее ее потребление одним человеком по России – порядка 2-3 кВт·ч в день. Эта статистика позволяет увидеть существенные убытки, которые несут энергосбытовые компании в каждом случае хищения электроэнергии.

Электронные счетчики, сменившие индукционные, строятся на «основе достижений микроэлектроники и смежных областей» [4]. Они, в отличие от своих предшественников, компактны, более надежны, обеспечивают точность измерений классов 0,2 S и 0,5 S, работают в цепях как переменного, так и постоянного тока.

Цифровые электросчетчики получили неоспоримое преимущество для массового использования в качестве измерительного прибора, продемонстрировав возможность дистанционного снятия показаний и применения при автоматизированном техническом учете и контроле учета электроэнергии (АСТУЭ и АСКУЭ). Помимо этого, электронные счетчики имеют срок межповерочного интервала до 16 лет. Однако и они не лишены недостатков, к которым относят чувствительность к перепадам напряжения, дороговизну и сложность ремонта.

Действительно, сравнительный анализ двух видов электросчетчиков наглядно показывает предпочтительность второй, более новой разновидности. На данный момент электронные электросчетчики почти полностью заменили индукционные не только на промышленных предприятиях, но и в бытовом секторе. Таким образом, сфера электроэнергетики посредством применения электронных приборов учета достигла более высокого уровня точности измерений, ограничила возможности хищения электрической энергии и обеспечила автоматизированный учет и контроль учета электроэнергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минин Г. П. Измерение электроэнергии // М.: Энергия, 1974. – 104 с.: илл. – (Библиотека электромонтера. Выпуск 394).
2. Захаров В. А., Волегов А. С. Метрологическое обеспечение измерительных систем // учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 2. Системы учета электрической и тепловой энергии. – Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 232 с.
3. Постановление от 14 декабря 2021 года №660 «Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Республике Башкортостан на 2022 год».
4. Рожнов Е. Электронные счетчики электроэнергии. Новые электронные средства для учета электроэнергии // Электроника: НТБ. 1998, № 1; 1999, № 1.

УДК 006.91

А. И. НИГМАТУЛЛИНА

*nigmatullina.ayguzel@mail.ru*

Науч. руковод. – ст. преп. А. Ф. САФИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ПОВЕРКА МАНОМЕТРА МП4-Уф

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы поверки манометра МП4-Уф. Представлены описание средства измерения, его основные метрологические характеристики, основные нормативные документы в области поверки манометров, средства и этапы поверки манометра МП4-Уф, а также результаты поверки рассматриваемого средства измерения.

**Ключевые слова:** поверка средств измерений, поверка манометра, погрешность средств измерений, вариация показаний.

Нет ни одной области производственного процесса, где не использовались бы измерения. Важным условием обеспечения единства измерений является использование пригодных к применению приборов, показания которых не превышают допускаемые значения. В связи с этим средства измерения должны подвергаться поверке, которая представляет собой «совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям» [1].

В рамках данной работы рассматривается поверка манометра МП4-Уф, предназначенного для измерений и контроля избыточного и вакуумметрического давления различных сред. Принцип действия манометров основан на уравнивании измеряемого давления силами упругой деформации чувствительного элемента - трубчатой пружины. Измеряемое давление через штуцер поступает в полость измерительной пружины и посредством трибко-секторного механизма вызывает пропорциональное вращательное движение стрелки по шкале.

Основные метрологические характеристики манометра МП4-Уф представлены в таблице 1.



Метрологические характеристики манометра МП4-Уф

Измеряемая среда	Диапазон показаний, МПа	Класс точности	Предел допускаемой основной погрешности, % диапазона показаний
не агрессивные не кристаллизирующиеся жидкости, пар, газ, в т.ч. кислород	от 0 до 6,0	1,5	±1,5

Диапазон измерений избыточного давления составляет 75% диапазона показаний.

К основным нормативными документам в области поверки манометров относятся:

1. Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 № 102-ФЗ;

2. ГОСТ 2405-88 «Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напорометры, тягомеры и тягонапорометры. Общие технические условия»;

3. МИ 2124-90 «ГСИ. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напорометры, тягомеры и тягонапорометры показывающие и самопишущие. Методика поверки»;

4. Описание типа средств измерений. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напорометры, тягомеры и тягонапорометры ФТ;

5. РЭ4212-114-64115539-2014 «Руководство по эксплуатации. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напорометры, тягомеры и тягонапорометры ФТ».

Поверка манометра МП4-Уф проводится в соответствии с требованиями МИ 2124-90 «ГСИ. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напорометры, тягомеры и тягонапорометры показывающие и самопишущие. Методика поверки». Согласно данному документу при проведении поверки должны выполняться следующие условия:

– приборы должны быть установлены в нормальном рабочем положении;

- температура окружающего воздуха должна быть 20 или 23°C с допустимым отклонением  $\pm 5^\circ\text{C}$ ;
- относительная влажность должна быть от 30 до 80%;
- вибрация и удары должны отсутствовать или не достигать значений, вызывающих колебания стрелки более 0,1 длины наименьшего деления шкалы;
- образцовые приборы, применяемые при поверке, должны быть поверены или аттестованы в органах метрологической службы.

Для поверки манометра МП4-Уф был использован цифровой манометр METROL 100 и ГСКА (гидравлическая система калибровки автоматизированная). При выборе образцового манометра соблюдено следующее условие:

$$\begin{aligned}(\Delta_0/D) \cdot 100 &\leq a_r \cdot \gamma; \\(0,0015/6) \cdot 100 &\leq 0,33 \cdot 1,5; \\0,025 &\leq 0,495.\end{aligned}$$

где  $\Delta_0$  – предел допускаемой абсолютной погрешности образцового прибора на проверяемых отметках шкалы ( $\Delta_0 = 0,015$  МПа);

$D$  – диапазон показаний поверяемого прибора;

$a_r$  – отношение предела допускаемого значения погрешности образцового прибора, применяемого при поверке, к пределу допускаемого значения основной погрешности прибора ( $a_r = 0,33$  по табл. 2 МИ 2124-90);

$\gamma$  – предел допускаемой основной погрешности прибора в процентах от нормированного значения.

Проведение поверки МП4-Уф включает в себя следующие этапы:

#### 1. Внешний осмотр

При внешнем осмотре манометра было установлено отсутствие механических повреждений корпуса, штуцера, стрелки, стекла и циферблата, которые влияют на эксплуатационные свойства. Соединение корпуса с держателем прочное. Стекло и защитное покрытие циферблата чистые и не имеют дефектов.

#### 2. Проверка положения стрелки у нулевой отметки шкалы

Перед проверкой положения стрелки у нулевой отметки прибор был выдержан под давлением в пределах  $(90 \div 100)$  % верхнего предела измерений, в течение 1÷2 мин. Стрелка прибора при отсутствии давления установлена по центру нулевой отметки шкалы.

### 3. Определение основной погрешности и вариации

Для поверки манометра использован способ, где стрелку поверяемого прибора нужно установить на проверяемую отметку шкалы, а действительное давление отсчитывать по образцовому прибору. Определение погрешности манометра класса точности 1,5 проводилось в шести значениях давления (таблица 2).

При поверке давление плавно повышали и проводили отсчитывание показаний. После чего прибор был выдержан в течение 5 мин под давлением, равным верхнему пределу измерений. Затем давление плавно понизили и сняли показания при тех же значениях давления, что и при повышении давления. По измеренным данным были вычислены абсолютная и приведенная погрешности, результаты которых представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты поверки манометра МП4-Уф

Показания поверяемого прибора, МПа	Показания образцового прибора, МПа		Абсолютная погрешность, МПа		Приведенная погрешность, %	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
0	0	0	0	0	0	0
1	0,964	0,945	0,036	0,055	0,8	1,2
2	1,945	1,918	0,055	0,082	1,2	1,8
3	2,894	2,878	0,106	0,122	2,4	2,7
4	3,846	3,855	0,154	0,145	3,4	3,2
4,5	4,335	4,300	0,165	0,200	3,7	4,4

По таблице 2 видно, что значения абсолютной и приведенной погрешности манометра МП4-Уф в некоторых точках шкалы, как при повышении, так и при понижении давления, превышают величину допускаемой погрешности 0,09 МПа

и  $\gamma = \pm 1,5$  % соответственно. Следовательно средство измерения не соответствует установленным требованиям. В этом случае расчет вариации необязателен.

Таким образом, манометр МП4-Уф, поверенный в соответствии с МИ 2124-90, на основании результатов периодической поверки признан не соответствующим установленным в описании типа требованиям и является непригодным к применению.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 № 102-ФЗ.
2. МИ 2124-90 «ГСИ. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры показывающие и самопишущие. Методика поверки».
3. ГОСТ 2405-88 «Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры. Общие технические условия».
4. Описание типа средств измерений. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры ФТ.
5. РЭ4212-114-64115539-2014 «Руководство по эксплуатации. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры ФТ».

УДК 657.631

М. Д. НУРМУХАМИТОВ

*marsnyrn@mail.ru*

Науч. руковод. – д-р пед. наук, доц. С. Н. ГОРБУШИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **УДАЛЕННЫЕ АУДИТЫ СМК ОРГАНИЗАЦИИ: РИСКИ И ВОЗМОЖНОСТИ**

*Аннотация.* Представлен материал об удаленном аудите СМК организации. Раскрыты достоинства, недостатки и риски данного процесса.

*Ключевые слова:* удаленный аудит, преимущества, недостатки, риски удаленного аудита

Основным условием повышения конкурентоспособности отечественных предприятий является системная работа в области качества, а также оценка ее результативности и эффективности посредством проведения аудитов. Виды аудитов и их особенности описаны в таких документах, как обязательный документ Международного форума по аккредитации (International Accreditation Forum, IAF), IAF MD 4:2018 «Применение информационно-коммуникационных технологий для аудита/оценки», ГОСТ Р ИСО/МЭК 17021-1-2017, ГОСТ Р ИСО 19011-2021 и др. Относительно новой формой проведения аудита (особенно в форс-мажорных условиях работы организаций) является удаленный аудит. Под удаленным аудитом понимается аудит, при котором аудитор не присутствует физически в проверяемой организации, но контактирует с ней с помощью таких средств как аудио, видео и обмен данными со своего непосредственного рабочего места [2].

Следует отметить, что проведение удаленных аудитов при использовании информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) прорабатывалось ранее. Однако распространенной формой проверки и контроля данная форма аудита стала при распространении коронавирусной инфекции [2].

Большим преимуществом удаленного аудита является то, что у компаний появляется возможность работать в штатном режиме, несмотря на возникающие

в форс-мажорных условиях ограничения (например, в перелетах, при режиме самоизоляции и др.) [1]. Вместе с тем, особенности организации данной формы проверок позволяют осуществлять аудит в соответствии с планом, включая просмотр документов онлайн, проверку помещения в виртуальном ознакомительном туре.

Удаленные аудиты имеют следующие риски:

– ограниченность обзора, так как аудитор, используя ИКТ, видит только то изображение, которое возможно при использовании камеры, например угол обзора не 360 градусов, а 90;

– развитие «экранной усталости»;

– недостаточная компетентность при использовании ИКТ со стороны как аудиторов, так и проверяемых;

– неготовность цифровой инфраструктуры аудиторов и проверяемой организации;

– трудно обеспечить условия репрезентативности выборки и д.р.;

При рациональном подходе к организации и проведению удаленных аудитов с использованием ИКТ возможно минимизировать связанные с ними риски и, тем самым, существенно повысить результативность данного процесса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев Е.А. – Атрибутивная малая выборка: применение в аудиторских процедурах // Внутренний контроль в кредитной организации. – 2017 г.
2. Владимирцев А.В., Дзедик В.А., Загорюлько Ю.В., Рязонова Е.Е., Удаленные аудиты систем менеджмента: перспективы, риски, преимущества //Стандарты и Качество. – 2020. – № 9. – С. 60-63.

УДК 006.91

А. А. ОСИНСКАЯ

*sashaosinskaya@gmail.com*

Науч. руковод. – д-р. пед. наук, доц. С. Н. ГОРБУШИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ОБ ОПЫТЕ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗРЕЛОСТИ ВНУТРЕННЕГО АУДИТА СМК ОРГАНИЗАЦИИ**

**Аннотация.** Представлен материал, раскрывающий опыт оценки зрелости внутреннего аудита СМК с позиции качественного анализа. Описаны виды внутреннего аудита (нормативный, проактивный, риск-ориентированный) и их взаимосвязь с методологическими подходами к процессам СМК (функциональный, процессный, системный) с последующей градацией по трем уровням зрелости внутреннего аудита.

**Ключевые слова:** внутренний аудит системы менеджмента качества; оценка уровня зрелости внутреннего аудита.

Внутренний аудит – один из процессов системы менеджмента качества организации, подготовка и проведение которого осуществляется в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ Р ИСО 9001 - 2015 «Системы менеджмента качества. Требования» и ГОСТ Р ИСО 19011 - 2021 «Руководящие указания по аудиту систем менеджмента». Результативность данного процесса, как правило, определяется по степени выполнения программы аудита с учетом выявленных несоответствий, что в целом не отражает его влияние на корпоративную среду и свидетельствует о сугубо формальном характере проверки.

Вместе с тем, имеется опыт анализа зрелости внутреннего аудита с позиции качественной оценки с выделением таких категорий, как нормативный, проактивный и риск-ориентированный аудиты [1].

Цель нормативного внутреннего аудита состоит в реализации регламентированных требований к данному процессу, формировании необходимой отчетности, фиксации несоответствий. По результатам проверок формируются планы корректирующих мероприятий.

Проактивный внутренний аудит включает выполнение нормативных требований и анализ корневых причин выявленных несоответствий.

Внутренний аудит риск-ориентированного характера помимо функций контроля и анализа осуществляет идентификацию и оценку рисков и возможностей процессов СМК организации.

С учетом методологических подходов зрелость внутреннего аудита классифицируется по трем позициям: функциональный, процессный, системный. В ходе экспертной оценки рассматривается соотношение между видом аудита (нормативный, проактивный или риск-ориентированный) и превалирующим подходом к его организации и проведению (функциональный, процессный, системный). В итоге по степени зрелости аудит может классифицироваться, как:

- функциональный нормативный внутренний аудит, т.е. самый незрелый процесс проверки, его основная задача – обеспечить наличие минимального необходимого объема свидетельств соответствия требованиям к внутреннему аудиту;

- процессный проактивный внутренний аудит – распространенный вид внутреннего аудита, реализуется в организациях, где внедрен процессный подход, аудиторы в ходе проверки выявляют причины несоответствий;

- системный риск-ориентированный аудит с самым зрелым уровнем развития, в ходе которого решаются вопросы эффективного сочетания процессов организации и оптимального распределения ответственности, повышения результативности системы внутреннего контроля и системы управления рисками и возможностями СМК предприятия.

Таким образом, качественная оценка аудиторской деятельности позволяет, с одной стороны – определить существующий уровень ее зрелости, с другой – вектор дальнейшего совершенствования как важнейшего инструмента развития системы менеджмента качества организации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горчакова Е. Оценка уровня зрелости внутреннего аудита //Стандарты и качество, 2019 г. № 2 (980). С.94 – 9



УДК 006.91

К. Ф. ПЕТРОВА

*pkristina110702@gmail.com*

Науч. руковод. – д-р пед. наук, доц. С. Н. ГОРБУШИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ СТАНДАРТИЗАЦИИ: СТАНОВЛЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

*Аннотация.* В статье представлен материал об этапах становления и основных направлениях развития Национального института стандартизации.

*Ключевые слова:* Национальный институт стандартизации, этапы создания, основные направления деятельности.

В 2017 г. Минпромторг России представил в Правительство РФ предложение о создании федерального автономного учреждения (ФАУ) «Национальный институт стандартизации». За данным институтом предполагалось закрепление полномочий по реализации основных государственных услуг в области стандартизации, а также проведение научных и прикладных исследований под ведомством Росстандарта.

19 ноября 2019 г. предприятие ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» направило в Росстандарт проекты документов по реорганизации предприятия в федеральное государственное бюджетное учреждение на основе объединения институтов ВНИИНМАШ, СТАНДАРТИНФОРМ, ВНИИСМТ и Рособоронстандарта, которое произошло ранее в 2018 г.

В декабре 2019 г. было проведено совместное заседание Общественного совета и Совета по стандартизации с вынесением рекомендации по созданию Национального института стандартизации. Данная инициатива была закреплена Распоряжением Правительства РФ от 2 марта 2021 г. № 519 – р. в виде организации Федерального государственного бюджетного учреждения «Российский институт стандартизации» (ФГБУ «РСТ»). Вновь созданный институт сохранил преемственность в решении таких вопросов, как:

– формирование и ведение федерального информационного фонда стандартов;

- реализация программ национальной стандартизации (НСС);
- проведение экспертизы документов по стандартизации (частично и оборонного значения);
- информационное обеспечение НСС;
- обеспечение разработки, ведения и применения общероссийских классификаторов;
- создание и ведение информационных систем.

Институт активно участвует в международных организациях по стандартизации. Так, были подписаны Соглашение с Американским обществом по сварке (AWS), Контракт о предоставлении права распространения документов национальной системы стандартизации на территории Республики Узбекистан, одобрен проект порядка распространения документов по межгосударственной стандартизации. Эксперты института разрабатывают «стратегии развития Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ на период до 2030 г. в области стандартизации» [1].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быкова Н.Г., О Национальном институте стандартизации //Стандарты и Качество. – 2020. – № 2.
2. Леонидов К.В., О развитии Национального института стандартизации //Стандарты и Качество. – 2022. – № 3.

УДК 90.03.37

А. Е. ПОСАШКОВА

*alena.zhdanova.98@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Э. В. САФИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

**Аннотация.** Главная задача метрологии - это обеспечение единства измерений. Под единством измерений понимаются такие измерения, где результаты выражаются в единицах величин, которые допущены к применению в Российской Федерации, а показатели точности находятся в установленных границах.

**Ключевые слова:** метрология; метрологическое обеспечение; измерения; метрологическое обеспечения производства.

Под метрологическим обеспечением измерений понимается установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Основными целями метрологического обеспечения измерений являются:

- создание в стране необходимых эталонов, образцовых и рабочих средств измерений;
- правильный их выбор и применение;
- разработку и применение метрологических правил и норм;
- выполнение других метрологических работ, необходимых для обеспечения требуемого качества измерений на рабочем месте, предприятии (организации), в министерстве (ведомстве), народном хозяйстве.

Для современных промышленных предприятий, разработчиков и пользователей средств измерений прикладной интерес представляет часть метрологического обеспечения, связанная с деятельностью метрологической службы предприятия. Благодаря этому большое распространение получили термины «метрологическое обеспечение предприятия» или же «метрологическое обеспечение производства».

Метрологическое обеспечение производства, в основном, включает:

- анализ состояния измерений;
- установление рациональной номенклатуры измеряемых величин и использование средств измерений (рабочих и эталонных) соответствующей точности;
- проведение поверки и калибровки средств измерений;
- разработку методик выполнения измерений для обеспечения установленных норм точности;
- проведение метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации;
- внедрение необходимых нормативных документов (государственных, отраслевых, фирменных);
- аккредитацию на техническую компетентность;
- проведение метрологического надзора.

Метрологическое обеспечение производства должно в определенной степени обеспечивать оптимизацию управления технологическими процессами и предприятием в целом, стабилизировать процессы, поддерживать качество изготовления продукции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метрологическое обеспечение производства: учебное пособие / И. А. Лежнина, А. А. Уваров; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 120 с;
2. Метрологическое обеспечение производства: учебное пособие / Ю.М. Правиков, Г.Р. Муслина М. : КНОРУС, 2009. 240 с.;
3. НАУЧНЫЙ АСПЕКТ № 4 – 2012 – Самара: Изд-во ООО «Аспект», 2012. – Т.1-2. – 304 с. Подписано к печати 10.01.2013. Формат 120x168 1/8. Объем 38п.л.
4. Ю. Г. Малахова, Е. А. Жирнова. Метрологическое обеспечение технологических процессов и производств. Учебное пособие (часть 2). – Красноярск, 2017. – 105 л.

УДК 531.787.3

В. С. РАССКАЗЧИКОВА

*vikarasskazchikova@gmail.com*

Науч. руковод. – ассист. Е. А. ФИЛОНИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ГРАДУИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ**

*Аннотация.* В статье рассмотрены градуировочные характеристики средств измерений. Приведены примеры градуировки манометров давления.

*Ключевые слова:* градуировочная характеристика, средство измерения, образцовый манометр, вычерчивают давление

Средствами измерений (СИ) являются измерительные технические устройства, которые имеют нормированные метрологические характеристики. в Под метрологическими характеристиками понимают такие свойства СИ, которые могут позволить оценить результат измерения физических величин и его погрешности. Средства измерения способны хранить и воспроизводить единицы или шкалы измеряемых величин и сохранять их размер неизменным в течение определенного времени. Техническое средство сразу после изготовления становится измерительным после передачи ему единицы (или шкалы) от другого более точного СИ. Такая операция называется градуировкой. В более общем смысле градуировка СИ обозначает определение зависимости между сигналами на входе и выходе средства измерений. При этом в любых средствах измерения проводят измерительные преобразования, которые сопровождаются изменениями различных физических величин с требуемым качеством метрологических характеристик [1].

Градуировка выполняется в таких условиях, когда измеряемая величина не меняется или ее изменением можно пренебречь. После того, как указатель отсчетного устройства окончательно остановится на какой-нибудь отметке шкалы можно снимать показания.

Рассмотрим, например, градуировку манометра. Манометр – это прибор для измерения давления газа или жидкости. Градуировка манометров происходит при включении образцового и градуируемого манометров в пресс, который одновременно передает давление в оба манометра. При медленном увеличении давления в прессе на шкалу градуируемого манометра наносят отметки через определенные промежутки, а подразделения между ними вычерчивают затем путем градуировки отдельных участков на равные части наносят основные точки [2]. Кроме того, для нанесения на будущую шкалу манометра точек иногда применяют специальные контрольные прессы, называемые приборы Рухгольца (рис. 1), у которых вместо образцового манометра имеется поршень определенного сечения, находящийся под действием определенного груза, отвечающего требуемому давлению.

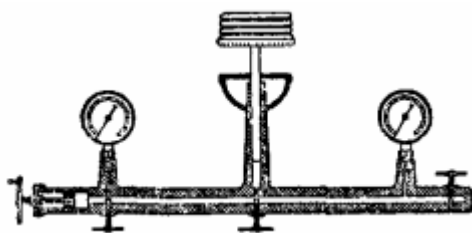


Рис. 1.

Этот способ градуировки обладает преимуществом, что в приборе Рухгольца показаний больше, чем показаний образцового манометра. Бывает такое, что при одном и том же давлении показания могут отличаться. Однако из-за неудобства с накладыванием и подсчетом груза чаще всего используют при градуировке образцовые манометры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РМГ 54–2002 от 01.07.2004.
2. ГОСТ Р 8.905–2015 от 01.08.2016.
3. Градуировка (термометров, ареометров, манометров, измерительных приборов, мерной химической посуды): [сайт]. – URL: <https://azbukametalla.ru/entsiklopediya/g/graduirovka-termometrov-areometrov-manometrov-izmeritelnykh-priborov-mernoj-khimicheskoy-posudy.html?ysclid=14wt61pt5d20290006> (дата обращения 27.06.2022).

Ю. П. ЧЕСНОКОВА

*chesnkova1729@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Э. В. САФИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет***ПОВЕРКА ПУЛЬСОКСИМЕТРА «ОКСИТЕСТ-1»**

**Аннотация.** В статье рассмотрены характеристики, принцип работы и методика поверки пульсоксиметра портативного с автономным питанием Окситест-1.

**Ключевые слова:** поверка, сатурация, частота пульса, отклонение.

Пульсоксиметр портативный с автономным питанием «Окситест-1» – это медицинский прибор, предназначенный для неинвазивного непрерывного определения насыщения (сатурации) кислородом гемоглобина артериальной крови и частоты пульса.

Принцип действия пульсоксиметра основан на измерении отношения коэффициентов модуляции световых потоков в двух спектральных диапазонах, прошедших через пульсирующую перфузированную ткань, и на анализе пульсовой волны, характеризующей частоту сердечных сокращений во времени.

Поверке подлежат средства измерения утвержденного типа. Идентификация средства измерения проводится с помощью информационного ресурса ФГИС АРШИН. Пульсоксиметр «Окситест-1» является средством измерения утвержденного типа (номер в госреестре 28395-19).

Таблица 1

Метрологические характеристики пульсоксиметра

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений значений сатурации, %	от 60 до 99
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений значений сатурации, %:	
- в диапазоне измерений от 60 до 84% включ.	±3
- в диапазоне измерений св. 84 до 99%	±2
Диапазон измерений частоты пульса, мин <sup>-1</sup>	от 30 до 250
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений частоты пульса, мин <sup>-1</sup> :	
- в диапазоне измерений от 30 до 120 мин <sup>-1</sup> включ.	±1
- в диапазоне измерений св. 120 до 250 мин <sup>-1</sup>	±2

Поверка осуществляется по документу МИ 3280-2010 «ГСИ. Пульсовые оксиметры и пульсоксиметрические каналы медицинских мониторов. Методика поверки.»

Основное средство поверки:

– мера для поверки пульсовых оксиметров МППО (регистрационный номер в Федеральном информационном фонде 42822-09).

Допускается применение аналогичных средств поверки, обеспечивающих определение метрологических характеристик поверяемых средств измерений с требуемой точностью.

Таблица 2

Основные метрологические и технические характеристики средства поверки

Наименование характеристики	Значение
Диапазон воспроизводимых значений $R$ (отношение коэффициентов модуляции)	$0,4 \div 1,675$
Относительная погрешность воспроизведения отношений $R$ , %, не более	$\pm 0,5$
Диапазон воспроизводимых значений сатурации $SpO_2$ , %	$70 \div 100$
Относительная погрешность воспроизведения калибровочной кривой в единицах $R$ , %, не более	$\pm 0,5$
Диапазон воспроизводимых частот пульса, $\text{мин}^{-1}$	$20 \div 255$
Относительная погрешность воспроизведения частот пульса, $\text{мин}^{-1}$ , не более	$\pm 1$

Поверка пульсоксиметра проводится в 4 этапа:

1. Внешний осмотр.

При внешнем осмотре проверяют:

– соответствие объема эксплуатационной документации и комплектности пульсоксиметра разделу «Комплектность» руководства эксплуатации;

– отсутствие механических повреждений монитора и датчика пульсоксиметра, влияющих на его работоспособность;

– отсутствие разрывов и повреждений изоляции соединительного кабеля;

– обеспечение чистоты разъемов, датчика пульсоксиметра и соединительного кабеля;

– надежность и качество соединения частей разъема, обеспечивающего подсоединение датчика к монитору пульсоксиметра;



– состояние лакокрасочных покрытий пульсоксиметра и четкость маркировки.

## 2. Опробование.

При опробовании проводят поверку режимов функционирования каналов измерений и тревожной сигнализации.

## 3. Определение метрологических характеристик.

Процедура поверки метрологических характеристик канала измерения сатурации заключается в проверке точности измерения пульсоксиметра значения отношения  $R$  и правильности его преобразования в значение сатурации.

Проведение измерения:

– на МППО устанавливают частоту пульса равной  $70 \text{ мин}^{-1}$  и значение сатурации равным  $S_{\text{МППО}}=99\%$ ;

– пальцевый имитатор МППО вставляют в датчик поверяемого пульсоксиметра так, чтобы обеспечивался надежный оптический контакт между фотоприемниками и светоизлучающими элементами;

– с дисплея пульсоксиметра считывают измеренное им значение сатурации  $S_{\text{ПО}}$  и заносят его в протокол;

– вынимают пальцевый имитатор МППО из датчика проверяемого пульсоксиметра;

– повторяют операции b)-d) еще четыре раза;

– вычисляют отклонение измеренной сатурации от воспроизводимого МППО значения для всех пяти точек измерений по формуле:

$$\Delta S_{\text{ПО}} = S_i - S_{\text{МППО}} ,$$

где  $S_i$  – значение измеренной пульсоксиметром сатурации в  $i$ -м измерении;

$S_{\text{МППО}}$  – воспроизводимое МППО значение сатурации.

– определяют максимальное отклонение измеренного значения сатурации.

Пульсоксиметр считают прошедшим поверку по данному параметру, если максимальное отклонение измеренного значения сатурации от заданного МППО не превышает указанной в эксплуатационной документации абсолютной погрешности измерения сатурации.

Определение метрологических характеристик канала измерения частоты пульса.

Проведение измерения:

а) На МППО устанавливают значение отношения  $R=0,7$ , что приблизительно соответствует значению сатурации  $S_{\text{ПО}}=93-97\%$ , и частоту пульса равной  $70 \text{ мин}^{-1}$ ;

б) пальцевый имитатор МППО вставляют в датчик поверяемого пульсоксиметра так, чтобы обеспечивался надежный оптический контакт между фотоприемниками и светоизлучающими элементами;

в) с дисплея пульсоксиметра считывают измеренное им значение сатурации  $S_{\text{ПО}}$  и заносят его в протокол;

г) вынимают пальцевый имитатор МППО из датчика проверяемого пульсоксиметра;

д) повторяют операции б)-г) еще четыре раза;

е) вычисляют отклонение измеренной частоты от воспроизводимого МППО значения для всех пяти точек измерений по формуле:

$$\Delta F_{\text{ПО}i} = F_i - F_{\text{МППО}} ,$$

где  $F_i$  – значение измеренной пульсоксиметром частоты в  $i$ -м измерении;

$F_{\text{МППО}}$  – воспроизводимое МППО значение частоты.

ж) определяют максимальное отклонение измеренного значения частоты.

Пульсоксиметр считают прошедшим поверку по данному параметру, если максимальное отклонение измеренного значения частоты пульса от заданного МППО не превышает указанной в эксплуатационной документации абсолютной погрешности измерения.

#### 4. Оформление результатов поверки.

При положительных результатах поверки пульсоксиметра данные поверке вносятся во ФГИС АРШИН. При отрицательных результатах выдается извещение о непригодности к применению с указанием причин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 N 102-ФЗ
2. Свидетельство №74538 об утверждении типа средств измерений «Описание типа средства измерений»
3. МИ 3280-2010 «ГСИ. Пульсовые оксиметры и пульсоксиметрические каналы медицинских мониторов»

## **ПРОЦЕДУРА ПОДТВЕРЖДЕНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

Процедура подтверждения компетентности испытательной лаборатории проходит в два этапа: - документарная оценка; - выездная оценка.

Выездная оценка происходит на месте осуществления деятельности лаборатории. Проверяется соответствие лаборатории критериям аккредитации и требованиям Руководства по качеству. Оценивается документооборот лаборатории (наличие и правильность ведения рабочих журналов, протоколов, архива), соблюдение методик выполнения измерений, наличие квалифицированного персонала, знание и соблюдение сотрудниками требований системы менеджмента, наличие помещений, правильность проведения внутрилабораторного контроля, условия окружающей среды, компетентность персонала при проведении испытаний.

В соответствии с утвержденной программой экспертная группа при выездной оценке обычно проводит следующие работы:

- рассмотрение экспертного заключения по результатам документарной экспертизы, а также отчета об устранении несоответствий, выявленных в результате документарной экспертизы;
- оценку заявленной области аккредитации по характеристикам (показателям), методам контроля, диапазонам определения;
- проверку соответствия заявителя требованиям, предъявляемым к испытательным лабораториям (центрам) в части юридического статуса и компетентности;

- проверку оснащенности испытательной лаборатории средствами измерений, испытательным оборудованием, вспомогательным оборудованием и оргтехникой для проведения испытаний в заявленной области;
- проверку технического уровня средств измерений, испытательного оборудования, оценку достаточности состава средств измерений, испытательного и вспомогательного оборудования и их фактического состояния;
- проверку наличия технической документации на оборудование (паспортов, руководств по эксплуатации и т.п.); проверку наличия свидетельств о поверке средств измерений, аттестатов и протоколов о первичной и периодической аттестации испытательного оборудования; проверку инструкций и графиков по техническому обслуживанию, поверке средств измерений, аттестации испытательного оборудования и их соблюдение;
- проверку фактического состояния производственных помещений испытательной лаборатории санитарным нормам и требованиям безопасности и охраны окружающей среды;
- проверку фонда нормативных документов, необходимых для проведения испытаний в заявленной области аккредитации, а также системы их учета, хранения и актуализации;
- оценку полноты реализации функций, возложенных на испытательную лабораторию, его прав, обязанностей и ответственности;
- проверку персонала испытательной лаборатории (кадрового состава, квалификации и профессионального уровня, образования, опыта работы в заявленной области аккредитации, знания нормативных документов по объектам испытаний, осведомленность и практические навыки работы); проверку наличия должностных инструкций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон "Об аккредитации в национальной системе аккредитации" от 28.12.2013 N 412-ФЗ.
2. Приказ Минэкономразвития России от 26.10.2020 N 707 "Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации"

Д. С. ШАРИПОВ  
*den\_salavatovich@bk.ru*

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **АККРЕДИТАЦИЯ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЯ**

Аккредитация в области обеспечения единства измерений осуществляется в целях официального признания компетентности юридического лица или индивидуального предпринимателя выполнять работы и (или) оказывать услуги по обеспечению единства измерений в соответствии с Федеральным законом «Об обеспечении единства измерений».

Аккредитация на право поверки средств измерений – подтверждение национальным органом по аккредитации соответствия юридического лица критериям аккредитации, являющееся официальным свидетельством компетентности юридического лица осуществлять деятельность в определенной области аккредитации. Каждая лаборатория должна быть конкурентоспособной, подтверждать качество проводимых ею работ и соответствовать определенным требованиям, т.е. быть независимой, беспристрастной, неприкосновенной и технически компетентной. Соответствие этим требованиям (критериям аккредитации) проверяется при аккредитации. Для проведения поверки средств измерений собственными силами необходимо получить «Аттестат аккредитации в области обеспечения единства измерений». Право поверки средств измерений может быть предоставлено только аккредитованным метрологическим службам юридических лиц.

С 1 июля 2003 г. в России вступил в действие Федеральный закон «О техническом регулировании», который регулирует отношения, возникающие при оценке соответствия (сертификации) продукции. Важнейшим инструментом такой деятельности являются испытательные (измерительные) лаборатории, от компетентности которых зависит достоверность получаемой информации и

обоснованность принимаемых на ее основе управляющих решений. Федеральным законом однозначно предусмотрен допуск к деятельности по подтверждению соответствия (сертификации) только аккредитованных лабораторий. Согласно Федеральному закону "О техническом регулировании", основными элементами технического регулирования являются технические регламенты, стандарты, процедуры подтверждения соответствия, аккредитация, контроль и надзор.

Аккредитация лаборатории для предприятия - это значительный шаг на пути повышения своих конкурентных преимуществ. Аккредитация юридических лиц и индивидуальных предпринимателей на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений осуществляется для государственного регулирования в области обеспечения единства измерений, а также в целях официального признания компетентности юридического лица или индивидуального предпринимателя выполнять работы и (или) оказывать услуги по обеспечению единства измерений в соответствии с Федеральным законом № 102-ФЗ "Об обеспечении единства измерений".

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПР 50.2.014-02. Правила проведения аккредитации метрологических служб юридических лиц на право поверки средств измерений.
2. Федеральный закон "О техническом регулировании" от 27.12.2002 N 184-ФЗ
3. Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 N 102-ФЗ

Д. И. ШВЕЦОВА

*daariaashvetsova@mail.ru*

Науч. руковод. – Е. А. ФИЛОНИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ИСТОРИЯ СЕРТИФИКАЦИИ

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена история возникновения и развития стандартизации в России и за рубежом.

**Ключевые слова:** сертификация; качество.

Термин «сертификация» стал известен в повседневной жизни сравнительно недавно, впервые определение этому понятию было дано Международной организацией по стандартизации в 1982 г. Тем не менее, сертификация как процедура применяется давно, и термин «сертификат» известен с XIX в.

Слово «сертификация» в переводе с латинского *sertifico* означает -подтверждаю, удостоверяю. Также его можно толковать, исходя из сочетания латинских слов *certum* и *facere*, что переводится как «сделано верно» [1].

Самый старый, дошедший до нашего времени сертификат, из Древней Греции. В так называемом «нормативном документе» были указаны строительные требования и правила при возведении бронзовых колонн. Этот факт учеными признается как один из первых случаев сертификации.

Известно, что производители товаров издавна гарантировали качество своих изделий, в том числе письменно, т. е. снабжали их “заявлениями о соответствии”. Диапазон таких заявлений был весьма широк, сохранились свидетельства о том, что знаменитые художники эпохи Возрождения гарантировали сохранность своих картин в течение трех столетий.

Ведущие экономические державы начали развивать процессы сертификации в начале XX в. В 1920 г. немецкие котлостроители создали общество экспертов, для того чтобы третья независимая сторона проверяла прочность котлов, которые использовались в паровых машинах. Так появилась организация под названием TUV (ТЮФ). Считается, что современная история сертификации началась именно в Германии вместе с бурным развитием промышленности. В

дальнейшем эксперты независимой организации стали оценивать и испытывать заводы, автотранспортные средства, энергетические установки, аттракционы, различные электрические устройства.

В 1926 году официальное понятие «сертификация» появилось в Англии. Сертификация в Англии носит в большей степени добровольный характер, что, впрочем, не отменяет обязательную сертификацию для некоторых видов продукции. Вскоре к этой системе присоединились Канада и Индия, а затем и другие государства.

Путь становления сертификации в США резко отличается от других стран. В США отсутствует единый национальный орган, но действует несколько сотен систем сертификации при различных группах компаний. Это отразилось на разработке стандартов – у каждой организации свой подход к требованиям безопасности продукции. Однако, существует единая национальная система аккредитации испытательных лабораторий.

Предшественницей российской сертификации была сертификация в СССР отечественной экспортируемой продукции. Первоначально она проводилась в зарубежных центрах, и ее обязательность фактически устанавливалась не отечественными законами, а законодательством тех стран, в которые товары поставлялись из СССР. В 1984 г. правительством СССР было принято Постановление о сертификации экспортируемой продукции.

Сертификация в России начала проводиться в 1993 г. в соответствии с Законом РФ «О защите прав потребителей», который установил обязательность сертификации безопасности товаров народного потребления [2].

На сегодняшний день Россия является участником международных систем сертификации ISO, МЭК, ЕЭК и т.д. В России действует множество организаций, занимающихся вопросами сертификации (среди них – ВНИИС, Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Сертификации).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодарев Б.П. Стандартизация, метрология, подтверждение соответствия // Учебное пособие. – М.: НИЦ Инфра-М, 2015. С. 219.
2. Димов, Ю.В. Метрология, стандартизация, сертификация // Учебник для вузов / Ю.В Димов.- 3-е изд.- СПб., 2010. С. 357.



УДК 006.91

Д. А. ЩЕПИНА

*shchepina.dashuta@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Э. В. САФИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ**

*Аннотация.* Обеспечение единства измерений в области здравоохранения является одной из важнейших сфер реализации Федерального закона "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 №102-ФЗ.

*Ключевые слова:* метрологический контроль, медицинская техника, метрологическое обеспечение, лечебные учреждения, средства измерений.

В настоящее время в системе здравоохранения используется около 10 млн. приборов. Однако результаты последних проверок состояния метрологического обеспечения медицинской техники по регионам свидетельствуют, что процент не поверяемых средств измерения медицинского назначения достаточно высокий и колеблется в пределах (30-70)%. В эксплуатации находятся сотни тысяч неуправляемых приборов, в том числе большинство самых современных.

Одной из важных экономических причин, обуславливающих сложившееся положение, является отсутствие у многих государственных лечебных учреждений средств для оплаты работ по метрологическому обслуживанию.

Анализ зарубежного (в первую очередь – стран ЕС) опыта в области медицинской техники показывает, что нормативное обеспечение этой сферы деятельности охватывает полный «жизненный цикл» медицинского изделия: стадию разработки, производства, размещения на рынке и обслуживания в процессе эксплуатации изделия. При этом основное внимание направлено на соблюдение двух важнейших условий: обеспечение минимального риска при эксплуатации изделия и гарантированное обеспечение требуемых характеристик, установленных исходя из функционального назначения изделия.

Система метрологического обеспечения в медицинской технике должна носить многоуровневый и разносторонний характер, учитывающий реально существующие технические, экономические и кадровые условия.

Целесообразна также оптимизация распределения нагрузки по метрологическому обслуживанию между государственными и ведомственными метрологическими службами.

Ежедневное расширение сферы влияния, совершенствование изделий медицинской техники и рост требовательности к средствам измерений обязывает метрологическую службу постоянно увеличивать перечень обслуживаемых средств измерений, из-за чего увеличивается объем работы метрологических служб в области обеспечения единства измерений в сфере здравоохранения. Возникает необходимость расширения подразделений, ответственных за проведение организационно-методических работ по обеспечению единства и достоверности измерений технических средств, использующих при проведении исследований, профилактики, диагностики, лечения и реабилитации, а также работ по метрологическому надзору, анализу и оценке состояния средств измерений в учреждениях здравоохранения.

Таким образом, основными и наиболее важными проблемами метрологического обеспечения лечебно-профилактических учреждений является отсутствие надлежащего финансирования этих учреждений и недостаточная оптимизация распределения нагрузки по метрологическому обслуживанию между государственными и ведомственными метрологическими службами, что приводит к возникновению негативных последствий, влияющих на достоверное получение информации о параметрах и характеристиках обследуемого биообъекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Федеральный закон от 26 июня 2008 г. №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (ч.3)  
Приказ Госстандарта РФ от 17 января 2003 г. №12 «О мерах по совершенствованию организации и проведения центрами стандартизации, метрологии и сертификации государственного метрологического контроля и надзора в учреждениях здравоохранения Российской Федерации»  
Письмо Минздрава РФ от 3 октября 1997 г. №2510/7398-97-32  
Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация, учебник - 2-е издание, 2005г

## СЕКЦИЯ 2.3 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ, МЕХАТРОННЫЕ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.00

Э. Х. АХМЕТЗЯНОВА

*akhmetzyanova.enje@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. В. А. ОГОРОДОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРИВАРИВАНИЯ ШПИЛЕК

**Аннотация.** Приведен опыт разработки станка с ЧПУ для приваривания шпилек, рассмотрены проблемы разработки и испытания этого станка, способы их решения, а также намечены пути совершенствования конструкции станка.

**Ключевые слова:** автоматизация; шпилька; трехкоординатный станок; сварка конденсаторная; SCADA-система; система ЧПУ; САМ-система.

На одном из машиностроительных предприятия Уфы была поставлена задача спроектировать и изготовить станок с ЧПУ для приваривания шпилек к металлическим плитам. Шпилька – это специальное крепежное изделие с наружной резьбой, состоящее из резьбовой части, шляпки и осевого выступа в виде цилиндра с диаметром от 0,6 до 0,75 мм и высотой от 0,55 до 0,75 мм. Сама шпилька имеет диаметром от 2 до 12 мм, высоту от 12 до 35 мм. Материал и габариты, количество шпилек, их расположение и расстояние друг от друга определяются требованиями заказчика.

На российском рынке подобные станки встречаются чаще всего полуавтоматическими, поэтому являются менее точными и менее производительными.

Спроектированный станок представляет собой трехкоординатную машину, состоящую из станины, рабочего стола, электрического шкафа, вибробункера TZ619, сварочного аппарата и транспортирующих труб. Конденсаторный сварочный аппарат ZL 18 Jer Car точечной сварки установлен на основании станка.

В качестве приводов стола вдоль осей X и Y используются шаговые двигатели Leadsine DM2282 400W, на оси Z стоит шарико-винтовая пара.

Процесс конденсаторной сварки заключается в следующем. Из бункера потоком воздуха после ориентации по трубе шпилька подается к сварочной головке, приставляется к поверхности детали и прижимается с помощью пневматического поршня. На сварочную головку подается электрический ток, запальный наконечник начинает испаряться и зажигает электрическую дугу. Шпилька прижимается к ванне расплавленного металла, металл затвердевает, в результате шпилька приваривается.

Проектирование интерфейса станка произведено с применением SCADA-системы. Данная задача была решена с помощью ЧПУ-системы LinuxCNC. Для быстрого и легкого написания оператором управляющей программы применяется САМ-система.

В ходе испытаний станка были отмечены отказы шаговых двигателей. Поэтому для повышения надежности станка предлагается применить сервоприводы. Их преимуществом является бесшумная работа, надежность, простота управления.

В качестве направлений совершенствования конструкции станка предлагается установить несколько сварочных головок, что позволит ускорить процесс, повысить универсальность станка, а также расширить номенклатуру привариваемых шпилек.

Для удобства управления станком и повышения качества процесса необходимо улучшить стойку оператора и сделать съемный пульт.

В целях обеспечения безопасности требуется проработать систему пожаробезопасности станка, и, при необходимости, при увеличении мощности, например, продумать систему охлаждения рабочего органа и металла.

В процессе разработки и тестирования станка было установлено большое количество недочетов и объектов для доработки и улучшения. Поиск наилучших решений позволит усовершенствовать станок, сделать его наиболее эффективным.

Несмотря на выявленные недостатки, созданный станок в полном объеме выполняет требования: в заданных координатах приваривает шпильки в полностью автоматическом режиме.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stud Welding Machines. [Электронный ресурс]: - URL: <https://www.taylor-studwelding.com/> (Дата посещения: 15.08.2022)
2. Арматон СПб Приварные шпильки для конденсаторной сварки. [Электронный ресурс]: - URL: <https://armaton-spb.ru/product/privarnye-shpilki-dlya-kondensatornoj-svarki/> (Дата посещения: 15.08.2022)
3. Все о конденсаторной сварке. [Электронный ресурс]: - URL: <https://svarkaved.ru/tekhnologii/vidy-i-sposoby-svarki/vse-o-kondensatornoj-svarke> (Дата посещения: 15.08.2022)

УДК 681.574

П. В. ВАСИЛЬЕВ

*vasilevpavel@internet.ru*

Науч. руковод. – д-р техн. наук, доц. О. В. ДАРИНЦЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **АНАЛИЗ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИВОДОВ ТИПА ИСКУССТВЕННЫЕ МЫШЦЫ**

*Аннотация.* Проведен анализ области применения эндоскопов, их типы составлено техническое задание и предложение. Проанализированы типы приводов и выбран наиболее оптимальный – искусственные мышцы.

*Ключевые слова:* диагностика, видеодиагностика, искусственные мышцы.

### ***Введение***

На сегодняшний день в робототехнике существует множество видов различных приводов, которые в той или иной степени удовлетворяют различным техническим требованиям и условиям эксплуатации в промышленности. Но в некоторых областях применения роботов, особенно которые работают в кооперации с человеком, в особой среде или с изделиями имеющие специфические особенности, большинство данных приводов не способны обеспечивать безопасность, комфорт работы и целостность изделия.

Примером где обычные привода не всегда могут решить поставленную задачу это техническая диагностика. Техническая диагностика – область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов [1]. Задачами диагностики являются:

- контроль технического состояния изделия или оборудования;
- поиск места и определение причин отказа или неисправности;
- прогнозирование технического состояния.

Область технической диагностики, где применение типичных приводов может быть нерационально это визуально – оптический вид неразрушающего контроля. Он предназначен для обнаружения различных поверхностных дефектов материала деталей, скрытых дефектов агрегатов, контроля закрытых конструкций, труднодоступных мест механизмов и машин [2].

Одним из перспективных вариантов приводов, который может решить данную задачу – искусственные мышцы.

## Область применения и анализ существующих решений

При диагностике разбирать изделие не всегда имеется возможность или необходимость, для этого используется технический эндоскоп. Его основная задача – получить изображение из определенного места, к которому нет непосредственного доступа (либо он весьма ограничен), и передать это изображение на расстояние, необходимое для его комфортного просмотра и анализа.

Основные области применения эндоскопов:

- электроэнергетика;
- водоснабжение и канализация;
- металлургическая промышленность;
- авиационная и космическая промышленность;
- машиностроение;
- службы обеспечения безопасности, таможня;
- архитектура и строительство;
- газоперекачивающие станции;
- химическая и нефтехимическая промышленность;
- автомобильная промышленность;
- железнодорожный и морской транспорт;
- электронная промышленность;
- наука и образование.

Эндоскопы разделяются на жесткие и гибкие. Жесткий эндоскоп или бороскоп состоит из визуальной и осветительной системы. Визуальная система состоит из линзовой, стержневой или градиентной оптики, которая заключена во внутреннюю металлическую трубку. Осветительная система состоит из оптического волокна, которое расположено между двумя металлическими трубками: наружной и внутренней [6]. Диаметр данных эндоскопов находится в пределах от 1,7 до 10 миллиметров, а длина от 10 сантиметров до 1 метра. Его основное преимущество это высокая разрешающая способность.

Гибкий эндоскоп состоит из волоконной оптики, смонтированной внутри гибкой трубки с управляемым дистальным концом. Такой прибор используется для осмотра недоступных для жесткого эндоскопа мест. Основным недостатком

гибких эндоскопов по сравнению с жесткими является более низкая разрешающая способность и ограничения по длине связанные со свойствами оптоволоконна [4]. Диаметр данных эндоскопов находится в пределах от 1,7 до 10 миллиметров, а длина от 50 сантиметров до 3 метров.

Видеоэндоскоп это гибкий эндоскоп с возможностью передачи видеоизображения. В таком приборе оптоволоконный жгут заменен электронными компонентами, увеличивающими разрешающую способность и максимальную длину рабочей части. Полученное изображение может выводиться на штатный монитор или внешнее устройство. Диаметр данных эндоскопов находится в пределах от 5,5 до 10 миллиметров, а длина от 1 метра до 30 метров.

Но из-за того, что изделия имеют сложную геометрию, данные эндоскопы имеют ограничения в применении. На рисунке 1 представлен газотурбинный двигатель, где 1 – вентилятор, 2 – компрессор, 3 - камера сгорания, 4 – турбина.

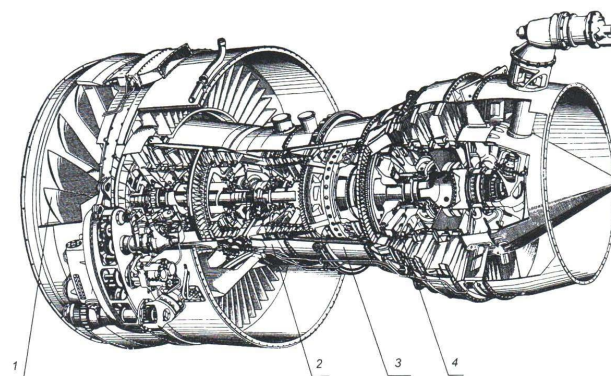


Рис. 1. Газотурбинный двигатель

Например, при диагностике камеры сгорания газотурбинного двигателя, показанного на рисунке 2, с помощью жесткого эндоскопа качественно обследовать возможно только внутреннюю часть жаровой трубы камеры сгорания, при этом без визуального осмотра остается внутренняя часть наружного корпуса и внутренний корпус диффузора. Гибкий эндоскоп может исследовать внутреннюю часть наружного корпуса и внутренний корпус диффузора, но зонд эндоскопа при работе будет задевать корпус жаровой трубы.

Для решения данной задачи предлагается создать эндоскоп с приводами, диаметр которого имеет размер 10 миллиметров, и длина от 1 до 3 метров.



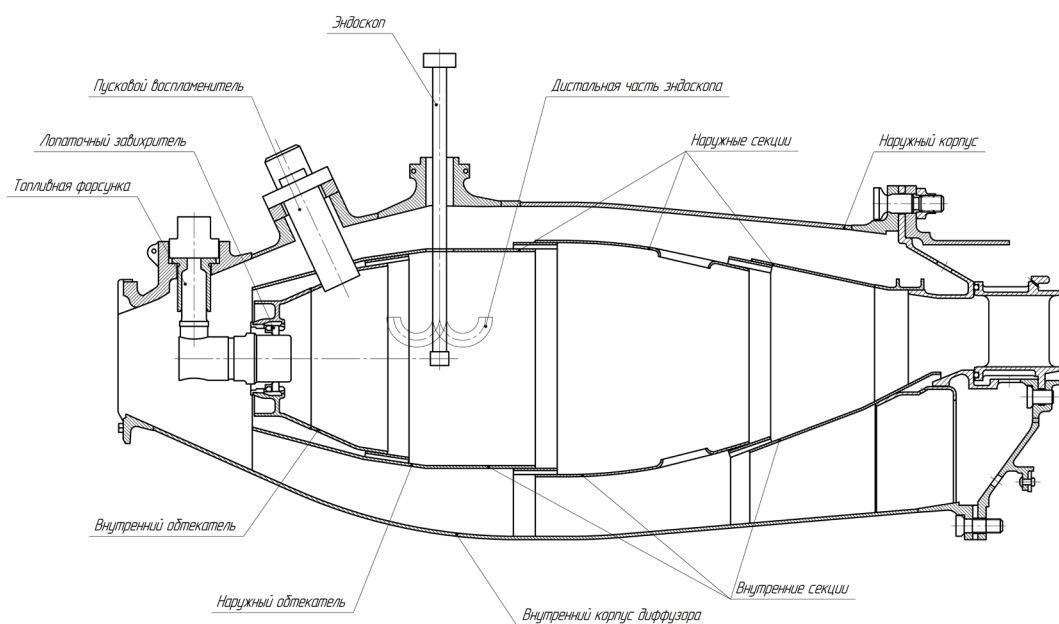


Рис. 2. Камера сгорания

### *Анализ существующих приводов*

Применение в эндоскопе электромеханического привода накладывает определенные ограничения. Во-первых, зонд должен быть жестким, что неприемлемо так как твердые части зонда во время перемещения могут повредить покрытие изделия. Во-вторых, чем длиннее зонд эндоскопа тем больше нагрузка на каждый привод, который дальше от головного модуля. Например, на рисунке 3 видно, что на привод который управляет головным модулем нагрузка меньше чем на привод  $N$ -го модуля.

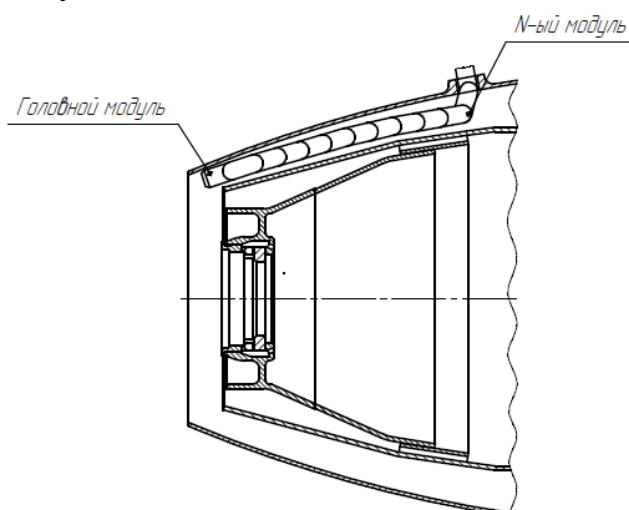


Рис. 3. Эскиз зонда с электромеханическим приводом

Другой вариант пневматический привод. Примером такого решения является манипулятор festo [5] представленный на рисунке 4.



Рис. 4. Манипулятор festo

Но данный привод требует большого свободного пространства для увеличения объема рабочих камер, чтобы изменить положение зонда эндоскопа, чего в изделии нет. К тому же, некоторые изделия могут изготавливаться и тонких листовых материалов, и при увеличении размеров камеры они могут изменить свою геометрическую форму, что неминуемо может привести к порче изделия.

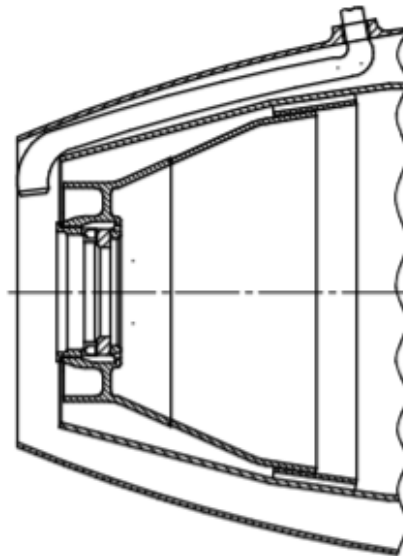


Рис. 5. Эскиз зонда с пневматическим приводом

Более рациональным решением данной задачи будет применение в зонде привода созданного на искусственных мышцах. Преимуществом данных привода является то, что при необходимости зонд на данных приводах может в зависимости от ситуации быть жестким или мягким, как целиком так и определенные его сегменты, а также возможность изменять свой диаметр. При этом он лишен недостатков электромеханического и пневматического привода. Это позволит проводить диагностику не повреждая изделие и не занимая дополнительного пространства.

### *Гибкий диагностический робот*

Для реализации приводов данного проекта предлагается использовать нити нейлона из-за их необычных свойств: при нагревании они уменьшаются в длине, но увеличиваются в диаметре. Это позволит использовать силу движения без дополнительных механических деталей, которые преобразовывают линейные поступательные движения в изгибы.

При реализации робота необходимо произвести расчеты: механические на жесткость и прочность, электрические и экономические.

Для прогнозирования работы робота необходимо составить аналитическую модель которая представляют собой отображение взаимосвязей между переменными объекта в виде дифференциальных, алгебраических или любых других систем математических уравнений, и структурную модель, которая представляет систему в виде совокупности элементов [3], а также совокупности необходимых и достаточных отношений между этими элементами и связей между системой и окружающей средой [3].

Архитектура системы управления состоит из: исполнительных органов, датчиков, системы управления. Особенность системы управления заключается в том, что при движении зонда каждый последующий элемент повторяет положение предыдущего постепенно его заменяя во время движения. Общий вид архитектуры системы управления представлен на рисунке 6.



Рис. 6. Общий вид архитектуры системы управления

Для получения информации о состоянии робота или внешней среды в роботе будут установлены датчики. Функционально органы очувствления роботов (мехатронных систем) – датчики – можно подразделить на два основных класса:

датчики внутреннего состояния и датчики внешнего состояния [7]. Датчики внутреннего состояния для данного робота включают датчики:

- состояния устройств;
- положения звеньев;
- внутренней диагностики.

Датчики внешней диагностики включают:

- системы технического зрения;
- тактильные датчики;
- силовые датчики.

### **Вывод**

В результате анализа были изучены области применения для промышленных эндоскопов, существующие решения для визуальной диагностики их достоинства и недостатки.

Проанализированы существующие типы приводов и выбран наиболее оптимальный – искусственные мышцы. Данный тип приводов может позволить произвести диагностику большей поверхности изделия, не принося вреда изделию.

Предлагается создать опытный образец гибкого диагностического робота с приводами типа искусственные мышцы, диаметр которого имеет размер 10 миллиметров, и длина от 1 до 3 метров, для проведения испытаний. Эндоскоп с искусственными мышцами может стать одним из решений в визуальной – оптической диагностике в нефтехимии, машиностроении, авиастроении и в других отраслях.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика: дата введения 26.12.89.
2. Визуально-оптический контроль качества изделий: методическое пособие по дисциплине «Не разрушающий контроль качества» для студентов специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». Ю. В. Василевич [и др.]. – Минск: БНТУ, 2013. – 47 с.
3. Воронин А.В. Моделирование мехатронных систем: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008 – 137 с.
4. <https://ntcexpert.ru/110-acenter/tekhnicheskie-endoskopy>
5. [https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/highlights-from-2010-to-2012/bionic-handling-assistant-id\\_33759/?siteUId=fox\\_us&siteName=Festo+USA](https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/highlights-from-2010-to-2012/bionic-handling-assistant-id_33759/?siteUId=fox_us&siteName=Festo+USA)
6. <http://aprioris.ru/about/blog/tehniceskij-endoskop.html>
7. Сырямкин В.И. Информационные устройства и системы в робототехнике и мехатронике: учеб. пособие. (Серия: Интеллектуальные технические системы). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. – 524 с.

УДК 621.7.08

А. П. ДАНИЛИН, Т. В. ПОЛЯКОВА

*artdanielin97@gmail.com, volk\_tasya@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. С. И. ФЕЦАК

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

**Аннотация.** Система регистрации технологических параметров сварки трением с перемешиванием призвана обеспечить высокое качество сварных швов за счет постоянного мониторинга и поддержания оптимальных значений технологических параметров, значительно сократить человеческий фактор во время проведения сварного процесса и прогнозировать показатели эксплуатационных свойств готовой конструкции. В статье рассмотрен порядок разработки системы регистрации технологических параметров сварки трением с перемешиванием.

**Ключевые слова:** система регистрации; технологические параметры; сварка трением с перемешиванием.

*Актуальность проблемы.* В настоящее время проблема изготовления качественного сварного шва в нефтегазовой отрасли занимает одну из ведущих позиций. Безопасность магистральных трубопроводов напрямую зависит от герметичного соединения отдельных труб. Согласно статистическим данным, аварии на магистральных нефтепроводах, происходящие из-за брака при строительстве составляют 37% от общего числа аварийных ситуаций, на конструктивные недостатки приходится 18% всех случаев. Следовательно, причиной более 50% аварий служат факторы, которые можно устранить до ввода оборудования в эксплуатацию.

*Цель научного исследования.* Разработка концепции системы мониторинга и регистрации технологических параметров сварки трением с перемешиванием (СТП) при помощи экспериментальной установки на базе консольно-фрезерного станка при использовании программной среды *LabVIEW* и программируемого контроллера *NI CompactRIO*.

*Разработка системы регистрации технологических параметров сварки трением с перемешиванием.* Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать экспериментальную установку на базе консольно-фрезерного станка *FSS-400* и измерительную систему для регистрации и записи полученной информации;

– определить оптимальные технологические параметры (скорость сварки, осевое усилие по оси *Z* и *X*) для обеспечения наилучшего качества сварного шва заготовок из стали марки Ст3;

– разработать концепцию системы мониторинга технологических параметров сварки трением с перемешиванием заготовок из стали Ст3.

*Анализ оборудования для проведения сварки трением с перемешиванием.*

Консольно-фрезерный станок *FSS-400* обладает мощным двигателем, большой частотой вращения шпинделя, значительным запасом прочности конструкции, массивной станиной, большим рабочим столом с регулируемыми клиновидными планками. Управление производится с подвесного пульта. Станок оборудован электромеханическими натяжными устройствами.

Разработанная сварочная оснастка облегчает и ускоряет процесс закрепления заготовок на оборудовании, на котором производились эксперименты по СТП (рисунок 1). Оснастка состоит из плиты и четырех вертикальных прижимов с усилием до 630кг, закрепляющих заготовки в процессе сварки. Заготовки устанавливаются в специальную рамку, которая крепится к плите, для того чтобы предотвратить их перемещение.

В зоне сваривания происходит образование высоких температур (температура плавления стали Ст3 (1300-1400)°С). С целью выбора датчиков силы и мест их расположения в рабочей области сварки использовался тепловизор марки *SAT HotFind V/L*. Выбор тепловизора марки *SAT HotFind V/L* обусловлен необходимостью работы с большим температурным диапазоном, возникающим в результате трения инструмента о поверхность заготовок из стали Ст3. Рабочий диапазон измерения температур тепловизора составляет от минус 20°С до плюс 1500°С.

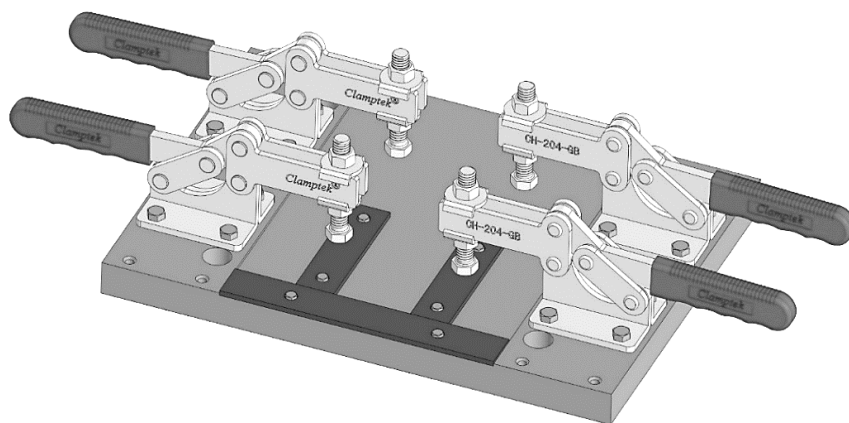


Рис. 1. Оснастка для СТП

В составе экспериментальной установки системы регистрации технологических параметров были использованы датчики силы модели *AC22*, усилитель заряда модели *AP5000*, шасси *NI CDAQ 9172*, модули *NI 9233* и *9234*.

Датчик силы модели *AC22* (рис. 2) предназначен для измерений динамических усилий. Он может быть использован как самостоятельно, так и в сочетании с виброиспытательными системами и вибропреобразователями при испытаниях различных конструкций и машинного оборудования. Рабочий диапазон температуры датчиков от минус 60 до плюс 150°C

Для усиления сигнала от датчика силы использовался усилитель заряда модели *AP5000* (рис. 3). Он предназначен для усиления и преобразования высокоимпедансного сигнала заряда пьезоэлектрических преобразователей в низкоимпедансный сигнал напряжения.



Рис. 2. Внешний вид датчика силы *AC 22*



Рис. 3. Внешний вид усилителя *AP 5000*

Шасси *NI CDAQ 9172* (рис. 4) с восемью слотами для системы *NI CompactDAQ* позволяет использовать модули ввода/вывода *C*-серии и работает

от постоянного напряжения (11–30)В. Подключение к компьютеру осуществляется через интерфейс *USB2.0*.

Модули NI 9233 и 9234 (рис. 5) – это четырех канальный модуль сбора динамических сигналов для высокоточных измерений, получаемых с датчиков.

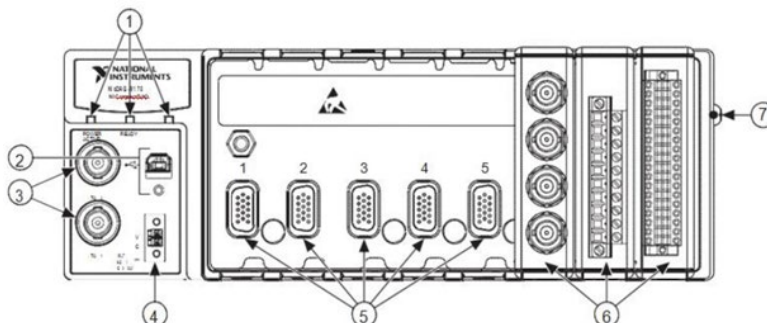


Рис. 4. Строение шасси:

1 – светодиоды состояния *POWER*, *READY* и *ACTIVE*; 2 – *USB*-разъем с ослаблением натяжения; 3 – *BNC*-разъемы *TRIG 0 (PFI 0)* и *TRIG 1 (PFI 1)*; 4 – разъем питания 9–30 *VDC*; 5 – слоты для модулей; 6 – установленные модули *C*-серии; 7 – винт заземления шасси



Рис. 5. Модуль входных сигналов

*Определение условий работы датчиков.* По результатам показаний тепловизора было установлено, что в зоне сварки заготовки могут нагреваться до 900°C, при этом максимальная рабочая температура датчиков 150°C. Следовательно, было принято решение о расположении датчиков силы непосредственно под плитой, в зоне наименьшего нагревания (рис. 6).

Было проведено тарирование датчиков силы. Для правильной интерпретации данных с датчиков была осуществлена тарировка датчиков с грузом. Для этого было проведено 20 измерений с помощью груза 100кг. По результатам графиков измерений определено, что значение датчиков при 100кг стабилизируется



за 2 секунды (средняя продолжительность, общая 4с.) при амплитудном значении напряжения 10мВ. Значит при давлении станком на датчики, например, 600кг, сила давления будет равна 6000Н, при этом напряжение будет равно 60мВ.

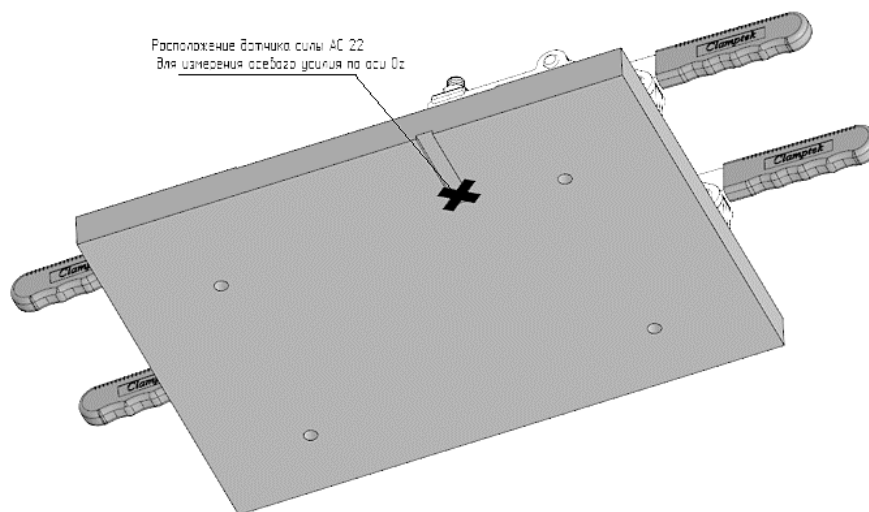


Рис. 6. Расположение датчика AC 22 на 3D модели

*Программное обеспечение.* Для обработки данных было выбрано программное обеспечение *LabVIEW*, совместимое с системой *NI CompactDAQ*. Программная среда содержит полный набор инструментов для сбора, анализа, отображения и хранения данных, а также инструменты, помогающие устранять неполадки в написанном коде. На рисунке 7 показана блок-схема для регистрации осевого усилия по оси Z в приложении *LabVIEW*.

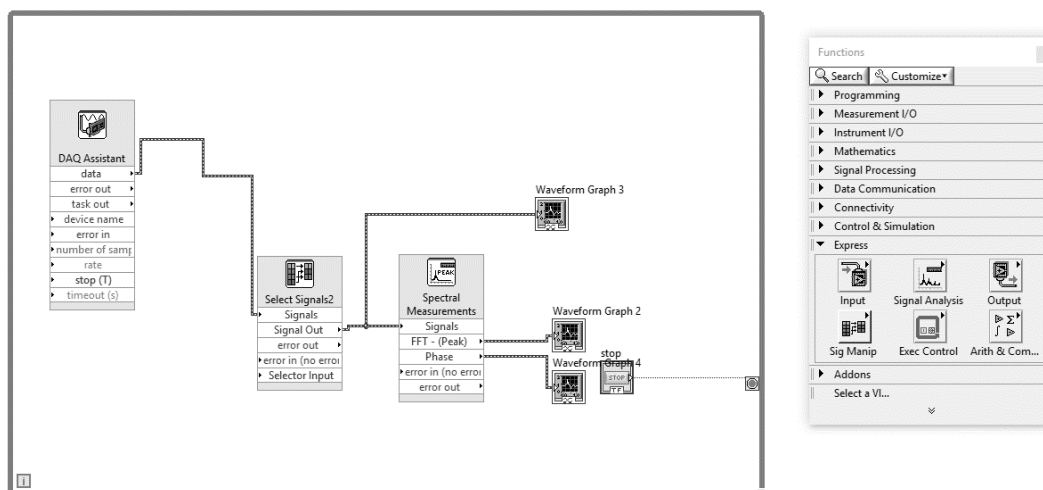


Рис. 7. Блок-схема для регистрации осевого усилия по оси Z в приложении *LabVIEW*.

Блок *DAQ Assistant* – прием данных с аппаратуры; блок *SelectSignals 2* – выделение сигнала датчика силы по Z; экспресс-ВП *SpectralMeasurements* определяет параметры частотного спектра сигнала; блок *Stop* – кнопка СТОП; *WaveformGraph 3* – блок окна графика временного процесса датчика силы; *WaveformGraph 4* – блок окна графика с пиковыми значениями по фазе; *WaveformGraph 2* – блок окна графика с амплитудными значениями напряжения

По результатам экспериментов было установлено, что у сваренных образцов наблюдался качественный сварной шов при поддержании следующих технологических параметров: частота вращения равная 560об/мин, скорость подачи 40м/мин, угол наклона инструмента  $1^\circ$ , величина заглубления 0,2мм и величина осевого усилия не менее 13000Н, можно производить СТП в автоматизированном режиме.

Такие технологические параметры, как частота вращения инструмента и скорость сварки, оказывают существенное воздействие на качество сварного шва. Тепловыделение в зоне сварки повышается с увеличением количества оборотов инструмента или уменьшением скорости перемещения его вдоль стыка.

Для измерения осевых усилий по осям  $X$  и  $Y$  предложено установить уголок из стального материала как показано на рисунке 8, предварительно производя фрезерование паза шириной 1,2мм и глубиной 3,2мм.

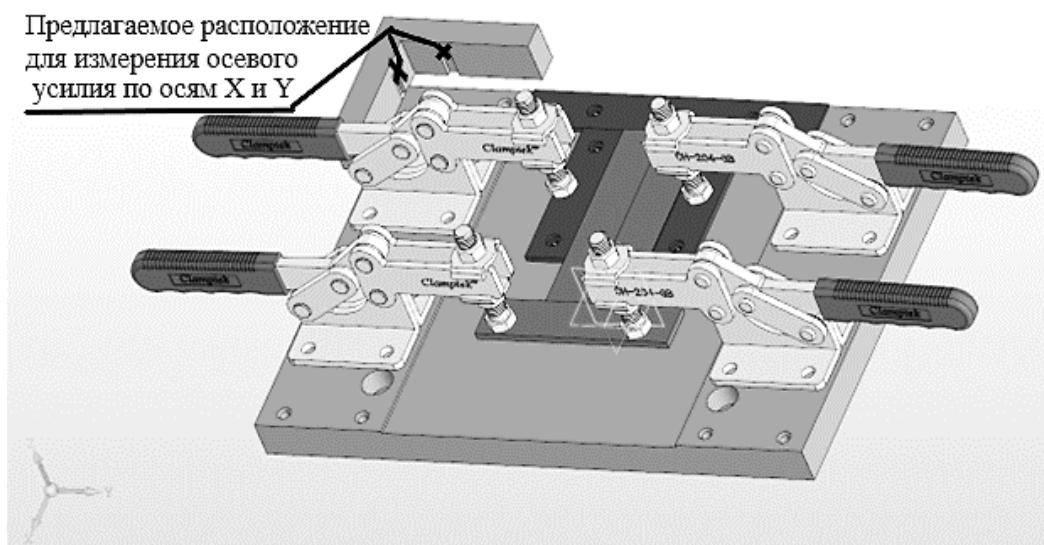


Рис. 8. Предлагаемое расположение датчиков силы по осям  $X$  и  $Y$

Измерение и регистрация перемещения по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  производились с помощью оптических линеек, которые подключены к компьютеру с помощью кабеля *USB*.

На основе полученных данных, было сформировано технологическое предложение. Регистрация скорости сварочного процесса происходит следующим образом: оптические линейки, расположенные по всем трем осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$

регистрируют координаты и время перемещения, по которым определена фактическая скорость сварки.

Система мониторинга осевого усилия может быть использована также для исключения слабого прижатия инструмента и предотвращения появления дефектов. Датчик силы, расположенный на станке *FS-400*, передает сигналы на усилитель заряда *AP-5000*, который подключен к модулю *NI 9233* и шасси *CompactDAQ* с модулем *cDAQ-9172*, с помощью кабеля *USB 2.0* подсоединенного к ноутбуку, на мониторе которого в программе *LabVIEW* можно наблюдать в режиме реального времени изменение амплитудных значений напряжения и тем самым поддерживать необходимое усилие для обеспечения качественного сварного шва.

На рисунке 9 показана экспериментальная установка.

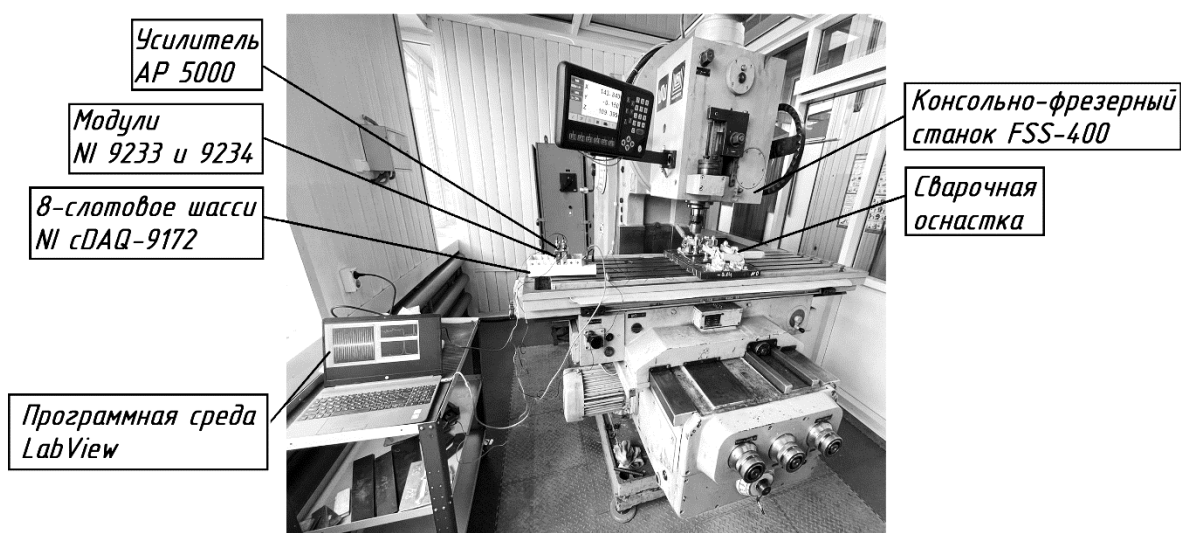


Рис. 9. Экспериментальная установка

На основании вышесказанного была построена принципиальная схема системы регистрации технологических параметров СТП (рисунок 10), которая отражает функциональную структуру автоматизированной системы.

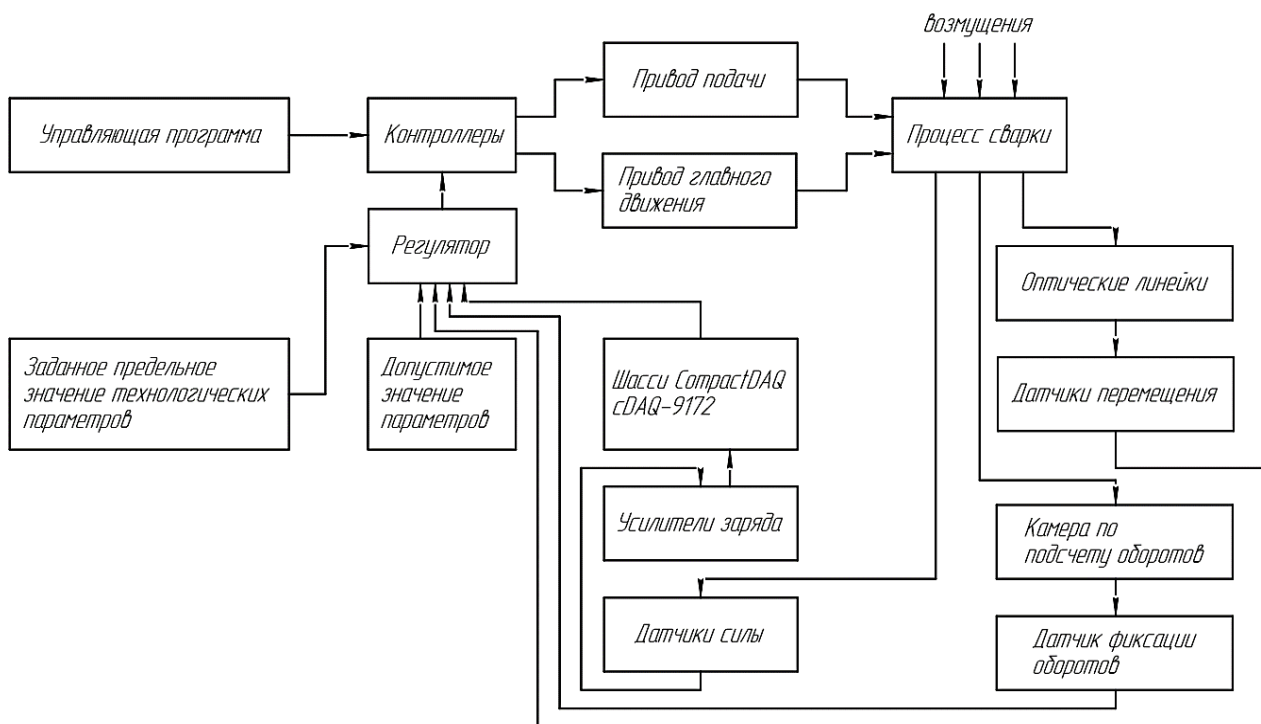


Рис. 10. Структурная схема концепции мониторинга системы регистрации технологических параметров сварки трением с перемешиванием

### **Вывод**

Сварка трением с перемешиванием производилась на консольно-фрезерном станке *FSS-400*. Для определения оптимального значения усилия по оси *Z*, датчик расположили под плитой, предварительно произведя фрезерование канавки шириной 1,2мм и глубиной 3,2мм. Данные с датчика передавались на модуль *NI 9234*, расположенный на шасси *NI CompactDAQ cDAQ-9172*. Данные с датчика отображены в программе *LabVIEW*, где в режиме реального времени осуществлялось построение графика амплитудных значений напряжения в процессе сварки.

На основании двух проведенных экспериментов было принято решение об увеличении осевого усилия по *Z* до значений не менее 13000Н. При анализе двух последующих образцов было замечено, что дефекты, которые отмечались ранее, отсутствовали. У образцов наблюдался качественный сварной шов. Благодаря этому можно сделать вывод, что при поддержании следующих технологических параметров: частоты вращения равной 560об/мин, скорости сварки 40м/мин, угол наклона инструмента равного 1°, величины заглубления 0,2мм и величине

осевого усилия не менее 13000Н, можно производить сварку трением с перемешиванием в автоматизированном режиме.

По результатам проведенных экспериментов была разработана система мониторинга технологических параметров при сварки трением с перемешиванием, а также определены оптимальные значения технологических параметров, обеспечивающих качественный сварной шов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Е. Филяков, М. А. Шолохов. Пути решения проблем оперативного прогнозирования качества сварных соединений магистральных трубопроводов. Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 1. С. 42–50.
2. Diogo Mariano Neto, Pedro Neto Numerical modeling of the friction stir welding process: a literature review. Department of Mechanical Engineering (CEMUC) - POLO II, University of Coimbra, 3030-788 Coimbra, Portugal.
3. National Instruments Corporation. Руководство пользователя USB-шасси NI CompactDAQ cDAQ-9171/9174/9178. Май 2013 372838D-01.1-2 с.
4. National Instruments Corporation. NI9233 Datasheet. Sound and Vibration Data Acquisition. 1-3с.
5. Д. Р. Гайсина, Я. В. Денисова. Анализ причин аварийных ситуаций на магистральных трубопроводах. Вестник технологического университета. 2016. Т.19, №14. 129-130 с.

УДК 621

С. А. ИСКАКОВ

*nice.romantic@mail.ru*

Науч. руковод. – д-р техн. наук Р. А. МУНАСЫПОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ**

*Аннотация.* Дан анализ направлений применения промышленных роботов в машиностроении и в других отраслях. Показаны требования, предъявляемые к промышленным роботам по производительности, надежности и точности позиционирования.

*Ключевые слова:* промышленные роботы, роботизированные технологические комплексы, горные разработки.

Промышленные роботы и манипуляторы являются одним из основных частей гибкого автоматизированного производственного оборудования. Роботизация механических сборочных работ может значительно повысить производительность труда и улучшить качество готовой продукции.

В настоящее время промышленные роботы и манипуляторы классифицируются по многим признакам и техническим характеристикам. Необходимо учитывать основные характеристики классификации: цель и объем; степень универсальности; кинематические, геометрические и энергетические параметры; методы и способы контроля. В зависимости от назначения роботы делятся на производственных, сервисных и роботов, используемых в исследованиях. В настоящее время разработкой и производством промышленных роботов занимаются более 400 компаний. Парк эксплуатационных роботов имеет тенденцию к росту, при этом около 58% роботов используются для сварки, около 45% - для обработки деталей, около 15% - для операций по сборке изделий и до 11% - для упаковки.

Сравнительный анализ использования роботов в производстве показывает, что наибольшее количество роботов используется в заготовительном и обрабатывающем производстве, а наименьшее количество роботов используется в сборочном производстве [2]. Анализ текущей ситуации и тенденций развития промышленных роботов показывает, что во многих экономически развитых странах

разработка и производство роботов постоянно расширяются. В настоящее время предпринимаются усилия по созданию переменных (модульных) конструкций, включая захватные устройства и другие части промышленных роботов.

Роботизации сборки и производства уделяется все больше внимания.

Затраты на сборку составляют 50% от технических затрат на продукцию, что связано с преобладанием ручного труда и использованием высококачественных рабочих. Благодаря бесперебойной работе сборочных машин, полуавтоматических машин и автоматизированных сборочных линий, обеспечивающих высокую производительность и качество сборки, возможности автоматизации сборки значительно расширились за счет использования универсальных и относительно простых в перенастройке роботов.

В процессе сборочных операций робот должен обладать высокой производительностью, надежностью и точностью позиционирования робота. Робот должен выполнять: точную ориентацию на месте сборки; правильное подключение и крепление сборочного узла; контролировать пригодность компонентов, используемых для сборки; контролировать относительное положение собранных компонентов; после доставки с места сборки для сборки сложных изделий необходимо обладать достаточно большой подвижностью роботов, высокой скоростью, возможностью автоматической замены захватных органов или сборочных инструментов, передовыми программными системами и роботами, которых легко обучать и перерабатывать.

Производство и выпуск современного оборудования развиваются в условиях массового производства. Следовательно, к промышленным роботам предъявляются такие требования, как быстрая адаптируемость, модульность, оборудование с датчиками, наличие и расположение деталей, а также универсальность захватных устройств [1]. В Соединенных Штатах некоторые роботы предназначены для сборки небольших узлов, на которые приходится 90% автомобильных деталей, а их точность позиционирования составляет менее 0,1 мм. Используя

этих роботов, неуправляемые части могут быть захвачены и перемещены в управляемые части

Вид расположения сборки. Более 23% промышленных роботов, производимых в США, Японии, Германии и Италии, используются для доставки деталей на сборочные площадки, разборки сборочных компонентов и выполнения простых сборочных операций. Большинство этих роботов имеют общую конструкцию, а количество степеней движения не превышает четырех.

Важным направлением является переход от использования уникальных роботов и манипуляторов к внедрению роботизированных комплексов для обеспечения адаптивности производства к изменяющимся рыночным условиям и сокращению производственных циклов. При создании такого комплекса необходимо учитывать роботов, связанных с подсистемами технического обслуживания, транспортировки и управления, а также изменять технический процесс на разных этапах производства, которые отвечают требованиям робототехники.

Таким образом, анализ текущей ситуации с использованием промышленных роботов в производстве показывает, что изготовители роботов непосредственно проводят научно-исследовательские и конструкторские работы по созданию роботов, манипуляторов и роботизированных комплексов различного назначения, в том числе наибольшее количество промышленных роботов используется при поставке сварочных и малярных работ. Производственные компании предоставляют потребителям комплексные профессиональные технологии. А в то же время, проблемы обеспечения надежности, точности и качества робототехники механической сборки и производства, а также выявление и расширение новых областей применения промышленных роботов, включая их использование в открытой и закрытой добыче полезных ископаемых

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подред.Ю.М.Соломенцева/ Проектирование технологии автоматизированного машиностроения/.М.: Высшая.школа.,1999.415с.
2. Бернадский В.Н., Маковецкая О.К.Промышленные роботы: состояние производства и применение.Технология машиностроения.2004.№5.



УДК 681.518

А. В. КИЗИЛОВ, Н. А. АКАТЬЕВ

*Artemkizilov75@gmail.com, nikitaakatev096@gmail.com*

Науч. руковод. – преп. Л. И. АЛЬМЕТОВА

*Уфимский колледж радиоэлектроники телекоммуникаций и безопасности*

## РАЗРАБОТКА МАКЕТА ДОМОФОНА

**Аннотация.** Поэтапное описание процесса создания макета домофона

**Ключевые слова:** домофон, Arduino, Multisim, Altium Designer, макет.

### **Введение**

Как же хочется, возвращаясь домой, зайти в чистый и уютный подъезд и не бояться, что там кто-то в углу поджидает тебя. Вот почему сегодня так много желающих не только многоэтажных, но и даже частных домов проявляют желание установить на внешних дверях такое полезное устройство как – домофон.

Те, кому не безразличен вид своего подъезда и пытаются его защитить от хулиганов, воров и любителей распития спиртных напитков на лестничной клетке устанавливают прочные железные двери, правда, с кодовым замком. Представьте себе, к примеру, что вы вызвали срочно скорую, а при этом сами живете на 9 этаже. Тогда вам надо спустить вниз и ждать врача на улице в жару и непогоду. Это разве удобно? Как же тогда избежать этого и сделать жизнь комфортней не только себе, но и дому?

Актуальность: Безопасность – важная часть в современном обществе и домофон является важной частью безопасности. Вот почему самый простой и, кстати, недорогой способ для этого является приобретение домофона и его установка. Домофон – это самый удобный способ сохранить чистоту дома и при этом легко попасть домой. Удобство этого устройства в том, что тут есть и кодовый цифровой замок, и чип-ключ, так что если вы даже забыли дома или на работе чип-ключ всегда можно воспользоваться кодом. Да и к тому же оборудование это имеет коммуникатор и можно открыть входную дверь, не выходя из своей квартиры.

Цель: спроектировать и создать работоспособный макет домофона с удаленным доступом.

Задачи:

- составить схему;
- развести шильд-плату в Altium Designer;
- собрать макет домофона на выбранных комплектующих;
- написать программу для домофона.

Практическая значимость: собранный макет обеспечит безопасность жизни и сохранение в целостности имущества человека внутри дома, а также обеспечение без ключевого доступа с помощью GSM-модуля.

Объект исследования: домофон.

Предмет исследования: полный процесс создания рабочего макета и программирование домофона.

Практическая часть

1. Первым этапом разработки является создание прототипа домофона на макетных платах (рис.1).

Составляющие макета:

- микроконтроллер Arduino uno;
- RFID-метка;
- LCD-дисплей;
- GSM-модуль;
- пьезо-динамик;
- сервопривод;
- матричная клавиатура в качестве блока вызова домофона;
- шильд-плата.

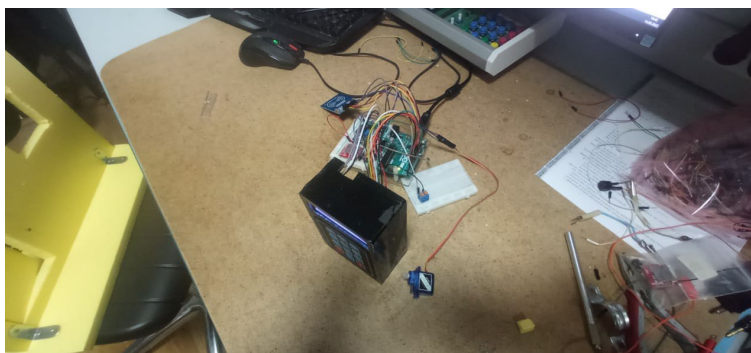


Рис. 1. Домофон на макетных планах

1. Вторым шагом было создание печатной платы (шильд-платы) в Altium Designer, который обеспечит компактность и надежность устройства (рис.2).

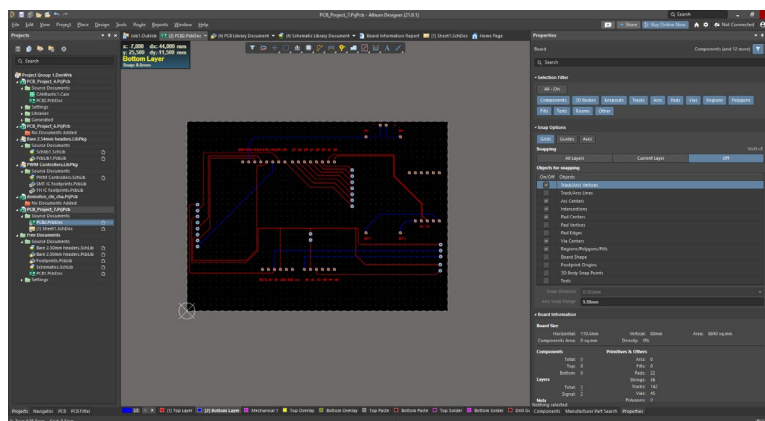


Рис. 2. Печатная плата

2. Далее последовало загрузка полученного gerber-файла и получение заготовки в сверлильно-фрезерном станке.

3. Следующим шагом было написание программы для микроконтроллера Arduino uno. Написанный программный код состоит из:

- инициализации сервопривода, RFID, GSM-модуля, матричной клавиатуры и LCD-дисплея;
- опроса клавиатуры, GSM-модуля, RFID;
- отправка информации доверенному контакту;
- открытие/запрет доступа по результату опроса.

5. Последним этапом является совмещение программной и макетной части проекта. После загрузки в микроконтроллер кода проверка функций показало работоспособность макета (рис.3).

Таким образом, был создан опытный образец домофона с без ключевым доступом.



Рис. 3. Готовый макет домофона

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максим Власов. RFID: 1 технология – 1000 решений: Практические примеры использования RFID в различных областях. — М.: Альпина Паблишер, 2014. 218 с. ISBN 978-5-9614-4879-5.
2. Кравченко В. Статья на сайте CODIUS «GSM-модуль SIM800L: самый полный мануал (на примерах с Arduino Uno)» - 2018 г.

УДК 681.5.01

Е. А. КОЗЛОВ

*geny.kozlov@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук Т. З. МУСЛИМОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФОРМАЦИЕЙ РОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Аннотация.* В данной работе рассмотрена актуальность применения беспилотных летательных аппаратов и преимущества использования их в группе. Приведен алгоритм управления формацией роя коптеров.

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат; формация; закон управления; матрица поворота; потенциал Морзе; центрост; связность.

В настоящее время наблюдается тенденция развития сверхлегких БПЛА в гражданском секторе. Использование беспилотных летательных аппаратов позволяет получать больше пространственных данных, и это оказывается ощутимым толчком для развития отрасли в целом.

Конструктивно БПЛА подразделяются на два типа: вертолетные (вертолеты, квадрокоптеры и др.) и самолетные. Первый тип применяется в основном для мониторинга небольших территорий, обследования сложных конструкций, а также лидарной съемки (лазерного сканирования). Они имеют малые размеры, увеличенную полезную нагрузку, может взлетать с любых площадок и зависать над объектом обследования. Второй тип применяется для мониторинга протяженных территорий, имеет высокую крейсерскую скорость, значительную дальность полета и автономность.

Использование роя коптеров позволит выполнять сложные задачи, которые выходят за рамки возможностей одного аппарата. В большинстве случаев в группе применяются коптеры вертолетного типа. Для решения комплексной проблемы может потребоваться более одного датчика, большая полезная нагрузка. Использование квадрокоптеров в качестве роя позволит одному устройству использовать возможности других. Таким образом производительность как каждого аппарата, так и группы возрастает.

Для решения проблемы управления формацией применяются подходы, использующие метод функций Ляпунова [1], [2], методы регулирования выходного сигнала [3], машинное зрение [4], [5], функции искусственного интеллекта и другие методы.

В данных тезисах описана наша работа по исследованию алгоритма управления формацией роя БПЛА вертолетного типа. Он включает в себя избегание препятствий на протяжении выхода коптеров в желаемую форму. Также нами изучались методики поворота коптеров в формации и отслеживания путевых точек.

Основой алгоритма являются законы управления, представленные в работе [6]. Цель управления для  $i$ -го квадрокоптера можно задать следующим образом при  $t \geq 0$ :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_j(t) - p_i(t) = \delta_{ji}$$

где  $\delta_{ji}$  – желаемое относительное расстояние между  $j$ -м и  $i$ -м коптерами;  $p_j(t) - p_i(t)$  – расстояние между  $j$ -м и  $i$ -м коптерами в момент времени  $t$ .

Поворот вокруг некоторой оси на желаемый угол выполняется с помощью матрицы поворота для  $N$ -мерного пространства. Повернуть можно всю систему (вектора  $p_i$ ) или только результирующий вектор  $\delta_{ji}$ .

Предотвращение столкновений реализовано по принципу потенциала Морзе. Сила отталкивания, действующая на  $i$ -ый коптер, рассчитывается как сумма всех сил, полученных от каждого коптера, попавшего в область определенного радиуса ( $\|r_{ji}\| \leq r_s$ , где  $r_{ji}$  – расстояние между  $j$  и  $i$  коптерами;  $r_s$  – радиус области безопасности для каждого коптера).

Для отслеживания траектории перемещения используется центроид роя. Он позволяет не задавать перемещение для каждого устройства в отдельности, а указать только желаемое положение центроида. Данная задача решается посредством использования ПД-регулятора.

Общий закон управления для  $i$ -го квадрокоптера имеет вид

$$u_i = u_i^f + u_i^r + u^t,$$

где составляющие  $u_i^f$  - управление формацией (включая поворот),  $u_i^r$  - избегание препятствий,  $u^t$  - отслеживание траектории.

В дальнейшем, предлагается добавить в модель связность (connectivity preservation) [7]. Данное свойство предполагает, что каждый коптер взаимодействует только с теми, которые попадают в область видимости камеры на борту. В работе [7] связанные квадрокоптеры перемещаются к центру окружности с наименьшим радиусом, содержащей эти квадрокоптеры. Таким образом роботы решают задачу «рандеву». Для выхода в определенную форму необходимо будет объединить алгоритмы формации и связности.

Подводя итоги, необходимо отметить, что управление формацией роя коптеров подразумевает выполнение не только задачи достижения желаемой формы. Также требуется предотвращать столкновения не только с внешними объектами, но и с другими коптерами, и отслеживать положение всей группы. Весь спектр задач накладывает серьезные ограничения. И несмотря на существующие методики управления, нет единственно верного решения. Требования по точности выполнения задач для конкретного типа работ отличаются, исходя из которых и будет подбираться методика расчета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. P. Desai, J. Ostrowski, and V. Kumar, "Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 6, pp. 905–908, December 2001.
2. P. Oğren, M. Egerstedt, and X. Hu, "A control Lyapunov function approach to multi-agent coordination," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 847–851, October 2002.
3. V. Gazi, "Formation control of a multi-agent system using nonlinear servomechanism," *International Journal of Control*, vol. 78, no. 8, pp. 554–565, 20 May 2005.
4. B. Fidan, V. Gazi, S. Zhai, N. Cen, and E. Karatas, "Single view distance estimation based formation control of robotic swarms," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 12, pp. 5781–5791, December 2013.
5. H. Yu, K. Meier, M. Argyle, and R. W. Beard, "Cooperative path planning for target tracking in urban environments using unmanned air and ground vehicles," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 541–552, April 2015.
6. M. A. Toksöz, S. Oğuz, and V. Gazi, "Decentralized Formation Control of a Swarm of Quadrotor Helicopters," *IEEE Int. Conf. Control Autom. ICCA*, vol. 2019–July, pp. 1006–1013, Jul. 2019.
7. Francis B. A., Maggiore M. *Flocking and rendezvous in distributed robotics*. – Springer International Publishing, 2016.

УДК 62-529

И. А. ШАБАЛИН

*alleasyu@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук М. Ю. ОЗЕРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЛОЧНОЙ КОТЕЛЬНОЙ

**Аннотация.** Объектом исследования является разработка энергоэффективной системы управления блочной котельной. Цель работы – приобретение и применение навыков в разработке энергоэффективной системы управления блочной котельной. Были проведены обзор и анализ способов повышения энергоэффективности блочной котельной. Был выполнен обзор существующих способов регулирования режимов работы БМК. Был проведен анализ работы блочной модульной котельной как объекта управления. Была разработана функциональная схема САУ подпиточным насосом и САУ температуры теплоносителя. Была разработана математические модели и исследованы САУ подпиточного насоса и САУ температуры теплоносителя. Был произведен выбор основного оборудования САУ подпиточного насоса и САУ регулирования температуры теплоносителя.

**Ключевые слова:** энергоэффективность; БМК; САУ.

В данной статье представлена система управления, способная восполнить тепловые потери при транспортировке теплоносителя потребителю даже в случае возникновения аварийной ситуации.

В ходе разработки системы управления блочной котельной, повышение ее энергоэффективности заключается в доставке потребителю требуемого количества тепла. Основные причины, по которым потребитель получает меньшее количество тепла: утечки теплоносителя и температура окружающей среды. При возникновении утечек теплоносителя транспортируется меньшее количество воды, следовательно, и тепла. При очень низкой температуре окружающей среды во время транспортировки теплоносителя большая часть его тепла уходит в атмосферу. Значит, необходимо разработать такую систему управления блочной котельной, которая будет способна восполнять и утечки теплоносителя, и потери тепла теплоносителя.

При возникновении утечек в трубопроводе падает давление теплоносителя. Регулирование давления теплоносителя будет осуществляться насосом. При регулировании его производительности будет использоваться метод частотного регулирования. [1]

Путем применения качественного регулирования температуры теплоносителя будут восполняться потери тепла теплоносителя при его транспортировке. [2]

Далее разрабатываются математические модели САУ режимов работы БМК для подпиточного насоса и температурой теплоносителя с целью автоматического подбора оптимальных параметров ПИД-регулятора для обеспечения высокой робастности систем.

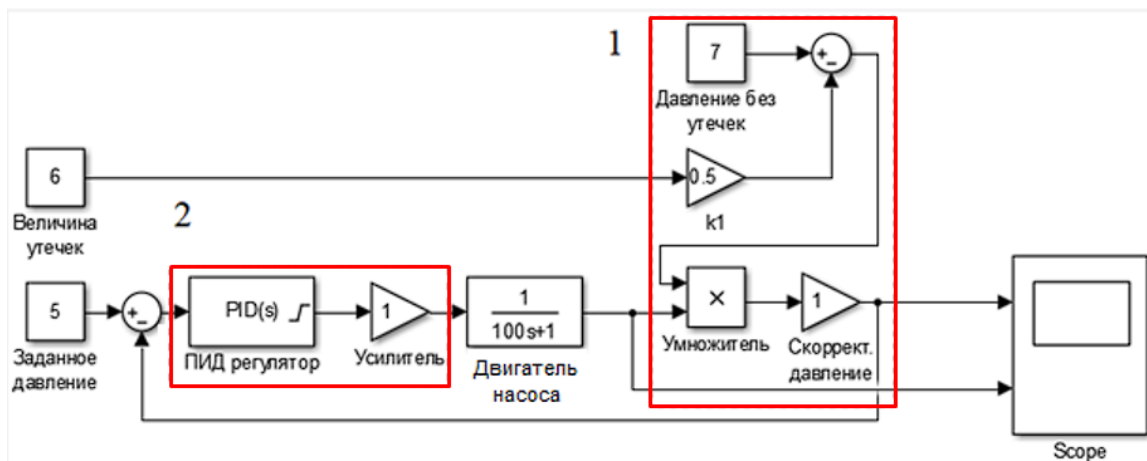


Рис. 1. Математическая модель САУ давлением теплоносителя.  
Контур №1 – насос; Контур №2 – контур регулирования частоты питания насоса

Описать работу данной математической модели можно следующей формулой:

$$P_H = P_0(1 - k_1 * G_{ym}) \quad (1)$$

где  $P_H$  – давление насоса;  $k_1$  – коэффициент величины утечек, характеризует воздействие утечек на давление теплоносителя;  $G_{ym}$  – величина утечек теплоносителя.

$$k_1 = \frac{P_0 - P_1}{G_{yt}} \quad (2)$$

где  $P_1$  – величина давления теплоносителя при утечках.

Далее приведен результат исследования математической модели системы управления подпиточным насосом.

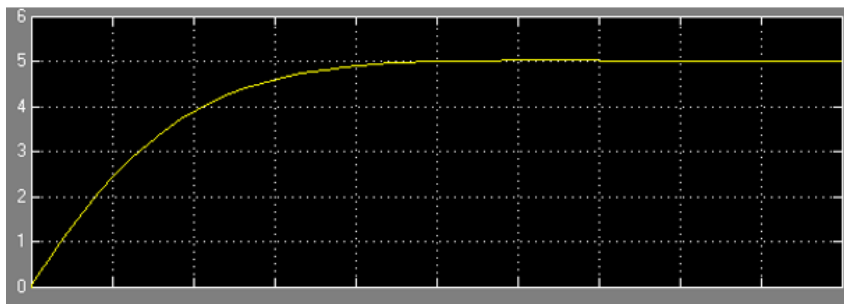


Рис. 2. Устойчивый процесс регулирования давления теплоносителя



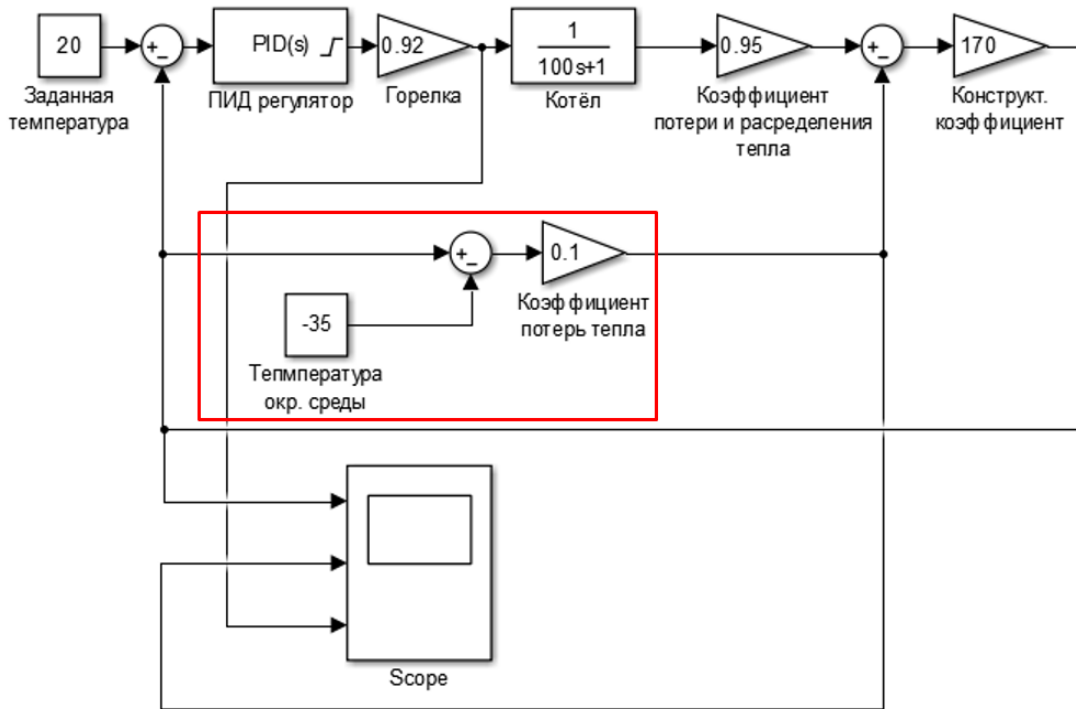


Рис. 3. Математическая модель САУ температурой теплоносителя

По результатам исследования математической модели системы видно, что первый график характеризует температуру помещения, второй величину возмущающего фактора (разница температур), а третий величину расхода газа.

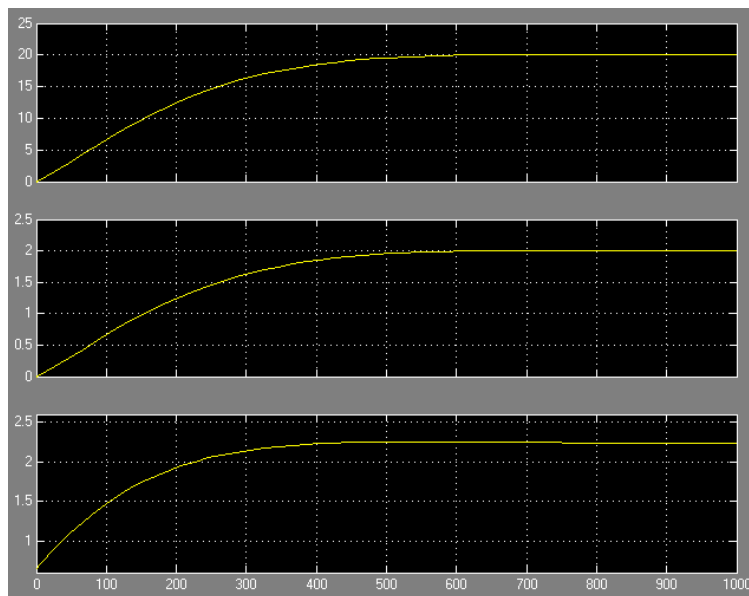


Рис. 4. Устойчивый процесс регулирования температуры теплоносителя

После проведенного исследования разработанных математических моделей САУ режимов работы БМК и установления оптимальных параметров работы

ПИД-регулятора осуществляется выбор основного (управляемого) и вспомогательного оборудования, а также программируемого контроллера (управляющий).

Основное оборудование:

- Горелка на природном газе 1 МВт СІВ Unigas P61M-.R.S.RU.A.1.50;
- Центробежный насос Pedrollo HFm 50A.

Вспомогательное оборудование:

- Датчик давления ПД100-ДИ;
- ПЧВЗ;
- Датчик температуры ДТС025М;
- Котел 1 МВт газовый.

В качестве управляющего оборудования был выбран отечественный ОВЕН ПЛК73, так как использование более сложного, высоко функционального и дорогостоящего контроллера здесь не требуется.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 А.В. Гордейчик, А.В. Попов, А.П. Усачев. Оценка эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов ВНС и КНС.
- 2 Основы централизованного теплоснабжения: Учеб. пособ. /А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. Самара: Самар. гос. техн. ун-т. 2007. 136 с.

## СЕКЦИЯ 2.4 МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 004

И. Р. ВАЛЕЕВ, А. А. РЫЖКИН, Э. С. МУХАМЕТЬЯНОВА  
*ilgam.valeev2015@mail.ru, alex.sandr00@bk.ru, elf.muh@gmail.com.*  
Науч. руковод. – канд. техн. наук Р. М. ЯНБУХТИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет.*

### РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В СИСТЕМЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**Аннотация.** Одними из основных источников потерь и ограничений в машиностроительном предприятии являются звенья производственных процессов, такие как металлорежущие оборудование и инструмент, нуждающиеся в постоянном контроле, диагностике и оптимизации режимов функционирования, при этом роль оборудования и инструмента в производственном процессе является решающей при формировании прибавочной стоимости продукции. В данной работе рассматриваются перспективы и возможности при внедрении цифровых двойников в систему машиностроительного производства.

**Ключевые слова:** «Индустрия 4.0»; «цифровой двойник»; машинное обучение; кибер-физические системы; цифровизация; машиностроение.

#### ***Введение***

Развитие информационных технологий в последние годы неразрывно связано с появлением новых тенденций и подходов к проектированию и организации производства. Важным переходным периодом стало появление концепции «Индустрия 4.0», основная идея которой заключается в цифровизации производства, повышении уровня автоматизации и изменении роли человека в производстве. Разработка и производство в кратчайшие сроки конкурентоспособной продукции нового поколения возможны сегодня с применением фабрик будущего (Factories of the Future) – систем комплексных технологических решений, ключевыми элементами которых становятся умные системы и цифровые двойники (Digital Twins) объектов/изделий/продуктов, производственных систем и технологических/производственных процессов.

Цифровой двойник – это взаимосвязь математических моделей характеризующих состояния оборудования, инструмента, технологических и бизнес процессов во времени. Разработка моделей осуществляется на основе анализа данных о фактическом работе оборудования с использованием современных методов машинного обучения (Machine Learning) и технологий больших данных (Big Data).

С помощью подобных моделей значительно расширяются возможности диагностирования и прогнозирования работы сложных систем. Таким образом, за счет применения цифрового двойника становится возможным сосредоточить основную долю изменений и затрат на стадии проектирования, что позволяет сократить издержки, возникающие на остальных этапах жизненного цикла.

Построение цифровых двойников является сложным процессом, требующим точного воссоздания поведения объекта или системы, что является невозможным в абсолютном виде. Степень приближенности модели к реальному объекту формирует понятие адекватности цифрового двойника, которая может определяться числом учитываемых параметров объекта, описанной логики и законов поведения объекта. Таким образом, даже простое описание объекта, например чертеж или 3D-модель изделия, уже является в некотором роде его цифровым двойником, но с низким уровнем адекватности. При этом уровень адекватности всегда будет ограничен, поскольку невозможно в полной мере описать какой-либо объект, так как существует бесконечное множество его параметров. Однако можно задать ограниченный набор параметров объекта, который будет необходимым и достаточным для решения конкретной задачи.

В виду сложности реального машиностроительного предприятия, можно говорить только о создании фрагмента цифрового двойника, основанного на информационной модели, состоящей из ограниченного набора данных, фактов, понятий или инструкций, и предназначенного для решения конкретной задачи. Таким образом, в зависимости от требований, предъявляемых к цифровым двойникам, одно и то же машиностроительное предприятие может иметь несколько

цифровых двойников, которые содержат соответствующие информационные модели, описывающие различные параметры и свойства объекта и отличающиеся уровнем адекватности в соответствии с заданными требованиями.

Рассмотрим этапы разработки и внедрения цифровых двойников. Разработка “цифровых двойников” осуществляется на базе модернизированных до кибер-физических систем (КФС) станков с ЧПУ, характеризующихся высокими адаптивными и интеллектуальными возможностями, ассоциативным восприятием информации и постоянным самообучением, автоматической оценкой текущего состояния и прогнозирования будущего. КФС способны автономно решать задачи оптимизации и принимать правильные решения на основе анализа многомерных данных, учитывая различные, зачастую скрытые факторы реального производства. Основные этапы получения “цифровых двойников”:

1. Выбор оборудования:

- Определяются основные задачи модернизации;
- Анализируется конструкция и компоновка станка с целью выявления мест размещения датчиков;

2. Размещение системы сенсоров:

- Определяется тип датчиков, их характеристики и количество;
- Определяется способ закрепления датчиков на узлах станка;
- Непосредственное развертывание системы датчиков на станке.

3. Подключение оборудования к сети промышленного интернета вещей (IoT):

- Подключение датчиков к пограничному устройству сбора и обработки данных (Edge);
- Криптографическая обработка данных;
- Передача данных в специальные хранилища с использованием проводных и беспроводных способов;

4. Сбор телеметрических данных:

- Запись сигналов с датчиков;

– Сбор дополнительной информации о технологическом процессе;

#### 5. Интеллектуальный анализ данных (Data Mining):

– Разведочный анализ данных. Выявление статистических свойств выборок;

– Выбор метода построения моделей (Random Forest, Support Vector Machines, Artificial Neural Networks);

#### 6. Автоматическое создание "Цифровых двойников"

– Построение взаимосвязей между моделями;

– Оценка параметров моделей и их диагностика;

– Выбор набора оптимальных моделей

Рассмотрим плюсы внедрения цифрового двойника:

##### *1) Интеллектуальная механическая обработка.*

Использование высокопроизводительных нейроморфных контроллеров на станках ЧПУ (программно-аппаратный модуль CPS Adaptive) позволяет реализовывать высокоточную диагностику процессов механической обработки и прогнозирование будущего технического состояния в режиме реального времени на основе данных системы сенсоров. При этом осуществляется интеграция «цифрового двойника» на аппаратном уровне реализуя принципиально новый вид адаптивных систем управления станками, оперативно реагирующих на все изменения в технологической системе.

##### *Возможности:*

– Оценка состояния узлов оборудования в режиме реального времени;

– Анализ степени износа инструмента в реальном времени;

– Прогнозирование технического состояния станка и инструмента (прогнозное обслуживание);

– Оценка степени общей эффективности производства (ОЕЕ) доступность, скорость, качество;

– Поиск ограничений в процессе обработки, а также устранение всех видов потерь;

– Отслеживание изменений в динамическом состоянии станка и корректировка режимов работы для обеспечения заданного качества и производительности (адаптивное резание);

– Интеллектуальное выявление и прогнозирование простоев и уровня загрузки оборудования;

– Поиск областей устойчивого резания в широком диапазоне режимов обработки.

## *2) Диагностика в режиме реального времени.*

Технология CPS Stream Analytic в составе модуля CPS Adaptive реализует интеллектуальный анализ потоковых данных и временных рядов от системы сенсоров станка ЧПУ. Данная технология позволяет осуществлять диагностику технического состояния ответственных узлов станка и процесса резания в режиме реального времени. В отличие от существующих систем диагностик, где используются сигналы и их пороговые значения от ограниченного количества датчиков, в предлагаемой технологии используется распределенная система сенсоров, учитывающая перестройки технологической системы на различных иерархических уровнях. С целью повышения точности диагностики были применены алгоритмы нелинейной динамики, позволяющие выявлять и прогнозировать фазовые переходы системы, тем самым автоматически корректируются правила классификации технического состояния оборудования.

Возможности:

– Диагностика в режиме реального времени ответственных узлов станка;

– Диагностика стабильности процесса механической обработки и износа режущего инструмента;

– Автоматическое формирование отчетов о состоянии технологической системы;

– Оперативное уведомление технических служб о неисправностях;

– Предотвращение поломок и перегрузок оборудования.

## *3) Прогнозное обслуживание.*

Технология CPS Predict Service в составе модуля CPS Adaptive, позволяет осуществлять постоянный сбор и интеллектуальный анализ многомерных данных о техническом состоянии оборудования для предсказания технического состояния станочного парка. Данный подход является основой для реализации на производстве концепции прогнозного обслуживания с целью замещения планового обслуживания и обслуживания пофакту. Таким образом в значительной степени снижается процент незапланированных простоев оборудования и количество неостребованных сервисных операций, а также повышается общая эффективность использования оборудования (ОЕЕ).

*Возможности:*

- Прогнозирование остаточного ресурса ответственных узлов оборудования;
- Автоматическое планирование профилактического обслуживания;
- Формирование отчетов и корректировка производственного плана в соответствии с текущим и будущим техническим состоянием;
- Оперативная связь с сервисными службами напрямую со стойки ЧПУ.

#### *4) Интеллектуальная технологическая подготовка.*

Применение технологии “цифровых двойников” совместно с САМ системами предприятия (программно-аппаратный модуль CPS Opty CAM) и ПО для верификации УП для систем ЧПУ, позволяет осуществлять высокоточную оптимизацию режимов обработки с учетом динамических особенностей технологических систем механической обработки, их естественного износа и переменной жесткости. Таким образом достигается максимальная производительность и качество обработки на конкретном оборудовании. Широкие интеллектуальные возможности позволяют осуществлять прогноз стойкости инструмента и качества получаемых поверхностей на всем протяжении механической обработки.

*Возможности:*

- Отладка технологических цепочек на “цифровых двойниках” реального оборудования и инструмента;



– Оптимизация режимов обработки и управляющих программ ЧПУ, для обеспечения заданного с учетом динамических особенностей конкретного оборудования и инструментальной наладки, фактического износа и функциональных ограничений;

– Выявление узких и опасных мест при обработке сложных деталей с использованием математического моделирования процессов механической обработки;

– Оптимизация себестоимости операций за счет управления стойкостью инструмента и производительностью оборудования в различных точках рабочего пространства станка без потери качества.

#### *5) Интеллектуальное планирование производства.*

Интеграция технологии “цифровых двойников” в системы автоматизированного планирования и подготовки производства (программно-аппаратный модуль CPS Cyber Planning), позволяют выявлять оптимальные технологические цепочки и даты запуска продукции. При этом осуществляется автоматическая оценка норм производства для каждой технологической операции, а также оценка вероятностей простоя оборудования. Таким образом происходит определение оптимальных буферов времени производственных циклов, выявление ограничений и потерь.

#### *Возможности:*

– Корректировка технических и экономических норм производства с учетом фактического и будущего состояния ресурсов предприятия, расчет экономически обоснованных буферов времени производственных циклов изделия;

– Укрупненное и детальное планирование производственных процессов, оптимизация календарного плана предприятия с учетом фактического состояния оборудования и реальных производственных мощностей;

– Полный контроль над производственными процессами и незавершенным производством;

- Интеллектуальный анализ жизненного цикла инструмента и оборудования, предотвращение поставок контрафактной продукции;
- Автоматическое выявление ограничений и потерь в производственных цепочках.

#### *б) Диалоговый модуль.*

Возможности технологии “цифровых двойников” и алгоритмов Data Mining, позволяют выявлять скрытые зависимости и аномалии в больших массивах производственных данных. Такая возможность способствует непрерывному обучению и улучшению качества статистические моделей оборудования и инструмента на всем протяжении их жизненного цикла. С целью классификации новых данных, используется уникальный диалоговый модуль (экспертная система) формирующий автоматические запросы соответствующим специалистам подразделений завода. Тем самым достигается постоянный поиск и обмен знаниями как между кибер-физическими системами (мультиагентное обучение), так и между оборудованием и человеком.

#### *Возможности:*

- Работа в двустороннем экспертном режиме;
- Получение рекомендаций при принятии инженерных и управленческих решений по выбору оптимальных параметров производственных процессов;
- Анализа и поиска последовательностей событий в производственных процессах при гибридной обработке;
- Группирование событий и состояний процессов 3D печати и механической обработки.

#### *Модель*

В данной работе для наглядности приведем процесс внедрения цифрового двойника на примере процесса обработки материала Сталь 12X18H10T. Для этого проведем эксперимент. В качестве обрабатывающего центра возьмем токарный станок модели 16K20 с бесступенчатым регулированием привода главного движения и двигателем на отдельном фундаменте. В качестве режущего инструмента - резцы токарные с режущей частью из твердого сплава T15K6. Для

определения вибрации при резании установим на резцы акселерометры пьезоэлектрические расположенные в трех осях ( X, Y, Z) с рабочей частотой 1... 15 000 Гц. Для преобразования данных используем аналого-цифровые преобразователи National Instrument с частотой дискретизации до 52 кГц. Для вывода данных используем ПК со специальным ПО. Схема проведения эксперимента приведена на Рисунке 1.

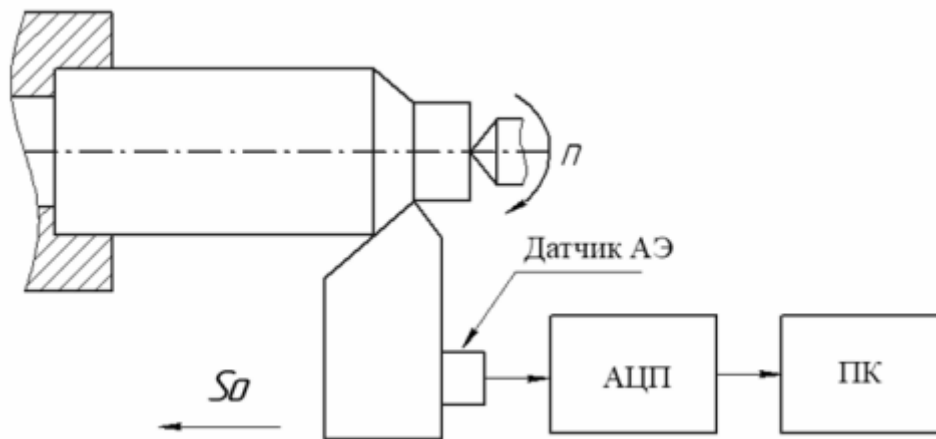


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

### Результаты

В ходе проведения эксперимента получили данные, представленные на Рисунке 2.

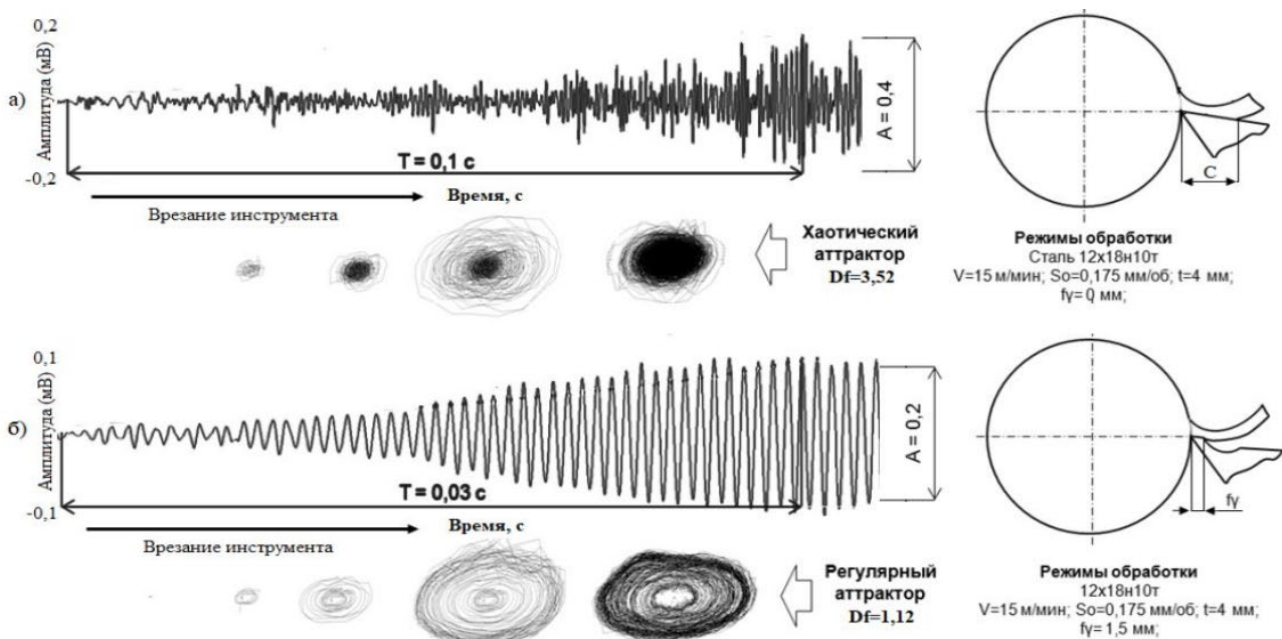


Рис. 2. Вибрация при резании материала Сталь 12X18H10T

Как видно из приведенных данных, при увеличении толщины срезаемого слоя вибрации усиливаются, что приводит к большему износу режущей части инструмента.

При более детальном анализе полученных результатов можно сказать, что внедрение «цифрового двойника» можем оптимизировать режимы и условия обработки.

### ***Заключение***

Подводя итог можно делать вывод о том, что применение современных инновационных технологий, таких как цифровой двойник целесообразно на крупных предприятиях, которые желают поддерживать определенно высокий уровень конкурентоспособности и отвечать всем требованиям современного быстроразвивающегося рынка.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки. *Сб. тр. науч.-практ. конф. «Цифровая трансформация экономики и промышленности»*. СПб., СПбПУ, 2019, с. 234–245.
2. Манцоров С., Шатагин Д., Туманов А. Сб.тр.науч.-практ. конф. «Цифровая трансформация». НГТУ, 2021:<https://youtu.be/bMcb8AL1qeA>.
3. Cimino C., Negri E., Fumagalli L. Review of digital twin applications in manufacturing. *Comput. Ind.*, 2019, vol. 113, art. 103130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>.
4. Kutin A.A., Dolgov V.A., Kabanov A.A., et al. Competitive-resource information model of the machine building manufacturing system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2018, vol. 448, art. 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012008>.
5. Долгов В.А., Кабанов А.А. Основные подходы к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия. *Автоматизация. Современные технологии*, 2018, т. 72, № 4, с. 178–184.
6. Grigoriev S.N., Sinopalnikov V.A., Tereshin M.V., et al. Control of parameters of the cutting process on the basis of diagnostics of the machine tool and workpiece. *Meas. Tech.*, 2012, vol. 55, no. 5, pp. 555–558. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9999-6>.

УДК 658.51

Ш. Б. ЛАТЫПОВ

*jackreacher1923@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, ст. преп. А. Ю. НАЗАРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## DATA SCIENCE В УПРАВЛЕНИИ ПРЕДПРИЯТИЕМ

**Аннотация.** В статье автор рассматривает роль, методы, инструменты Data Science в управлении современным предприятием.

**Ключевые слова:** Data Science, производство, промышленность, управление, внедрение.

Data Science – это область знаний о методах анализа данных и извлечении из них ценной информации. В последние годы Data Science внедряется промышленными предприятиями многих стран мира. Также сегодня мы видим, как Data Science имеет важное прикладное значение в медицине, клиентском сервисе, управлении государством, кибербезопасности и аэрокосмической отрасли. Среди всего это многообразие применения Data Science видное место занимает промышленное производство, где критически важной является концепция точно в срок (ТВС). За последние 100 лет промышленность прошла через несколько индустриальных революций. В настоящее время мы живем в эпоху четвертой промышленной революции, где данные от промышленных станков, машин, оборудования и товаров собираются и систематизируются для воплощения концепции ТВС: «Производить необходимое количество товаров требуемого качества в нужное время». Можно задаться вопросом: «Почему концепция ТВС так важна для промышленного производства?» Ответ довольно очевиден, ведь сокращение издержек при производстве товаров делает их более доступными для широкого круга потребителей.

Data Science в промышленном производстве является хорошим подспорьем при проведении технического обслуживания машин, анализе качества продукции, производственной охране труда, прогнозировании рисков, анализе KPI и т.п. [1]

Как известно, простои в производстве обходятся очень дорого. Если в 2014 году в среднем часовой простой предприятия обходился экономике США в \$164000, то в 2016 году такой же простой стоил \$260000. [2] Это влечет за собой развитие технического обслуживания и ремонта по техническому состоянию (ТОиР по ТС), которое направлено на устранение недостатков предшествующей ей стратегии планово-предупредительных ремонтов (ППР) [3], а именно снижение количества нерациональных ремонтных воздействий с целью максимального использования ресурса оборудования. При реализации данной стратегии датчики контролируют состояние оборудования, прогнозируя и определяя отказы и поломки.

Компьютерное зрение сегодня позволяет сканировать детали, находя в них дефекты. Ранее этим занимался человек. Технологии искусственного интеллекта, такие как CNN, RCNN и Fast RCNN, доказали свою эффективность, быстроту и надежность в выявлении всевозможных дефектов, что существенно снижает себестоимость продукции.

Прогнозирование будущих трендов продаж всегда помогает оптимизировать ресурсы в целях увеличения прибыли. В промышленности знание об объемах выпуска продукции позволяет оптимизировать цепочки поставок и рабочую силу. Различные методы анализа продаж варьируются от линейных регрессионных моделей (ARIMA) до более сложных моделей LSTM.

Продукция, сходящая с конвейера, обязательно подвержена контролю качества. Статистический метод контроля наиболее распространен в производстве. Задача статистического управления процессами - обеспечение и поддержание процессов на приемлемом и стабильном уровне, гарантируя соответствия продукции и услуг установленным требованиям.

В качестве примера такого управления могут служить X-столбчатые диаграммы Шухарта.

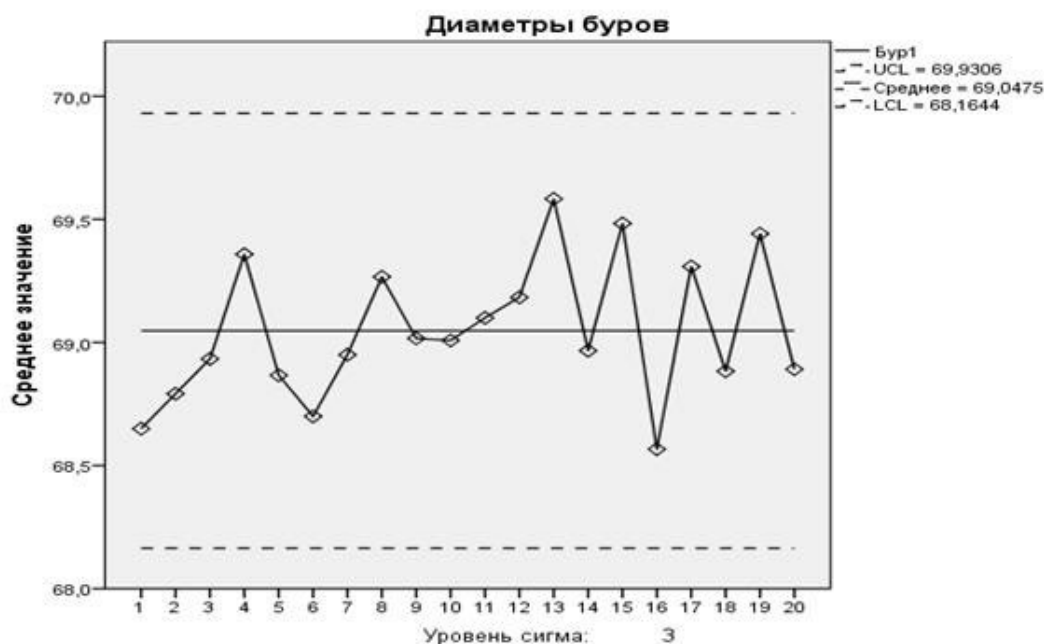


Рис. 1. Карта средних значений (X-карта)

К примеру, рассмотрим процесс производства ледовых буров. Изделия производились в течение 20 дней по 6 изделий в день. Контролируемой характеристикой является диаметр бура, который должен быть равен  $69 \pm 1$  мм. В качестве нижней и верхней границ спецификации заданы значения 68 и 70 мм соответственно. Исходя из вышеприведенной диаграммы, можно сделать вывод о том, что процесс находится в статистически управляемом состоянии, так как точки не выходят за пределы верхней и нижней линий, а также не наблюдается тренда к нарушению стабильности процесса. Следовательно, все буры были произведены в соответствии с техническими требованиями.

Датасаентист на производстве использует разнообразный набор инструментов на каждом этапе проекта:

- 1) Инструменты бизнес-аналитики (Business Intelligence) – набор технологий для обработки и визуализации данных о состоянии бизнеса. Наиболее известные приложения: R markdown & Jupyter, PowerPoint.
- 2) Проверка концепции (Proof of concept) – иллюстрация практической реализации проекта (R, Python, SQL).
- 3) Оркестровка контейнеризированных приложений (Kubernetes, Docker).

По оценкам аналитической компании Mordor Intelligence в 2020 году в США, большие данные в промышленном производстве оценивались в \$904,65 млн., а в 2025 году эта цифра составит 4,5 млрд. долларов. [4]

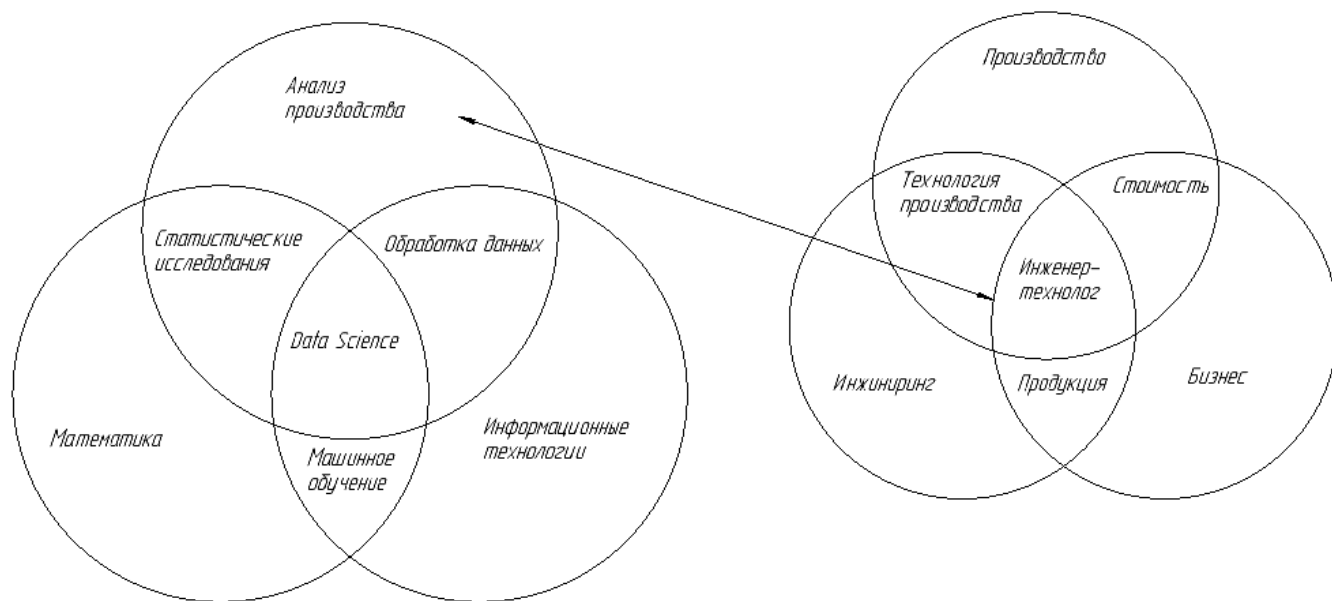


Рис. 2. Взаимосвязь Data Science с производством

Каждая новая проблема на производстве отчасти уже имеет решение, но никогда не находятся совершенно одинаковые шаблонные решения. Современный инжиниринг включает в себя как машинное обучение, так и имитацию производственных процессов. Надо понимать, что Data Science является одним из методов реализации концепции ТВС. С учетом стремительного внедрения аналитики больших данных на производстве можно ожидать, что в обозримом будущем человечество вступит в новый технологический уклад, а товарное изобилие станет доступными для каждого жителя планеты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. iiot-world.com [Интернет-ресурс] <https://iiot-world.com/connected-industry/what-data-science-actually-means-to-manufacturing/>
2. swiftsystems.com [Интернет-ресурс] <https://swiftsystems.com/guides-tips/calculate-true-cost-downtime/>
3. ГОСТ 18322-2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения»
4. “Big Data Analytics in Manufacturing Industry Market — Growth, Trends, and Forecast (2020–2025),” Mordor Intelligence, 2020.



УДК 621.7.015

Ш. Б. ЛАТЫПОВ, Р. Р. АМИНЕВ

*jackreacher1923@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. И. И. ЯГАФАРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ В ЛОПАТКАХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

**Аннотация.** Авторский коллектив в данной статье исследует влияние режимов электроэрозионной обработки на качество поверхности

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, турбинные лопатки, отверстия, электрод-инструмент.

Современное авиадвигателестроение предъявляет высокие требования к изготовлению деталей из жаропрочных сплавов, потому что наиболее ответственные детали ГТД, такие как лопатки турбинные, работают в экстремальных условиях при температурах близких к температуре плавления сплава. Для повышения эксплуатационных свойств в лопатках ГТД конструктивно предусматриваются различные полости, щели, отверстия для охлаждения детали. В одной лопатке может насчитываться до 400 охлаждающих каналов. [1] Очевидно, что обработка элементов лопаток традиционным механическим способом не всегда представляется технологически возможной, поэтому имеет смысл обратить внимание на альтернативные способы. В связи с массовостью лопаток в газотурбинном двигателе возникает задача высокопроизводительной обработки отверстий малых диаметров с требуемым высоким качеством, поэтому существующую проблему обработки глубоких отверстий малых диаметров в жаропрочных сплавах целесообразно решать при помощи метода электроэрозионной обработки.

Перед авторским коллективом данной статьи ставилась задача выбрать наиболее оптимальный режим обработки отверстий турбинной лопатки с точки зрения производительности, износа электрода-инструмента и качества обработанной поверхности.

Сложность задачи в изготовлении охлаждающих отверстий заключается в количестве (12), глубине (около 300 мм) и диаметре (наименьшее отверстие 0,9 мм) отверстий.

Для того чтобы произвести обработку отверстия с высокой точностью и качеством, необходимо рассчитать погрешность позиционирования. В нашем случае точность станка, точность приспособления, погрешность установки, точность изготовления поверхности закрепления являются суммой слабо взаимосвязанных величин, каждая из которых вносит малый вклад относительно общей суммы, соответственно, центрированное и нормированное распределение такой величины стремится к нормальному распределению [2].

Формула для расчета погрешности позиционирования представлена ниже:

$$\Delta\Sigma = \sqrt{(K_{уз}\Delta_{уз})^2 + (K_{уп}\Delta_{уп})^2 + (K_{ст}\Delta_{ст})^2},$$

где  $K_{уз}$  – коэффициент, зависящий от формы кривой распределения составляющей погрешности для установки заготовки;  $\Delta_{уз}$  – погрешность установки заготовки;  $K_{уп}$  – коэффициент, зависящий от формы кривой распределения составляющей погрешности для установки приспособления;  $\Delta_{уп}$  – погрешность установки приспособления;  $K_{ст}$  – коэффициент, зависящий от формы кривой распределения составляющей погрешности для станка.

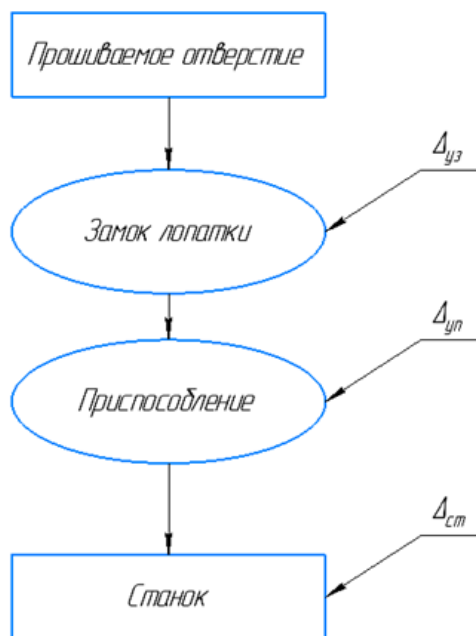


Рис. 1. Структурная схема погрешности позиционирования

Далее необходимо было проработать схему крепления детали к приспособлению. Исходя из конструкции детали, предпочтительный вариант крепления –

это замковая часть, на ней есть две поверхности, выполненные с высокой точностью. Была выбрана верхняя поверхность, так как губки данной формы просты в изготовлении, а площадь соприкосновения губок и замка максимальна.

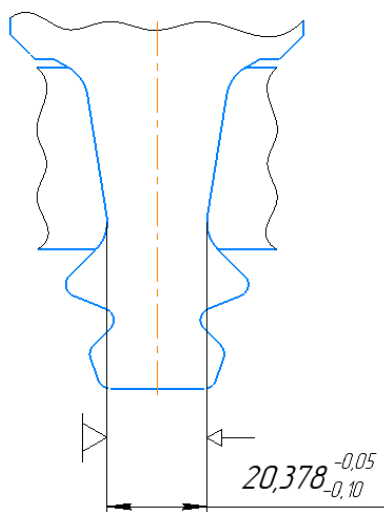


Рис. 2. Способ крепления детали

Далее была произведена отработка режимов резания на станке. В таблице 1 приведены полученные результаты.

Таблица 1

Технологические режимы обработки

№РР	$T_{on}$	$T_{off}$	$i_p$	Время прожига, сек	Износ ЭИ, мм	Среднее время, сек	Средний износ, мм
1	5	4	7	25	12	23,67	10,67
				23	10		
				23	10		
2	6	4	6	31	8	28,67	8,33
				28	8		
				27	9		
3	5	3	6	30	9	29,67	8,33
				29	8		
				30	8		
4	5	4	6	31	9	30,67	8,67
				30	8		
				31	9		
5	5	4	5	32	8	33,33	8,33
				33	9		
				35	8		
6	4	4	6	35	8	36,33	8,33
				35	8		
				39	9		
7	5	5	6	38	8	38,33	8,33
				40	8		
				37	9		

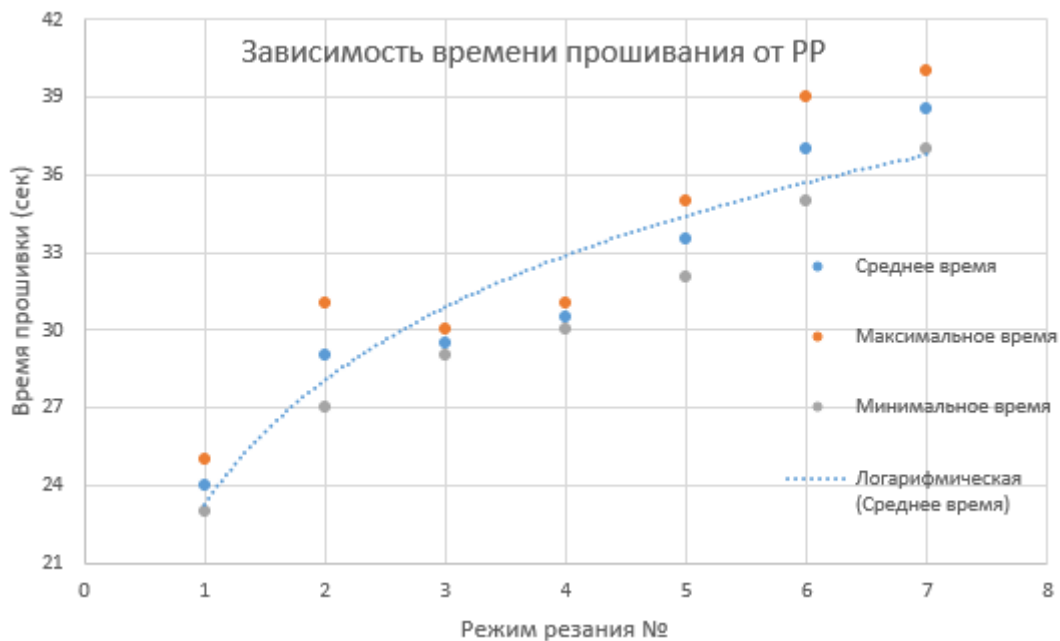


Рис. 3. Зависимость времени прошивки от режима резания

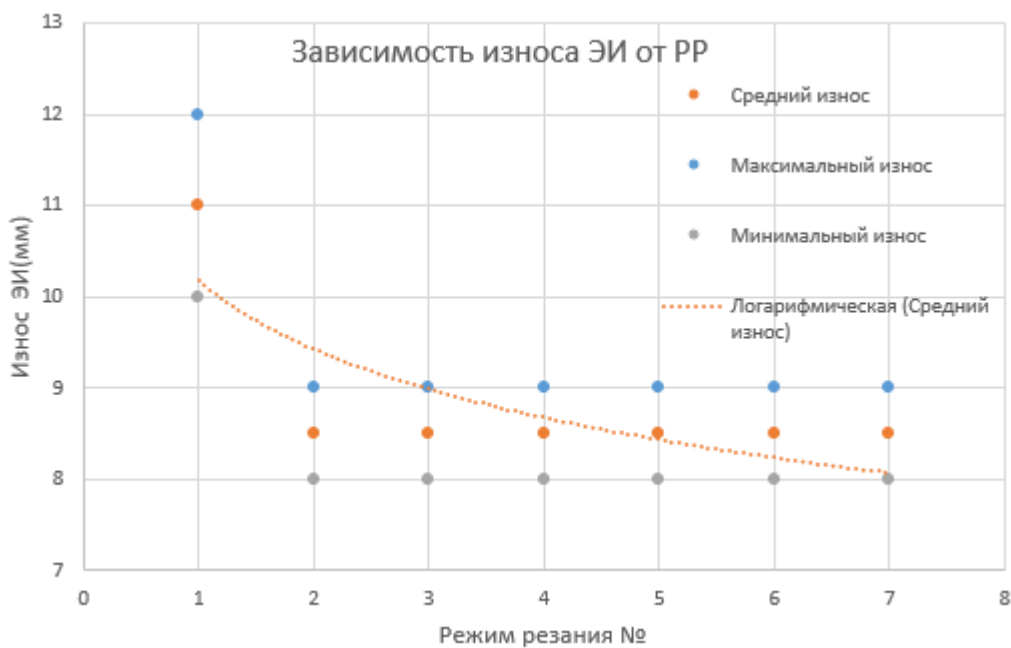


Рис. 4. Зависимость износа инструмента от режима резания

На рисунках 5 и 6 видно, что при прошивке отверстий на верхней кромке образуется дефектный слой, и при различных режимах размер дефектного слоя отличается. Исходя из визуального осмотра, мы определяем, что наихудшим дефектным слоем обладают отверстия, полученные на режимах резания №7. Минимальный дефектный слой при режимах №3 и №6.

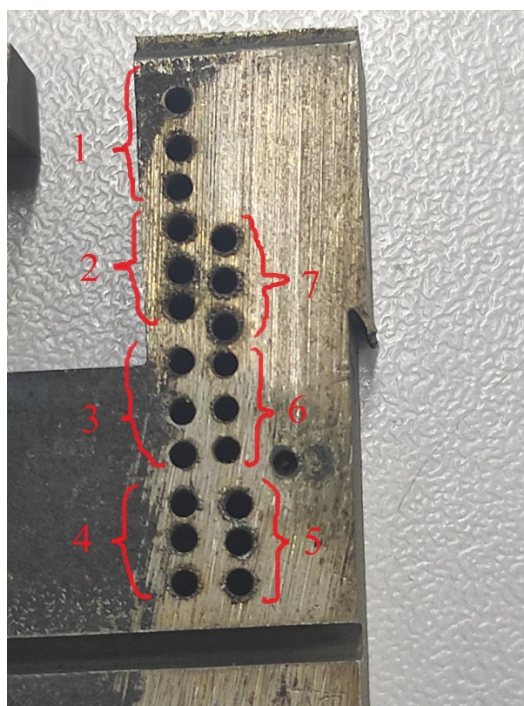


Рис. 5.

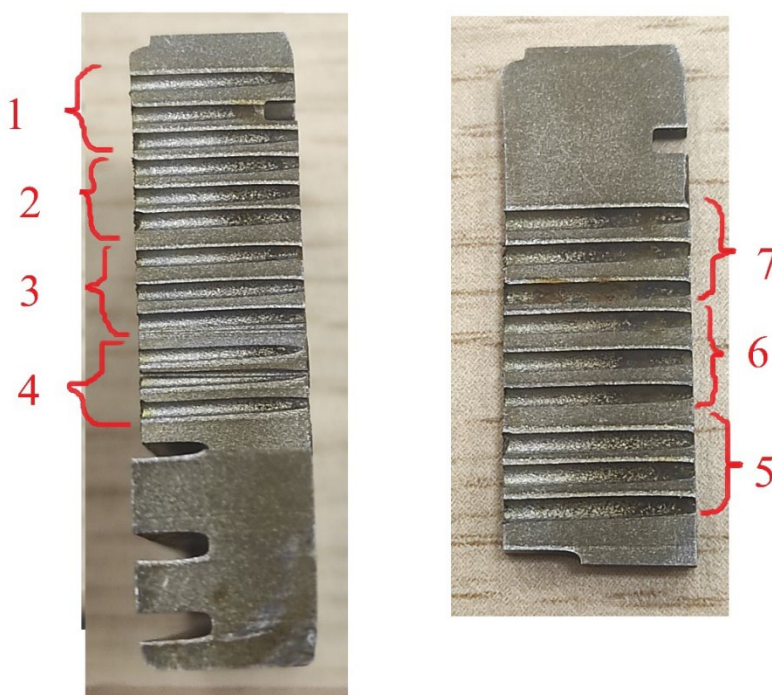


Рис. 6.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что на режимах, при которых обработка осуществляется за наиболее короткое время, износ электрода-инструмента будет повышенным, а также качество поверхности будет довольно грубым.

В результате проведенной экспериментальной отладки режимов электроэрозионной прошивки отверстий в заготовке из материала ЭИ961 можно заключить, что оптимальным режимом обработки будет тот, который сочетает в себе высокое качество получаемой поверхности, минимальный обожженный слой на кромке отверстия, относительно высокую производительность и умеренный износ ЭИ (режим №3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. science-bsea.bgita.ru [Интернет ресурс] Макаров В.Ф., Владыкин А.В. (ПГТУ, ОАО «ПМЗ», г. Пермь, РФ // URL: [http://science-bsea.bgita.ru/2010/mashin\\_2010\\_2/makarov\\_issled.htm](http://science-bsea.bgita.ru/2010/mashin_2010_2/makarov_issled.htm)
2. Винокуров, А.Е. Конструкторско-технологическое обеспечение металлорежущих станков и комплексов: учебное пособие для студентов всех форм обучения – Уфа: УГАТУ 2020, стр. 56.
3. Полетаев, В.А. Проектирование технологии электроэрозионной обработки – Кемерово: ГУ КузГТУ 2008, стр. 169.

УДК 621

К. И. МАКЕЕВА

*xenia.mackeeva@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Л. И. МАСЛОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ГИДРОДРОБЕСТРУЙНОЕ УПРОЧНЕНИЕ МИКРОШАРИКАМИ**

*Аннотация.* Рассмотрен прогрессивный метод отделочно-упрочняющей обработки поверхностей – гидродробеструйное упрочнение микрошариками.

*Ключевые слова:* гидродробеструйное упрочнение, микрошарики, обработка, поверхность.

Одним из прогрессивных методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностей является гидродробеструйное упрочнение.

Целью гидродробеструйного упрочнения является наведение благоприятных остаточных напряжений сжатия в приповерхностном слое детали с сохранением геометрических размеров, с низкой либо исходной шероховатостью. Достоинствами данного метода являются: высокая эффективность, дешевизна и возможность применения для обработки .

Упрочнению подлежат окончательно изготовленные ДСЕ, прошедшие механическую, термическую обработку и люминесцентный контроль. Рихтовка, хонингование, притирка, полировка упрочненных ДСЕ не допускается. В случае наличия покрытий на ДСЕ, упрочнение должно выполняться до нанесения покрытий. Упрочнение осуществляется за счет соударения керамических микрошариков с поверхностью обрабатываемой детали. При этом необходимую энергию керамические микрошарики получают в сопле установки за счет энергии сжатого воздуха и эмульсии, подаваемой под давлением. Упрочнение керамическими микрошариками позволяет: - создать наклеп в поверхностном слое ДСЕ; - ликвидировать после механической обработки неблагоприятные остаточные растягивающие напряжения, получаемые в результате предыдущей обработки, и создать сжимающие остаточные напряжения глубиной до 0,3 мм и существенно замедлить процесс образования микротрещин; - повысить усталостную прочность; - создать особый микрорельеф поверхности с шероховатостью в пределах

Ra 0,8. При исходном (до обработки) значении шероховатости поверхности ДСЕ, равное 3,2 мкм снижается до 0,8 мкм, при исходном значении 0,2 мкм - повышается до 0,8 мкм. Исходное значение шероховатости 0,8 мкм сохраняется после обработки. Данная обработка должна обеспечивать увеличение радиусов впадин профиля и устранение следов предыдущей обработки (ликвидировать направленные риски от предшествующих финишных – механических (токарных, фрезерных, сверлильных и других) операций). Поверхности после упрочнения могут изменять свои размеры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента// - 1977г, 168с.
2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием//Справочник. — М.: Машиностроение, 1987, 328 с
3. Синчури, Д. В. Влияние метода гидродробеструйного упрочнения на повышение эксплуатационной надежности деталей / Д. В. Синчури. — 2015. — № 21.2 (101.2). — С. 54-57.



М. К. МЕЛИХОВ, А. М. ЕРМАКОВ

*MelikhovMK@stud.kai.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Р. Р. САЛАХОВ

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева - КАИ*

## АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ СИЛЫ ТРЕНИЯ В ПЛУНЖЕРНОЙ ПАРЕ ГИДРОКОМПЕНСАТОРА ОТ СВОЙСТВ СМАЗЫВАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

**Аннотация.** В данной работе проведено численное исследование трибодинамического эффекта в плунжерной паре гидрокомпенсатора дизельного двигателя в зависимости от вязкости и температуры моторного масла.

**Ключевые слова:** гидрокомпенсатор, клапанный привод, газораспределительный механизм, вязкость, трение, смазка, дизельный двигатель.

Снижение затрат на техническое обслуживание (ТО) автомобиля является важным двигателем роста спроса со стороны эксплуатантов. Особенно сильно это прослеживается в сфере коммерческой техники. Межсервисный интервал современного магистрального тягача доходит до 150 тысяч километров. Одним из способов его увеличения – это внедрение гидрокомпенсаторов (рисунок 1) в клапанный привод, что позволяет исключить из регламента ТО работы по регулировке тепловых зазоров.

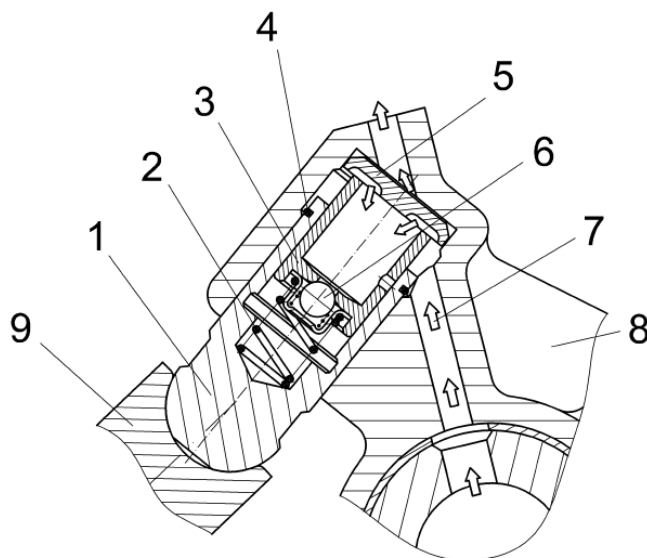


Рис. 1. Схема устройства гидрокомпенсатора [4]:

1 – корпус; 2 – пружина; 3 – плунжер; 4 – стопорное кольцо;  
5 – опорная шайба; 6 – обратный шариковый клапан; 7 – масляная магистраль;  
8 – коромысло; 9 – штанга толкателя

Однако, с внедрением гидрокомпенсаторов накладывается дополнительное требование к качеству моторного масла, так как плунжерная пара чувствительна к несвоевременному обслуживанию и неправильному подбору характеристик смазывающего материала.

Для анализа влияния свойств моторного масла на трение в плунжерной паре была построена одномерная модель гидрокомпенсатора (рисунок 2) в программном комплексе Simcenter Amesim. Модель гидрокомпенсатора внедрена в разработанную ранее модель клапанного привода дизельного двигателя грузового автомобиля.

Среди параметров гидрокомпенсатора отметим: внешний диаметр плунжера 8,6 мм, диаметральный зазор в плунжерной паре 5,4 мкм (с учетом минимального зазора по допуску и шероховатости поверхностей).

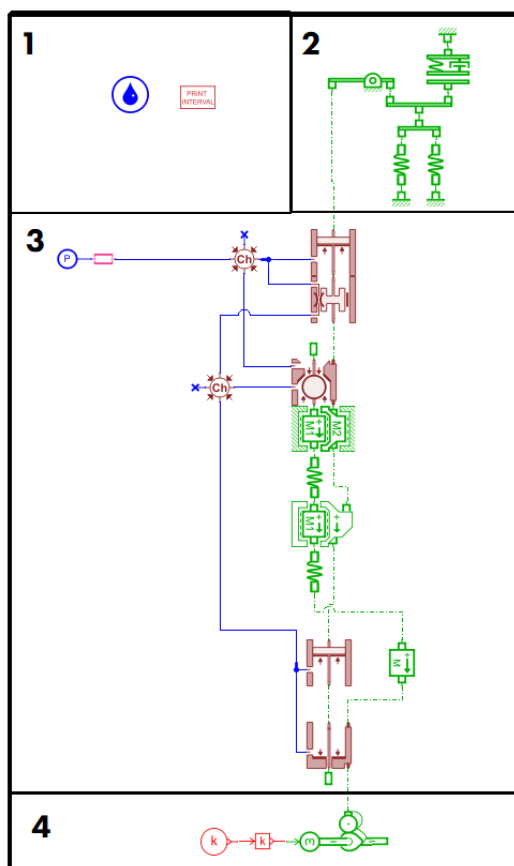


Рис. 2. Одномерная модель клапанного привода с гидрокомпенсатором

Основные характеристики масла, которые оказывают наибольшее влияние на трение в плунжерной паре – это показатели вязкости и плотность. Вязкость существенно зависит от температуры жидкости. Для сравнения были подобраны

3 марки моторного масла (таблица 1) одного производителя, отличающиеся вязкостью. Параметры модели будут рассматриваться при температурах масла 90, 100 и 110°C.

Таблица 1

Свойства сравниваемых моторных масел

Вязкость SAE	Кинематическая вязкость при температуре 40°C, сСт	Кинематическая вязкость при температуре 100°C, сСт	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
5W-30	75,2	12,32	859
10W-40	101	14,93	863
15W-40	111,5	15,18	879,9

Для более наглядного сравнения симуляции одномерной модели проводится на различных режимах работы двигателя, соответствующих оборотам коленчатого вала (КВ) на холостом ходу (600 мин<sup>-1</sup>), при рабочем движении (1100 мин<sup>-1</sup>) и на номинальном ходу (2150 мин<sup>-1</sup>). Параметры и результаты симуляций представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры и результаты симуляций

№	Масло	Температура масла, °C	Максимальное значение силы трения в плунжерной паре, Н
Обороты КВ 600 мин <sup>-1</sup>			
1	5W-30	90	1,88
2		100	1,80
3		110	1,74
4	10W-40	90	1,98
5		100	1,87
6		110	1,79
7	15W-40	90	2,00
8		100	1,88
9		110	1,80
Обороты КВ 1100 мин <sup>-1</sup>			
10	5W-30	90	2,21
11		100	2,05
12		110	1,94
13	10W-40	90	2,40
14		100	2,19
15		110	2,04
16	15W-40	90	2,44
17		100	2,22
18		110	2,06

№	Масло	Температура масла, °С	Максимальное значение силы трения в плунжерной паре, Н
Обороты КВ 2150 мин <sup>-1</sup>			
19	5W-30	90	2,94
20		100	2,62
21		110	2,39
22	10W-40	90	3,31
23		100	2,90
24		110	2,60
25	15W-40	90	3,40
26		100	2,96
27		110	2,64

Из результатов видно, что сила трения на номинальном режиме работы дизельного двигателя у масла SAE 5W-30 на 16% ниже, чем у аналогичного с вязкостью SAE 15W-40. Также закономерно, что с увеличением температуры масла значение силы трения в плунжерной паре уменьшается вследствие снижения вязкости. Максимальное снижение силы трения зафиксировано на номинальном режиме 2150 мин<sup>-1</sup> у масла вязкостью SAE 15W-40: изменение составило 0,76 Н или 29%.

Наиболее эффективны с точки зрения трибологического эффекта плунжерной пары масла с более высоким индексом вязкости за счет их более гибкого закона изменения вязкости от температуры. Повышение вязкости масла приводит к увеличению силы трения между плунжером и корпусом гидрокомпенсатора вследствие чего увеличивается износ прецизионных компонентов.

Увеличение рабочей температуры моторного масла способствует снижению вязкости масла, что, как уже было сказано, приводит к снижению трения между компонентами. В связи с этим при эксплуатации грузового автомобиля с гидрокомпенсаторами с увеличенными интервалами замены масла рекомендуется исключить из работы режимы холодного старта (использовать предпусковой подогреватель).

## ***Благодарности***

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00373, <https://rscf.ru/project/22-19-00373/>.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гроз Х., Русс Г. Бензиновые и дизельные двигатели. Перевод с нем. ЧМП РИА «GMM-пресс». - М.: ООО «Издательство «За рулем», 2013. - 272 с.: ил.;
2. Фитч, Дж. Анализ масел. Основы и применение / Дж. Фитч, Д. Тройер ; пер. с англ. 2-го изд. ; под ред. Е. А. Новикова, М. В. Кирюхина. – Санкт-Петербург : ЦОП «Профессия», 2015. – 176 с.;
3. Мачехин, Н. Ю. Особенности эксплуатации техники при использовании высококачественных моторных масел с увеличенными интервалами замены / Н. Ю.Мачехин, И. И Ширлин, С. В. Пашукевич // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. - 2019. - № 4. - С. 446-454.
4. ДВИГАТЕЛЬ ЗМЗ-5245.10: Руководство по ремонту / ред.: В.Л.Жбанников – 4-е изд. – За-волжье: Управление Главного Конструктора ЗФ ООО «УАЗ».

УДК 621

Д. Т. МИФТАХОВ

*danil.miftahov@yandex.ru*

Науч. руковод. – Г. С. ДЬЯКОНОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО ДВУХФАЗНОГО СПЛАВА VT8M-1**

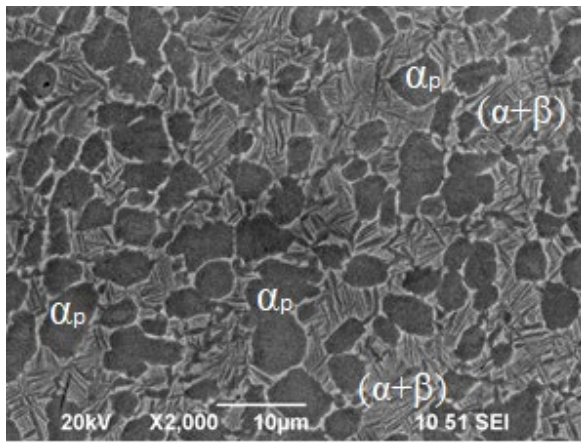
**Аннотация.** В данной работе проводились исследования микроструктуры титанового сплава VT8M-1 диаметром 20 мм и 50 мм, а так же исследования механических свойств.

**Ключевые слова:** растровая электронная микроскопия; механические свойства; двухфазный титановый сплав.

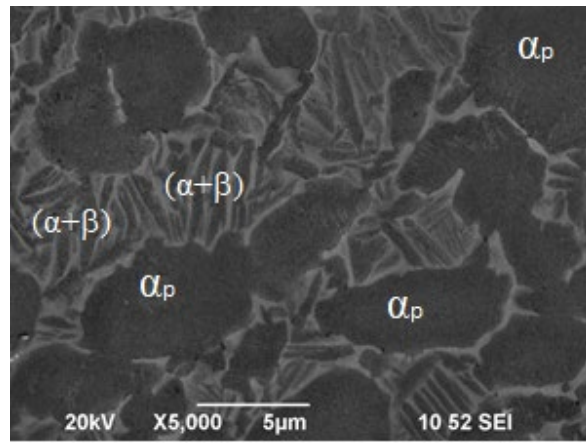
Титановые сплавы являются одним из основных конструкционных материалов, применяемых в разных отраслях промышленности. Широкое их использование связано с тем, что титан и титановые сплавы обладают такими комплексами свойства как – высокая удельная прочность, коррозионная стойкость в агрессивных средах, немагнитность.[1, 2]. Сплав VT8M-1 используется в деталях авиационного двигателя, например для изготовления лопаток для компрессора авиационных двигателей. Для исследования были взяты два исходных образца диаметром 20 мм и диаметром 50 мм и были проведены исследования микроструктуры образцов и механические свойства.

Двухфазный титановый сплав VT8M-1 содержит 4,8-6,0% Al, 3,5-4,5% Mo, 0,3-1,5% Sn, 0,3-1,5% Zr, 0,08-0,25% Si, 0,5-1,5 Cr, и прочие примеси (Fe, C, N, O, H), его температура эксплуатации не превышает 450 °С. Структура образца глобулярно-пластинчатая, размер альфа-фазы ~ 4 мкм [3].

Для исследования микроструктуры из образцов диаметром 20 мм и диаметром 50 мм были вырезаны образцы размером 1 на 1,5 см. После образцы были отшлифованы, отполированы и протравлены. В дальнейшем были получены снимки с растрового электронного микроскопа (РЭМ).

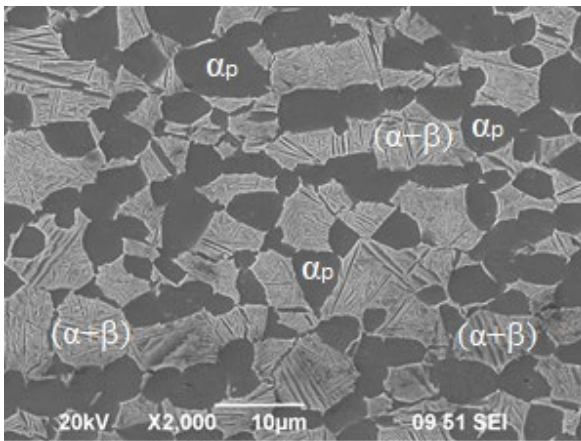


*a*

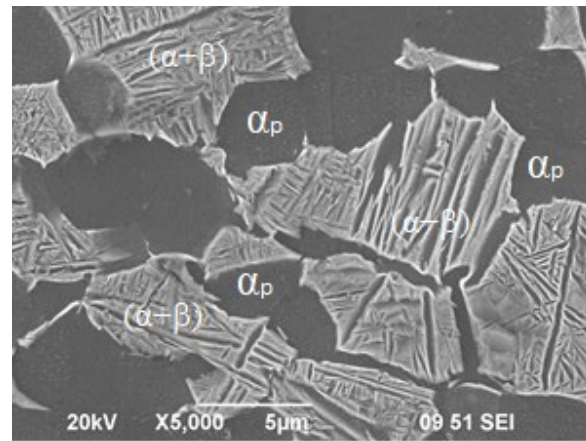


*б*

Рис. 1. Микроструктура исходного образца, диаметр 20 мм (РЭМ):  
*a* – увеличение  $\times 2000$ ; *б* – увеличение  $\times 5000$



*a*



*б*

Рис. 2. Микроструктура исходного образца, диаметр 50 мм (РЭМ):  
*a* – увеличение  $\times 2000$ ; *б* – увеличение  $\times 5000$

По полученным снимкам РЭМ наблюдается, что у образца сплава ВТ8М-1 диаметром 50 мм размер и количество первичной  $\alpha$ -фазы больше, чем у образца диаметром 20 мм. У образца 20 мм преобладает пластинчатая составляющая. Связано это с режимами получения этих прутков. Далее был произведен расчет среднего размера зерна  $\alpha$ -фазы и объемной доли глобулярной  $\alpha$ -фазы для образцов сплава ВТ8М-1 диаметром 20 мм и диаметром 50 мм (табл. 1).

Таблица 1

Средний размер глобулярной  $\alpha$ -фазы и объемная доля фаз

Состояние	Доля глобулярной $\alpha$ -фазы, %	Средний размер глобулярной $\alpha$ -фазы, мкм	Доля пластинчатой составляющей сплава ( $\alpha+\beta$ ), %
ВТ8М-1, Ø20 мм	40,6	3,40±0,14	59,4
ВТ8М-1, Ø50 мм	51,4	3,79±0,15	48,6

После получения снимков микроструктуры сплава ВТ8М-1 были проведены испытания механических свойств на растяжение. По полученным данным (табл. 2) был построен график зависимости напряжения (рисунок 3) от деформации сплава ВТ8М-1 образца 20 мм и 50 мм.

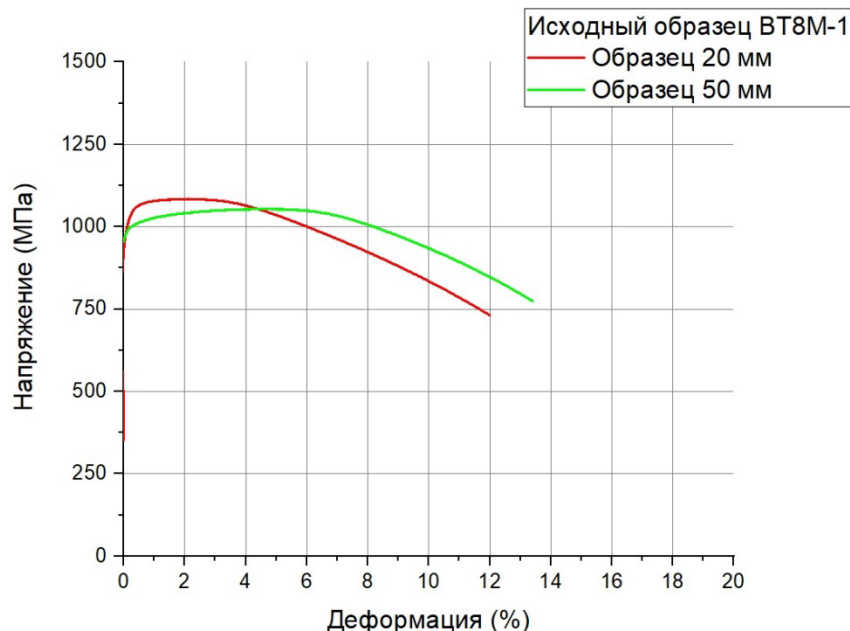


Рис. 3. Зависимость напряжения от деформации сплава ВТ8М-1, Ø20 мм и Ø50 мм

Таблица 2

Механические свойства сплава ВТ8М-1, Ø20 и Ø50

Состояние	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$\delta_{равн}$ , %
Образец 20 мм	1058	1096	11,259	2,053
Образец 50 мм	990	1056	13,058	5,06

По результатам механических испытаний на растяжение предел прочности и предел текучести выше у образца 20 мм, в свою же очередь образец 50 мм обладает большей пластичностью. Связано это с особенностью микроструктуры образцов. Так как у образца 20 мм преобладает пластинчатая составляющая предел текучести и прочности выше, чем у образца 50 мм [4].

Выводы:

1. В ходе исследования были получены снимки исходных образцов двухфазного титанового сплава ВТ8М-1 диаметром 20 мм и 50 мм. В образце диаметром 50 мм преобладает глобулярная  $\alpha$ -фаза. Однако средний размер  $\alpha$ -фазы не



сильно отличаются. Средний размер первичной  $\alpha$ -фазы для образца 20 мм составил  $3,40 \pm 0,14$  мкм, доля первичной  $\alpha$ -фазы 40,6%; Для образца 50 мм средний размер первичной  $\alpha$ -фазы мм составил  $3,79 \pm 0,15$  мкм, доля первичной  $\alpha$ -фазы 51,4%.

2. По результатам приведенных в таблице 2 можно сделать следующие выводы: предел прочности и предел текучести образца 20 мм примерно на 40-70 МПа выше, чем у образца 50 мм, однако в свою очередь образец 50 мм обладает куда большей пластичностью. Связано это с особенностью микроструктуры образцов, большая доля пластинчатой составляющей и более мелкий размер первичной альфа фазы в прутке 20 мм обеспечивает чуть более высокие предел прочности и текучести.

Механические свойства для образца 20 мм:  $\sigma_{0,2} = 1058$  МПа,  $\sigma_{в} = 1096$  МПа,  $\delta = 11,259\%$ ,  $\delta_{равн} = 2,053\%$ ;

Механические свойства для образца 50 мм:  $\sigma_{0,2} = 990$  МПа,  $\sigma_{в} = 1056$  МПа,  $\delta = 13,058\%$ ,  $\delta_{равн} = 5,06\%$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.N. Moiseyev / Titanium Alloys Russian Aircraft and aerospace applications, 2006
2. В.Г. Анташев, Н.А. Ночовная, Т.В. Павлова, В.И. Иванов / Жаропрочные титановые сплавы.
3. Е.А. Борисова, Г.А. Бочвар, М.Я. Брун, С.Г. Глазунов, Б.А. Колачев, О.С. Коробов, А.В. Мальчиков, В.Н. Моисеев, А.Б. Ноткин, Н.З. Перцовский, И.С. Польшкин, Н.М. Семенова, О.П. Солонина, Г.В. Шаханова / Металлография титановых сплавов – Москва, «Металлургия», 1980.
4. В.С. Золоторевский / Механические свойства металлов, Москва, МИСИС, 1998

УДК 621.791.18

П. В. МОРИН

*pavelmorin2221@gmail.com*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. В. В. АСТАНИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВА ВТИ-4 ПРИ ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

**Аннотация.** Описана методика получения неразъемного соединения посредством диффузионной сварки сплава ВТИ-4 с применением прослойки из ультрамелкозернистого сплава ВТ6. Проанализировано влияние на прочность сварного соединения заготовок из сплава ВТИ-4 методов сварки, а также возможности ультразвукового контроля соединения.

**Ключевые слова:** диффузионная сварка, микроструктура соединения, свойства, ВТИ-4

### ***Введение***

Диффузионная сварка двухфазных титановых сплавов прочно вошла в технологии аэрокосмической промышленности. На следующем этапе развития стоит задача сварки интерметаллидных сплавов на основе титана. Для получения неразъемного соединения орторомбического сплава ВТИ-4 была применена диффузионная сварка по режиму температура  $960 \pm 10^\circ\text{C}$ , продолжительность 5 часов, вакуум 0,133 Па, нагрузка 10 МПа [1].

При указанной температуре сплав ВТИ-4 обладает деформационной способностью, достаточной для сварки давлением. Однако в ряде случаев возникает необходимость соединения заготовок без значительной деформации и роста зерна, что возможно при пониженной температуре.

Цель работы – получить соединение заготовок ВТИ-4 только за счет деформации вспомогательной прослойки, при минимальной деформации заготовок. Это условие можно выполнить за счет значительной разницы деформирующего напряжения для материала заготовок и материала прослойки. В качестве такой прослойки предложено использовать фольгу из сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой [2], обладающей сверхпластичностью при температурах  $650\text{-}750^\circ\text{C}$  [3].

*ВТИ-4* (Ti-22Al-23Nb-0,5Zr-0,4Mo) – деформируемый (орто+β)-сплав с повышенной технологичностью для листов с пределом прочности  $\sigma_B > 1150$  МПа, пластичностью  $\delta > 5\%$ ;

Заготовки образцов представляют собой полоски из сплава ВТИ-4 размером 12×30 мм. Свариваемые поверхности отполированы и обезжирены. На остальные поверхности наносили антидиффузионное покрытие (АДП). Диффузионная сварка образцов осуществлялась в герметичных контейнерах, изготовленных из нержавеющей стали толщиной 0,4 мм с приваренной к ним трубкой для откачки воздуха (рисунок 1). В одном из вариантов использовали сварку без прослойки. В варианте с промежуточной прослойкой в зону сварки была вложена фольга из сплава ВТ6, с УМЗ структурой (рис. 2).

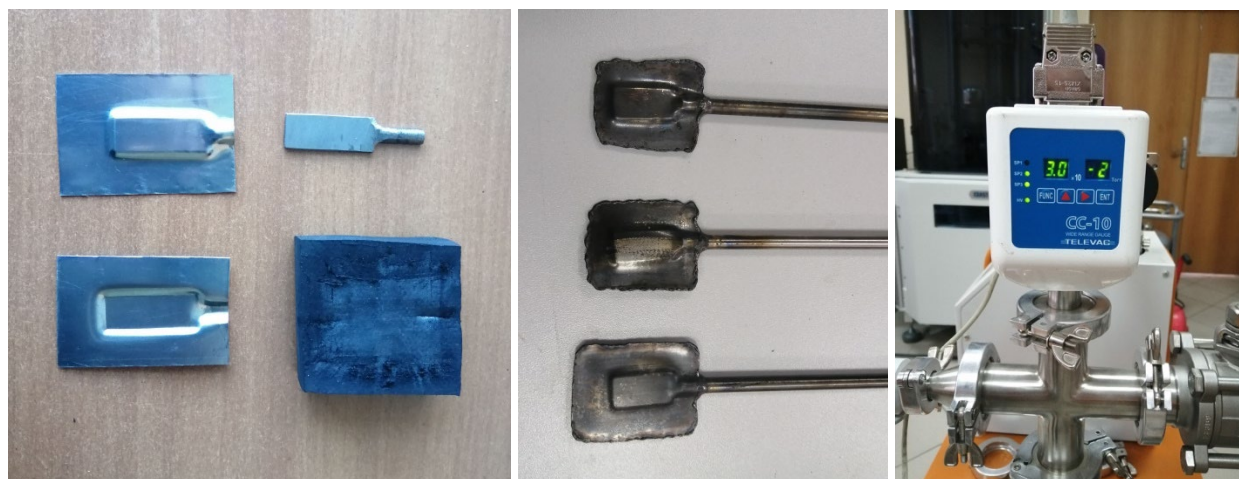


Рис. 1. Штампованные заготовки контейнеров из нержавеющей стали, контейнеры с образцами, герметизированные аргонно-дуговой сваркой, и вакуумная система

Сварку осуществляли в печи испытательной машины Instron 8862 плоскими бойками. Усилие повышали плавно со скоростью 100 кгс/мин одновременно с прогревом заготовки. В этом режиме УМЗ прослойка растекалась по поверхностям в состоянии сверхпластичности, обеспечивая физический контакт поверхностей. Диффузионное соединение формировалось при конечной температуре 850°C и постоянном давлении 120 МПа (наиболее интересный результат из серии различных режимов). После вскрытия пакетов сваренную часть образцов вырезали на электроискровом станке и испытывали на срез в специальном приспособлении (Рис. 2, в)

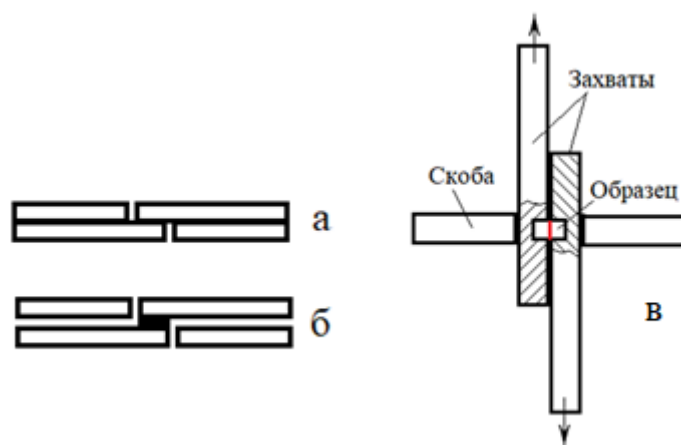


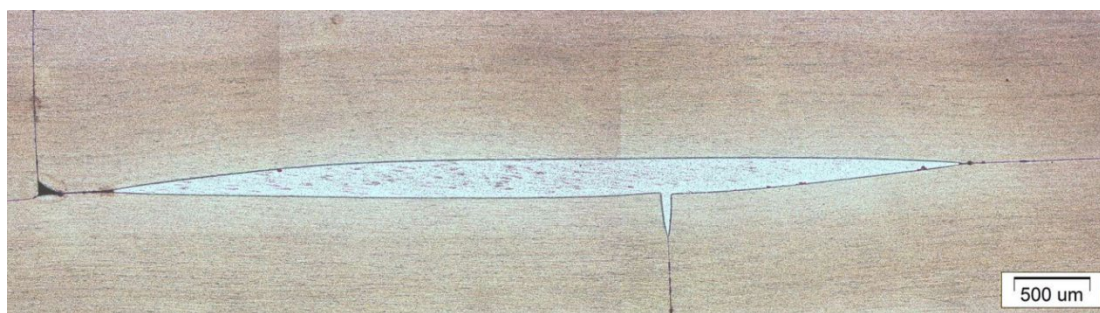
Рис. 2. Схема сварки образцов без прокладки (а) и с прокладкой (б);  
схема испытания образцов на срез (в)

В варианте без прокладки, в данных условиях, соединение заготовок не образовалось, в варианте с прокладкой образец извлечен из контейнера сваренным. Металлографические исследования показали характер совместной деформации сплавов ВТ6 и ВТИ-4 (рис. 3, а). Сплав ВТ6, проявив сверхпластические свойства, претерпел степень осадки в средней части 23%, растекся по поверхности и проник в тонкие зазоры между частями образца. Пластины сплава ВТИ-4 в средней части прослойки претерпели осадку на 0,09 мм, или 2,4%. Иначе говоря, степень относительной деформации сплава ВТИ-4 в десять раз меньше, чем УМЗ сплава ВТ6 в тех же условиях.

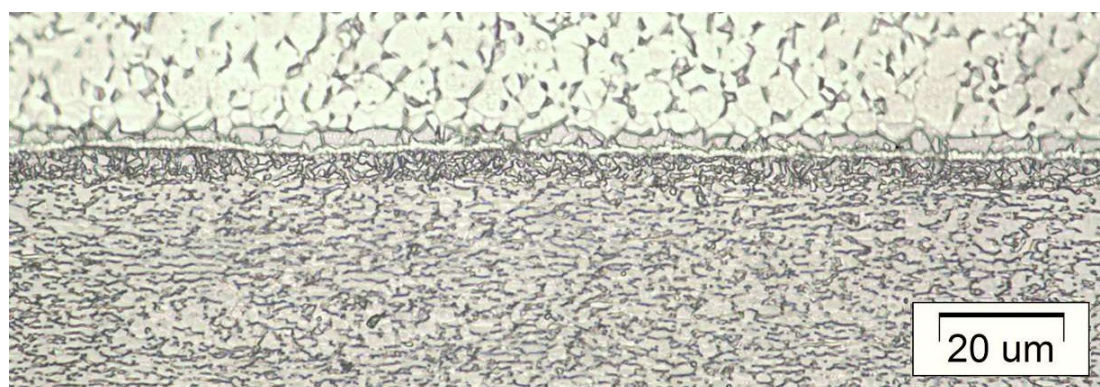
На поверхности раздела ВТ9/ВТИ-4 сформировалась диффузионная зона, состоящая из трех характерных слоев (Рис. 3, б сверху вниз):

- 1) Однофазная цепочка зерен, размером 2-5 мкм, вытянутых вдоль поверхности стыка;
- 2) Тонкая, около 1 мкм, однофазная светлая прослойка, состоящая из мелких округлых зерен размером 0,8 мкм.
- 3) Многофазная полоса со структурой эвтектоидного типа, шириной около 5 мкм.

При испытаниях на срез образец разрушился при напряжении 496 МПа, что эквивалентно прочности на растяжение  $\approx 1000$  МПа или 90% прочности основного материала.



*a*



*б*

Рис. 3. Микроструктура твердофазного соединения заготовок сплава ВТИ-4 с прослойкой из фольги УМЗ сплава ВТ6

Таким образом, прослойка из фольги УМЗ сплава ВТ6 способствует формированию диффузионного соединения образцов из интерметаллидного орто-сплава ВТИ-4 с минимальной деформацией заготовок. В случае использования данного способа соединения в технологических целях рекомендуется уменьшить толщину прослойки и тщательно подбирать режим соединения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбин В.В., Сидоров И. И., Гринберг Б. А., Антонова О. В., Волкова Н.Н., Салишев Г.А. Иноземцев А.В. Микроструктура биметаллического соединения титан - орторомбический алюминид титана (сварка взрывом, диффузионная сварка) // Вопросы материаловедения. 2004. Т. 38. 2. С. 61–71.
2. Лутфуллин Р. Я. Мухаметрахимов М.Х. Твердофазное соединение образцов наноструктурированного титанового сплава ВТ6 при пониженных температурах. Перспективные материалы, 2009, №7, с. 189.
3. В.В. Астанин, Л.И. Хакимьянова. Низкотемпературная сверхпластичность сплава ВТ6 после изотермической прокатки. Авиационно-технологические системы: Межвуз. сб. науч. тр. / Под общ. ред. М.А. Анферова. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2004. с 236-245.

В. В. НИКИТИН, канд. техн. наук, заместитель начальника управления по развитию производственной системой  
*nikitin.str@mail.ru*

**ПАО «ОДК-УМПО»**

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПЛОЩАДОК МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Аннотация.* В рамках проведения технического аудита производственных площадок и разработанной на его основе методике, описывается алгоритм решения задачи оценки производственных площадок в условиях многокритериальности целевых значений.

*Ключевые слова:* параметры, показатели, комплексный критерий, интегральный критерий, целевая функция.

Развитие предприятий и проведение технического перевооружения не возможно без определения их технического уровня, в связи с этим проблема определения производственного потенциала и кооперационных возможностей, в условиях необходимости технического перевооружения для создания конкурентного превосходства в отрасли приобретает актуальность. Для решения этой задачи была разработана методика технического аудита производственных площадок.

Авторами методики предлагается для комплексной оценки всего предприятия (производственной площадки), применить механизм оценки влияния различных условий и факторов на систему по модели «черного ящика», составными частями которого являются – входные параметры (ресурсы), выходные параметры (продукт и его свойства), окружающая среда и возмущающие воздействия (управление).

Однако внутри данные направления формируются из различных критериев, которые в свою очередь состоят из параметров, таким образом, необходимо решить не просто многокритериальную задачу, а многоуровневую многокритериальную задачу. Данная проблема многокритериальности, как правило, решается различными способами [1, 2], но наиболее перспективным направлением

решения данной проблемы по мнению авторов является интегрирование измененных показателей [2].

Для проведения технического аудита производственных площадок по данной методике выбирается объект обследования (изделие) и декомпозируется до элементов таким образом, чтобы было возможно полученные элементы оценить по конкретным числовым параметрам, которые, в свою очередь, могут быть: прямыми, увеличение которых повышает значение критерия, и обратными – повышение которых снижает значение критерия, в который эти показатели входят.

Таким образом, можно оценить влияние различных факторов на конечный производимый продукт, благодаря «расщитию» направлений и декомпозиции их на критерии, которые в свою очередь можно сравнить при помощи оцифрованных показателей.

Необходимо отметить, что данная методика была апробирована на производственных площадках авиадвигателестроительной отрасли. В итоге на основании полученных результатов были рекомендованы решения по формированию карты технологических компетенций.

Следовательно, есть основания полагать, что решение данной многокритериальной задачи может быть использовано для определения сильных и слабых сторон производственного предприятия в плане производства продукции, определение кооперационного потенциала между группой технологически схожих производственных предприятий: обоснование и разработка программы технического перевооружения предприятия/группы предприятий, развития кооперационных взаимосвязей и выдаче рекомендаций по формированию карт технологических компетенций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фасхиев Х.А., Крахмалева А.В. Оценка уровня конкурентоспособности грузовых автомобилей и их двигателей // Маркетинг в России и за рубежом. 2004. №5. С. 3–16.
2. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1989. 316 с.

УДК 621.7.043

Н. Ю. СТЕПАНЕНКО

*koly.stepanenko@yandex.ru*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. В. В. АСТАНИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВХОДНОЙ ЗАЩИТНОЙ КРОМКИ ДЛЯ КОМПОЗИТНОЙ ЛОПАТКИ**

**Аннотация.** Проведен анализ существующих способов получения металлической накладке для защиты входной кромки полимерной композитной лопатки вентилятора ТРДД. Методом математического моделирования в программном комплексе MSC Marc обозначен путь устранения недостатков существующих методов и предложен улучшенный вариант технологии.

**Ключевые слова:** диффузионная сварка, сверхпластическая формовка, металлическая накладка, математическое моделирование.

### ***Введение***

Важным направлением в развитии турбовентиляторных двигателей является возможность применения вентиляторной лопатки из полимерных композиционных материалов. Однако, композитные материалы обладают малой эрозивной стойкостью и сопротивлением к удару от попадания посторонних предметов. По этой причине переднюю кромку лопатки защищают металлической накладкой из титанового сплава [1].

Конструктивной особенностью этой накладки является усиленная входная кромка и тонкие стенки, что создает трудности при изготовлении.

Известные технологии отражены в нескольких патентах, в частности, в патентах [2,3] применена технология диффузионной сварки и сверхпластической формовки. К недостаткам способа [2] относится заострение в полости кромки, препятствующее плотному прилеганию накладки при установке на композитную лопатку. Способ [3] обеспечивает получения внутреннего профиля, предусмотренного чертежом, но требует применения технологического вкладыша, что усложняет технологию.

Цель работы – путем математического моделирования разработать способ получения металлических накладок на композитные лопатки лопаток с требуемым внутренним профилем.



### *Анализ существующих технологий изготовления*

Металлическая накладка, изготовленная по патенту [3] предполагает изготовление двух половин методом фрезеровки, диффузионную сварку половин с установленным в полость вкладышем, сверхпластическую формовку, последующую вырезку и удаление вкладыша (Рис. 1). Изготовленные опытные накладки выявили трудность для серийного освоения в связи с трудностью изготовлением вкладыша.

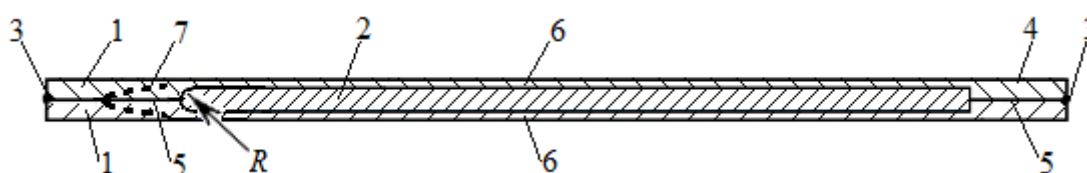


Рис. 1. Схема поперечного разреза пакета заготовок с установленным в полость технологическим вкладышем

1. Заготовки из титанового сплава.
  2. Технологический вкладыш
  3. Сварка аргонно-дуговая
  4. Технологический напуск
  5. Сварка диффузионная
  6. Боковые стенки
  7. Усиленная передняя часть, обрабатываемая на аэродинамический профиль
- $R$  – Радиус переменной величины, соответствующей профилю композитной лопатки.

Изготовление металлической накладки по методу [2] выявил недостаток, вместо заданного чертежом внутреннего профиля образовалось характерное заострение, несовпадающее с профилем композитной детали (Рис. 2).



Рис. 2. Металлическая накладка, изготовленная из двух половин методом диффузионной сварки и сверхпластической формовки, разрезы образцов

В связи с несовершенством существующих технологий изготовления защитных металлических накладок для полимерных композитных лопаток предложен следующий метод, предотвращающий появление характерного заострения во внутренней полости. Для недопущения существенного деформирования во время операции диффузионной сварки радиуса во внутренней полости, предполагается нанесение антидиффузионного покрытия и укладка стальной проволоки (Рис. 3). После операции диффузионной сварки, крутки профиля и сверхпластической формовки, на этапе вырезки заготовок предполагается извлекать проволоку.

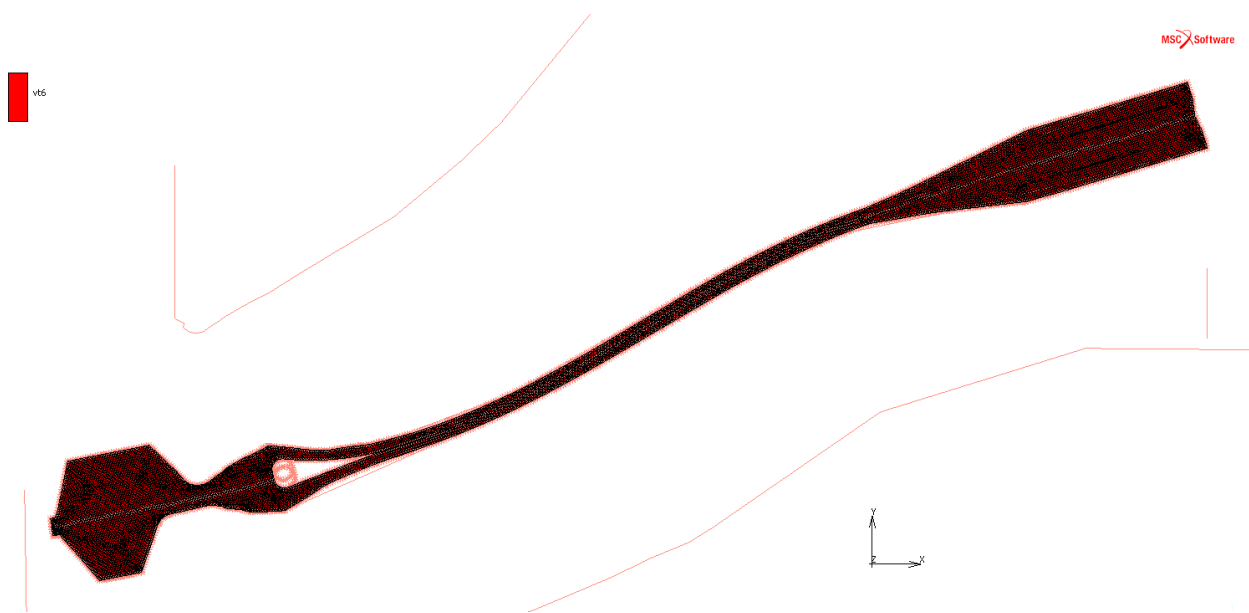


Рис. 3. Сеточная модель расчетного сечения заготовки с проволокой внутри

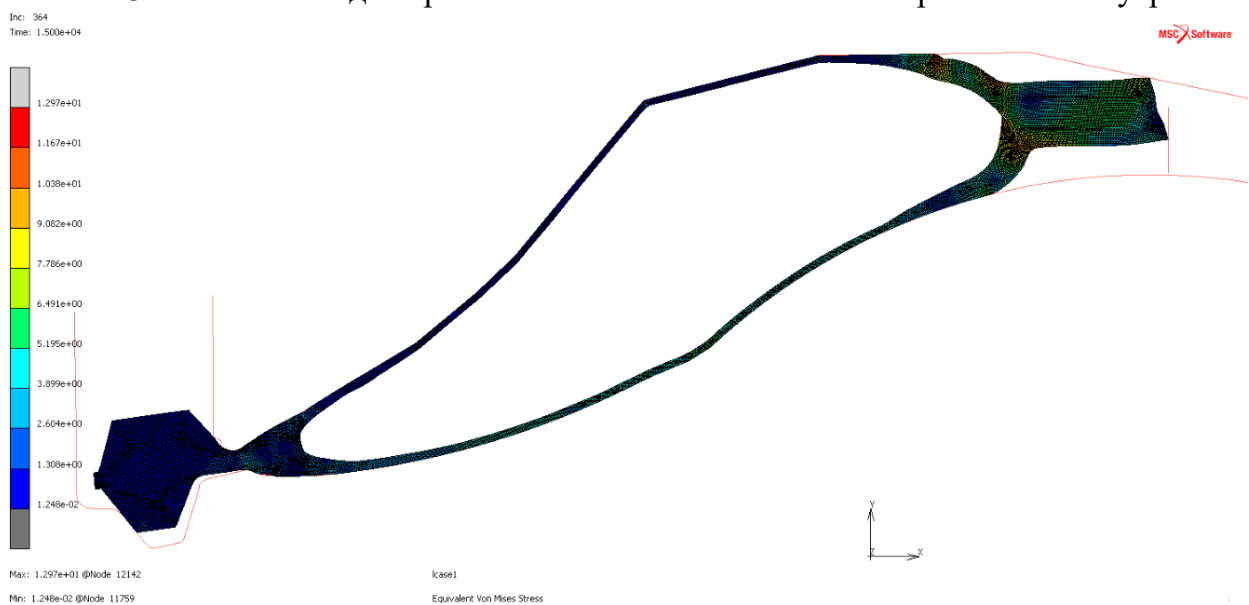


Рис. 4. Результат моделирования операции сверхпластической формовки

По результатам моделирования предложенного метода подобрана оптимальная геометрия внутренней полости пакета заготовок и параметры вкладываемой проволоки, обеспечивающие сечение профиля, соответствующее требуемому (Рис. 4).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Петров Ю.А., Ежов А.Ю., Афанасьев Д.В. КОМПОЗИЦИОННАЯ ЛОПАТКА ТУРБОМАШИНЫ. Патент на изобретение РФ № 2350757, 27.03.2009. Заявка: 2007134993/06, 21.09.2007.
2. Jean-Louis DespreauxJean-Michel FranchetPhilippe JoffroyGilles KleinStephane LevequeDaniel LhommeAlain Lorieux. Process for manufacturing a reinforcing leading or trailing edge for a fan blade. Патент на изобретение US20050278950A1, 22.12.2005.
3. Астанин В.В., Бердин Н.В., Лукьянов В.В., Старовойтов С.В., Уткин А.Ю., Каримбаев Т.Д., Чернышов А.А. Способ изготовления упрочняющей накладки передней кромки лопатки вентилятора Патент на изобретение РФ № 2711697, 21.01.2020. Заявка: 2019111210, 15.04.2019.

УДК 621.793.1

А. А. ТУЛИНА

*angelatool@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук А. Ю. НАЗАРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

**Аннотация.** Методом вакуумно-дугового испарения на образцы из твердого сплава ВК8, а также из нержавеющей стали наносились покрытия на основе оксида алюминия  $Al_2O_3$ . Были использованы четыре различных режима нанесения покрытий, отличающиеся величиной напряжения смещения, с целью установить взаимосвязь между режимом и свойствами получаемого покрытия. Проанализированы фазовый состав, полученная структура и толщина покрытия.

**Ключевые слова:** оксид алюминия, покрытие, вакуумно-дуговое осаждение, повышение износостойкости, поверхностное упрочнение

### **Введение**

Одним из перспективных и самых эффективных методов защиты поверхностных слоев изделий, работающих в агрессивных средах и прочих тяжелых условиях является нанесение на ответственные части конструкций различных покрытий, обладающих соответствующими свойствами.

На протяжении длительного времени широко используются покрытия на основе таких соединений, как TiN, TiC, TiCN, TiAlN, ZrN, ZrCN, CrN и др [1, 2]. Их использование в промышленности в качестве покрытий связано с такими свойствами, как высокая твердость и модуль упругости, химическая стабильность, высокое сопротивление коррозии и износостойкость. Однако у нитридных покрытий существует ряд проблем, в частности, недостаточная стабильность и подверженность окислительным процессам при высоких температурах. Например, температура полного окисления покрытия на основе TiN составляет около 550°C, для покрытий на основе TiC, TiCN – около 400°C, для CrN – около 700°C [3,4].

Одними из перспективных покрытий с точки зрения жаростойкости, износостойкости покрытиям на основе  $Al_2O_3$ . Они проявляют высокую термическую

и химическую стабильность даже при температурах выше  $1000^{\circ}\text{C}$ , а также высокую твердость, низкую растворимость во многих рабочих материалах [5]. Для получения кристаллических покрытий на основе соединения  $\text{Al}_2\text{O}_3$  наиболее широко используют химическое (CVD) и физическое (PVD) осаждение из паровой фазы, реакционное электронно-лучевое испарение Al, а также реакционное магнетронное распыление [6]. Наиболее высокие скорости получения покрытий достигаются электронно-лучевым испарением (1,5-3 мкм/мин).

При физическом осаждении (PVD) материал покрытия переходит из твердого состояния в газовую фазу в результате испарения под воздействием тепловой энергии или в результате распыления за счет кинетической энергии столкновения частиц материала [7]. Нанесение покрытий методом PVD проводится при температуре до  $450^{\circ}\text{C}$ , что практически не накладывает ограничения по используемым материалам, на которые наносится покрытие. В частности, метод физического осаждения выгодно использовать при осаждении покрытия на твердый сплав, который может приобретать хрупкость под действием высоких температур, в отличие от метода химического осаждения из газовой фазы (CVD), который требует температур до  $1000^{\circ}\text{C}$  и выше, для протекания в процессе необходимых химических реакций [2,7].

Особенностью оксида алюминия как материала является множество его кристаллических модификаций. Из всех его фаз наиболее термодинамически стабильной является  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , сообщающая покрытию твердость и повышенную плотность, но также довольно распространена и  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , сообщающая покрытию вязкость. Варьируя режимами и условиями нанесения, можно получать покрытия с различным фазовым составом. Получение  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  затрудняется тем, что для его образования требуется более высокие температуры осаждения [8, 9]. Фаза  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  обладает более низкой поверхностной энергией, поэтому он стабилен при более мелком размере зерна, что приводит к преимущественному росту фазы  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  в условиях интенсивного ионного ассистирования, которое способствует увеличению количества центров кристаллизации и уменьшению размера зерен [8, 10].

## ***Методики***

В настоящей работе покрытия наносились вакуумно-дуговым методом на установке ННВ6.6-И1. Вакуумно-дуговое осаждение заключается в нанесении покрытий в вакууме, путем конденсации на подложку требуемого материала из плазменных потоков, генерируемых на катоде в катодном пятне вакуумной дуги [11]. Покрытие наносилось на четыре образца из твердого сплава ВК8 и 4 образца из нержавеющей стали в среде кислорода с интенсивным ионным ассистированием. При нанесении покрытия на первый образец значение напряжения смещения составляло 200 В, на второй – 150 В, на третий – 100 В, на четвертый – 50 В. Время нанесения покрытий – 1 час.

После нанесения покрытий был проведен ряд испытаний. Анализ химического состава покрытия проводили на наклонных шлифах с помощью приставки для энергодисперсионного анализа на растровом электронном микроскопе модели JSM-6490LV. Кристаллическая структура и фазовый состав образцов изучались методом рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-7000S в конфигурации Брэгга-Брентано с  $\text{CuK}\alpha$ -излучением (длина волны  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ) при 40 кВ и

30 мА. Исследование микротвердости образцов проводили на приборе DuraScan по методу Виккерса. При измерении алмазный наконечник в виде правильной четырехгранной пирамиды вдавливался в исследуемый участок покрытия под действием нагрузки  $P=0,025 \text{ Н}$  и  $P=0,05 \text{ Н}$ , приложенной в течении 10с. Толщина покрытия определялась на поперечных шлифах с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer.A1m.

## ***Результаты***

На рисунке 1 показаны рентгенограммы, демонстрирующие фазовый состав получившихся покрытий при различных напряжениях смещения на образцах из твердого сплава ВК8. Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что при осаждении алюминия вакуумно-дуговым методом в кислородной среде образуется покрытие с преобладанием  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ . На образцах не зафиксировано

присутствие фазы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , что, скорее всего, связано с недостатком поверхностной энергии для ее образования.

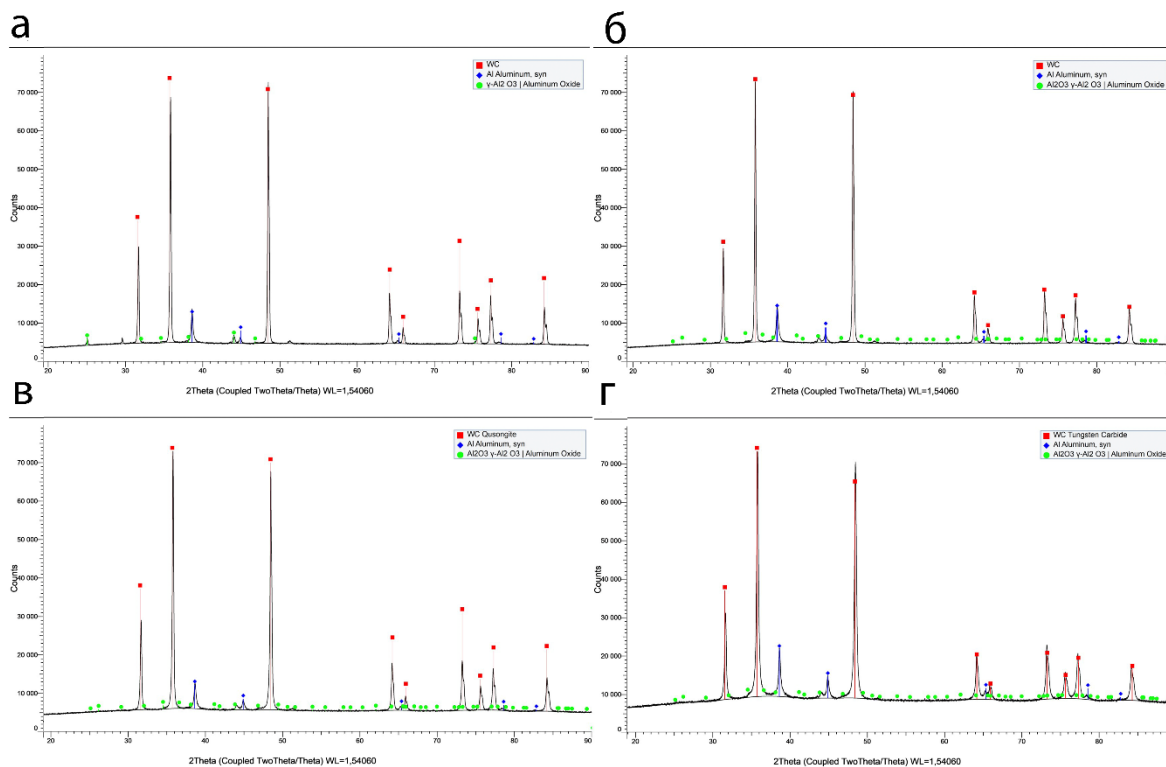


Рис. 1. Рентгенограммы образцов (соответственно  $U_{\text{п}} = 200 \text{ В}$ ,  $150 \text{ В}$ ,  $100 \text{ В}$  и  $50 \text{ В}$ ), зеленый –  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; красный карбид вольфрама WC, синий – Al

Структура покрытия на снимках оптического микроскопа показана на рис.

2. Полученные покрытия равномерны, сколы не зафиксированы. В определенных местах присутствуют светлые участки, которые отражают присутствие в покрытиях капель чистого алюминия (рис.4), появление которой является недостатком данного метода получения покрытия, поскольку может негативно отражаться на эксплуатационных характеристиках покрытия.

Толщина покрытия определялась на поперечных шлифах с помощью микроскопа. При измерении толщины был построен график (рис.5), отражающий зависимость толщины покрытия от величины напряжения смещения. График строился по средним значениям толщины покрытий на каждом из 4-х образцов из нержавеющей стали. На каждом образце толщина была замерена в 10 различных точках. По графику видна тенденция к снижению толщины покрытия с увеличением напряжения смещения.

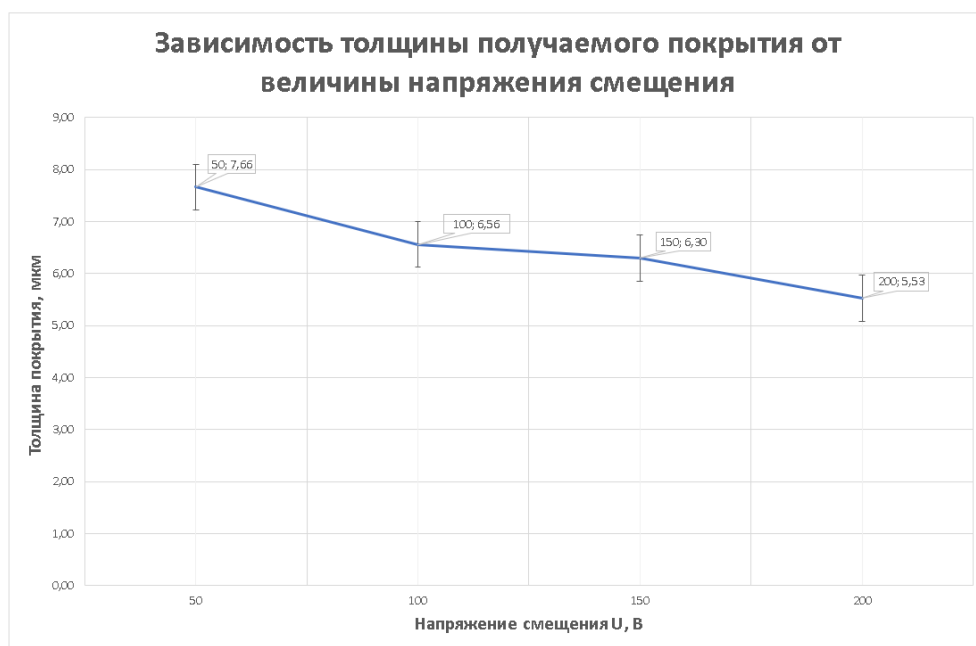


Рис. 2. График зависимости толщины покрытия от величины напряжения смещения

### **Выводы**

Таким образом, проведенный эксперимент указывает на связь между значением напряжения смещения и получаемым фазовым составом. При уменьшении напряжения смещения получают образцы с покрытиями с уменьшенной долей  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Предположительно, отсутствие образования фазы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  связана с недостаточностью поверхностной энергии. Подтверждена зависимость между уменьшением толщины покрытия с увеличением напряжения смещения.

Дальнейшие исследования будут направлены на получение покрытий с более однородным фазовым составом и на выявление влияния условий и режимов нанесения покрытий - в частности, ионного ассистирования, на полученные свойства.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Тополянский П. А. и др. Сравнительный анализ свойств износостойких покрытий для повышения стойкости сверл //Металлообработка. – 2013. – №. 4 (76). – С. 28-39.
2. Логинов Н. Ю., Дятлов Р. Ю., Салабаев Д. Е. Выбор износостойкого покрытия для концевых фрез //Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. – 2021. – С. 45-49.
3. Sundgren J. E., Hultman L. Growth, structure and properties of hard nitride based coatings and multilayers. In book Materials and Processes for Surface and Interface Engineering. Kluwer Academic Publishers. – 1995.



4. Кирюханцев-Корнеев Ф. В. и др. Перспективные наноструктурные покрытия для машиностроения // Вопросы материаловедения. – 2008. – №. 2. – С. 187-201.
5. Åstrand M. et al. PVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-coated cemented carbide cutting tools // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Т. 188. – С. 186-192.
6. Гаврилов Н. В. и др. Нанокристаллические покрытия  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученные реакционным термическим анодным испарением в дуговом разряде при низкой температуре // Письма в ЖТФ. – 2017. – Т. 43. – №. 20.
7. Локтев Д., Ямашкин Е. Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий // Наноиндустрия. – 2007. – №. 4. – С. 18-25.
8. Gavrilov N. V. et al. Ion assisted deposition of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings by anodic evaporation in the arc discharge // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Т. 337. – С. 453-460.
9. Edlmayr V. et al. Thermal stability of sputtered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings // Surface and Coatings Technology. – 2010. – Т. 204. – №. 9-10. – С. 1576-1581.
10. Гаврилов Н. В. и др. Влияние параметров ионного потока на структуру и свойства покрытий из  $\alpha$ -оксида алюминия, получаемых в дуговом разряде реактивным анодным испарением с ионным сопровождением // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2019. – Т. 83. – №. 11. – С. 1558-1562.
11. А.А. Андреев, Л.П. Саблев, С.Н. Григорьев. Вакуумно-дуговые покрытия. – Харьков, ННЦ ХФТИ, 2010. – 318 с.

А. М. ХУСАИНОВА

*ahusainova@bk.ru*

Науч. руковод. – ст. преп. А. Ю. НАЗАРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ YAlO, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ**

**Аннотация.** В данной работе были нанесены покрытия системы Y-Al-O на молибденовую подложку методом вакуумно-дугового осаждения при трех различных режимах, после нанесения образцы с покрытиями было отожжены в вакуумной печи при двух разных температурах. Исследован фазовый состав при помощи рентгенофазового анализа и изучена структура покрытий при помощи растрового электронного микроскопа.

**Ключевые слова:** термобарьерные покрытия; вакуумно-дуговое-осаждение; многослойные покрытия.

### ***Введение***

Для повышения КПД, мощности и топливной эффективности авиационного двигателя необходимо повышать температуру газа перед турбиной. Температура газа перед турбиной является одним из основных параметров напряженного состояния в деталях турбины, приводящий к разрушению в результате окисления и коррозии. [1] При изготовлении деталей ГТД широко используются жаропрочные монокристаллические суперсплавы на основе никеля, рабочая температура которых на основании прочностных характеристик составляет до 1150 °С, что в результате эксплуатации при более высоких температурах приводит к уменьшению срока службы деталей в результате термо-усталостных разрушений.[2,3,4] Поэтому на сегодняшний день широко применяют многослойные термобарьерные покрытия, особенно для защиты высоконагруженных деталей ГТД, работающих при высоких температурах газов сгорания, в окисляющих средах и при высоких механических нагрузках[10]. Современные термобарьерные покрытия на сегодняшний день состоят из следующих слоев: на поверхность детали наносят жаростойкий связующий слой, обычно это сплавы систем MCrAlY (M = Ni, Co) и Ni(Pt)-Al. Поверх жаростойкого связующего сплава наносят керамический слой, который обеспечивает защиту сплава от высоких температур  $\approx 1200^{\circ}\text{C}$ .[2,5,6]

Наиболее часто используемым является покрытие на основе оксида циркония, стабилизированного иттрием (YSZ). Наибольшая допустимая температура

использования данного покрытия 1200°C, при более высоких температурах снижается способность сопротивлению деформациями, происходит спекание, что и приводит к раннему разрушению. Поиск нового покрытия, которое придет на замену YSZ и будет обладать лучшей стабильностью при температурах выше 1200°C, остается актуальной задачей на сегодняшний день.

А также последние исследования показали, что алюминаты иттрия являются перспективными кандидатами на замену YSZ.[9] Существует три фазы в системе Y-Al-O:  $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG),  $YAlO_3$ (YAP) и  $Y_4Al_2O_9$  (YAM) [7]. Целью данной работы является исследование системы Y-Al-O при различных режимах термообработки.

### ***Методика исследований***

Для получения покрытий использовали модернизированную установку ННВ-6.6 И1, эксперимент проводили при одновременном осаждении покрытия из двух электродуговых испарителей с двумя однокомпонентными катодами (рис.1).

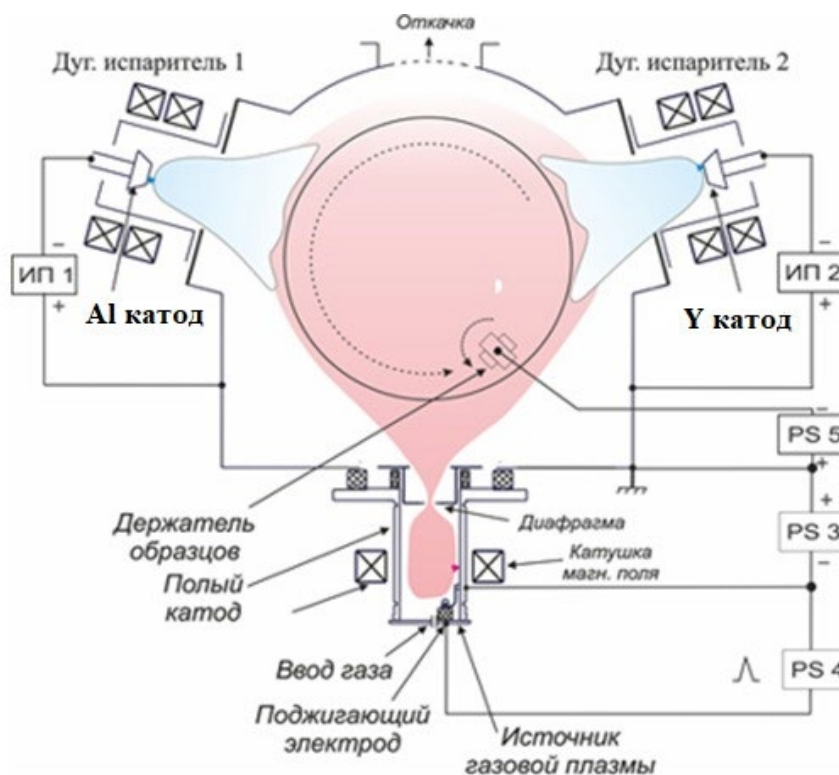


Рис. 1. Установка ННВ-6,6-И1. Схема проведения эксперимента при одновременном осаждении покрытия с вращением рабочего стола

В качестве материалов использовалась молибденовая подложка МЧ ГОСТ 25442-82, на которую наносили покрытие системы Y-Al-O.

Были подобран режим для нанесения покрытия, чтобы обеспечить нужное количество легирующих компонентов, а после осаждения образцы были отожжены в вакуумной печи:

1.  $I_{Al}=60$  (А);  $I_Y=60$ (А)- без термообработки
2.  $I_{Al}=60$  (А);  $I_Y=60$ (А)- термообработка при температуре 800°C.
3.  $I_{Al}=60$  (А);  $I_Y=60$ (А)- термообработка при температуре 1200°C.

### ***Результаты и их обсуждение***

Были получены РЭМ-изображения поперечных сечений образцов, на которых видна микроструктура полученных покрытий (рис.3).

До термообработки (рис. 2, *а*) и при температуре 1200°C(рис. 2, *в*) покрытие сплошное, ровное, без трещин и пор. При температуре 800°C наблюдается откол верхнего слоя, неровности и царапины. На рис. 2, *б* видно, что при температуре 1200°C происходит диффузия подслоя покрытия в подложку.

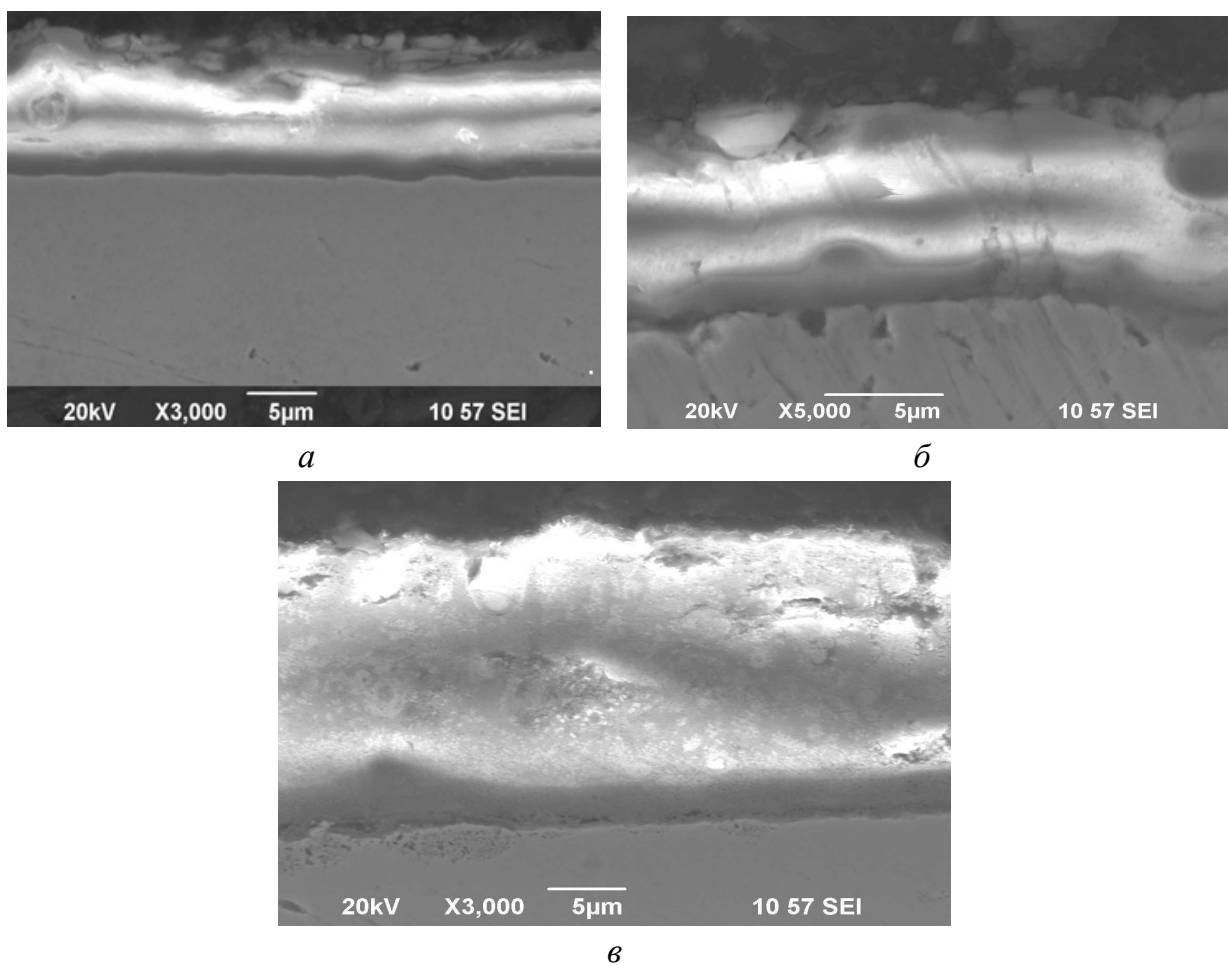


Рис. 2. *а* – РЭМ изображение образца с покрытием до термообработки;  
*б* – РЭМ изображение покрытия после термообработки при температуре 800°C;  
*в* – РЭМ изображение покрытия после термообработки при температуре 1200°C

### *Рентгенофазовый анализ*

На рисунках ниже представлены результаты рентгенофазового анализа (рис. 3, 4).

На рентгенограмме покрытие до термообработки (рис.3), на которой видно, что была аморфная структура.

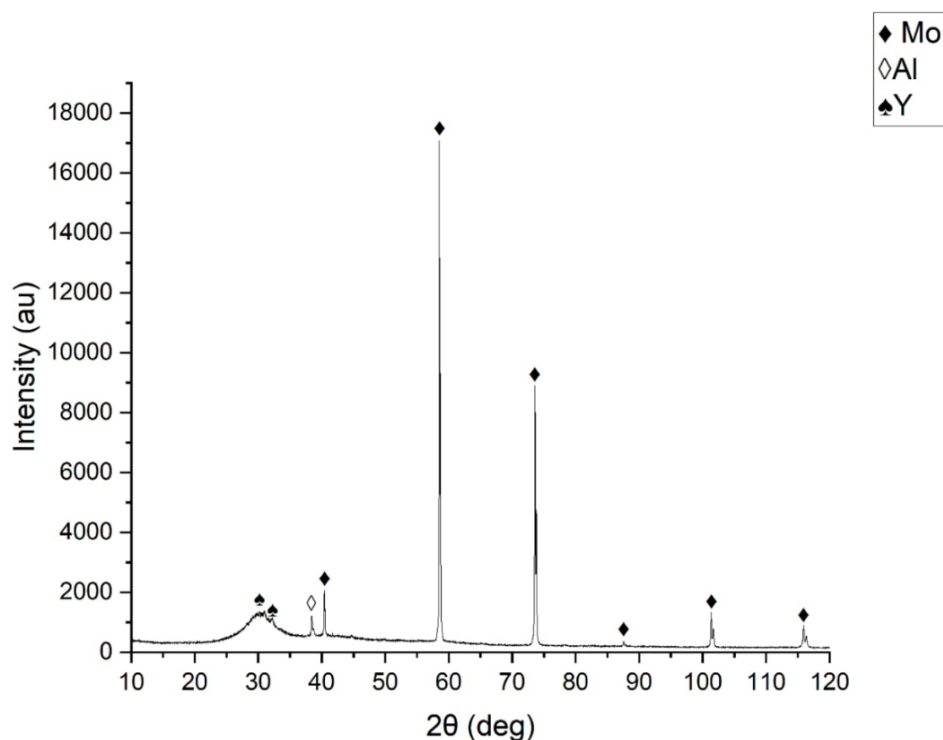
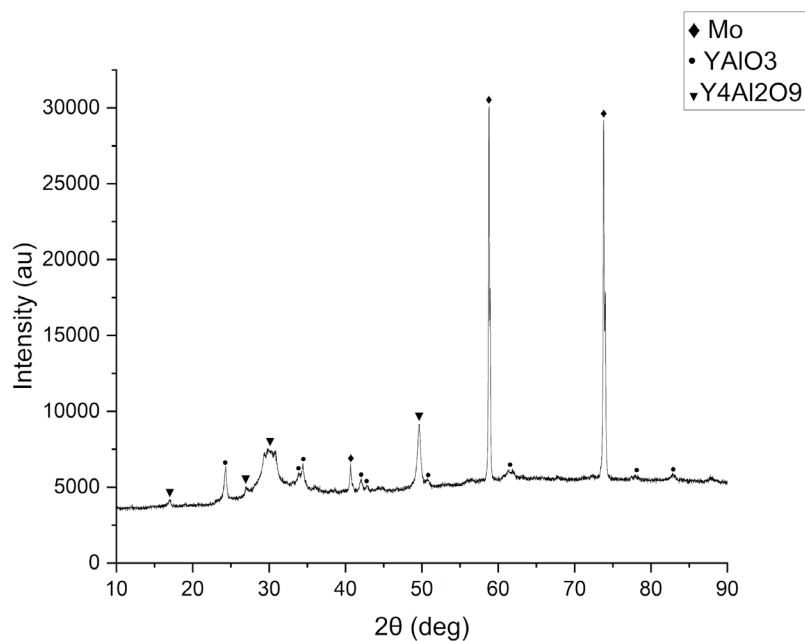
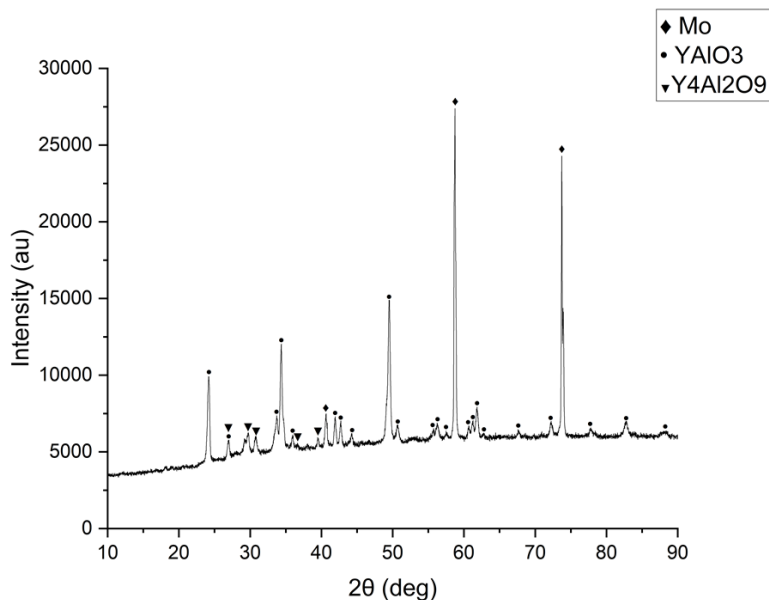


Рис. 3. Рентгенограмма покрытия до термообработки

На рентгенограмме покрытия после термообработки (рис.4), на которых видно, что при 800°C структура кристаллизуются, но не полностью (наблюдается аморфная структура при  $\approx 30(\text{deg})$ ). Образуются такие фазы как  $\text{YAlO}_3$  (YAP) и желаемая фаза  $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_9$  (YAM). При температуре термообработки 1200°C покрытие полностью кристаллизуется, образуется желаемая фаза  $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_9$  (YAM).



*a*



*б*

Рис. 4. а – Рентгенограмма покрытия после термообработки при температуре 800°С;  
 б – Рентгенограмма покрытия после термообработки 1200°С

После термообработки при 800°С количество фазы  $Y_4Al_2O_9$  преобладает (пик данной фазы достигает примерно 10000 ед. (рис. 4, а), чем после термообработки при 1200°С (пик достигает примерно 7000 ед. (рис. 4, б). А также стоит отметить, что с повышением температуры увеличилось количество фазы  $YAlO_3$  (пик данной фазы достигает примерно 17000 ед. (рис. 4, б).

## **Выводы**

Проводилось исследование влияния термообработки на фазовый состав и структуру покрытия на основе системы Y-Al-O. РЭМ-изображения показали, что термообработка не влияет на структуру покрытия, с повышением температуры наблюдается начало диффузии подслоя покрытия в подложку.

В результате рентгенофазового анализа выявлено, что после нанесения покрытия имеет аморфную структуру, а после кристаллизуется, образуя фазы:  $YAlO_3$ ,  $Y_4Al_2O_9$ ;  $Y_3Al_5O_{12}$ ;  $Y_2O_3$ . Результаты исследований показали, что повышение температуры термообработки позволяет увеличить количество фазы  $YAlO_3$ .

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Зоричев А.В., Евдокимов Е.М. Применение перспективных керамических теплозащитных покрытий рабочих лопаток турбины авиационных газотурбинных двигателей// Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук: специальный выпуск, 2018 УДК 68.9
2. И.В. Ситников, Д.А. Максимов, В.Н. Батраков, Ю.А. Боронников. Разработка жаростойкого термобарьерного покрытия для деталей ГТД и ГТУ// Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника – 2022. – № 68. – С. 5-10.
3. Mengchuan Shia, Zhaolu Xuea, Zhenya Zhange, Xiaojuan Jid, Eungsun Byonc, Shihong Zhanga,b. Effect of spraying powder characteristics on mechanical and thermal shock properties of plasma-sprayed YSZ thermal barrier coating// Surface & Coatings Technology Volume 395,2020,125913
4. Robert Vaßen, Maria Ophelia Jarligo, Tanja Steinke, Daniel Emil Mack, Detlev Stöver. Overview on advanced thermal barrier coatings//Surface and Coatings Technology, Volume 205, Issue 4, 2010, Pages 938-942
5. Kadir Mert Doleker, Abdullah Cahit Karaoglanli, Yasin Ozgurluk, Akira Kobayashi. Performance of single YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and double-layered YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings in isothermal oxidation test conditions//Vacuum, Volume 177, 2020
6. Xiaolong Chen, Yiwei Sun, Dexin Chen, Jie Li, Wei Li, Dahai Zeng, Duoli Wu, Binglin Zou, Xueqiang Cao. A comparative investigation on the corrosion degradation of plasma sprayed YSZ and LnMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> (Ln = Nd, Sm, Gd) coatings exposed to the molten V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> salt mixture at 1100 °C//Journal of the European Ceramic Society, Volume 39, Issue 13,2019
7. Zhan, Xun & Li, Zhen & Liu, Bin & Wang, Jingyang & Zhou, Yanchun & Hu, Zijun. (2012). Theoretical Prediction of Elastic Stiffness and Minimum Lattice Thermal Conductivity of Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, YAlO<sub>3</sub> and Y<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>9</sub>//Journal of the American Ceramic Society. 95. 1429. 10.1111/j.1551-2916.2012.05118.x.
8. Xin, Zhou & Xu, Zhenhua & Fan, Xizhi & Zhao, Sumei & Cao, Xueqiang & He, Limin. (2014). Y<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>9</sub> Ceramics as a Novel Thermal Barrier Coating Material for High-Temperature Applications. Materials Letters. 134. 146–148. 10.1016/j.matlet.2014.07.027.
9. Yanchun ZHOU, Huimin XIANG, Xinpo LU, Zhihai FENG, Zhongping LI. Theoretical prediction on mechanical and thermal properties of a promising thermal barrier material: Y<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>9</sub>// Journal of Advanced Ceramics 2015, 4(2): 83–93
10. Saboundji, A., Jaquet, V., Mataveli Suave, L., Rame, J. (2020). Development of a New Coating Compatible with Third-Generation Nickel-Based Superalloys and Thermal Barrier Coatings. In: , *et al.* Superalloys 2020. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham.

## СЕКЦИЯ 2.5 СВАРОЧНЫЕ, ЛИТЕЙНЫЕ И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.179.16

Д. А. АДЖИБАЕ

*danno23@mail.ru*

Науч. руковод. – д-р техн. наук, проф. В. В. АТРОЩЕНКО, М. П. САВИЧЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ РАВНОТОЛЩИННЫХ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДИФРАКЦИОННО-ВРЕМЕННЫМ МЕТОДОМ

*Аннотация.* В работе рассматриваются вопросы разработки методики ультразвукового контроля стыковых сварных соединений дифракционно-временным методом, а также критерии идентификации и интерпретации обнаруженных дефектов.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, TOFD, сварка

С момента разработки дифракционно-временного метода (TOFD) в 1970-х годах, популярность его постоянно растет. Его основное предназначение – быстрый механизированный или автоматический контроль протяженных стыковых сварных соединений.

В отличие от эхо-импульсного метода, в основе TOFD лежит принцип регистрации сигналов, рассеянных (дифрагированных) на гранях дефекта, а не отраженных от его поверхности. Амплитуда сигнала не используется для определения размера дефекта. Размер несплошности определяется временем прохождения дифракционных сигналов. Поэтому метод TOFD применяется для поиска дефекта и для уточнения его глубины залегания и высоты, но отбраковка по результатам контроля данным методом не ведется. Для проведения отбраковки TOFD совмещают с контролем эхо-импульсным методом группой одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей или фазированной решеткой. Это позволяет также проконтролировать корневую и верхнюю части сварного шва – характерные мертвые зоны метода TOFD.

Из-за расхождения дифрагированных сигналов во всех направлениях и широкого охвата контролируемого объема при применении TOFD отсутствует необходимость дополнительном в контроле основного металла околошовной



зоны на расслоения прямым преобразователем. Также этот метод чувствителен к любому типу дефектов, независимо от их ориентации. Он имеет позволяет обнаруживать вертикально ориентированные дефекты, плохо выявляемых эхо-импульсным методом. Например, межваликовые несплавления, характерные для сварки сварных соединений с узкой разделкой кромок, отличной от 30 градусов.

В настоящий момент за рубежом и на территории Республики Беларусь разработаны и введены в действие все необходимые стандарты для широкого применения метода TOFD. В России нормативная документация проходит стадию утверждения. Для применения метода требуется дополнительное обучения дефектоскописта настройке и калибровке оборудования, и расшифровке сканов. Обучение правильной интерпретации дефектов по сканам проводится на изображениях типовых дефектов. К сожалению, в имеющейся нормативной документации таких изображений приведено недостаточно. Актуальной задачей является разработка “атласа дефектов”, содержащего соответствие результатов ультразвукового контроля методом TOFD с каждым типом сварочного дефекта. Для этих целей необходимо сравнивать полученные сканы TOFD с результатами радиографического контроля, ультразвукового контроля “традиционным” эхо-импульсным методом и металлографических исследований.

TOFD реализуется с помощью пары пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) продольных волн с одинаковыми углами ввода и широкой диаграммой направленности, позволяющий проконтролировать объект за один проход без перемещения в поперечно к шву направлении. Для толщин более 9мм применяются ПЭП с углами ввода 50° и 60° и частотами от 5 до 10 МГц [7].

Точка пресечения осей диаграмм направленности ПЭП и приемника выбирается на глубине, равной 2/3 толщины контролируемого образца (рис.1).

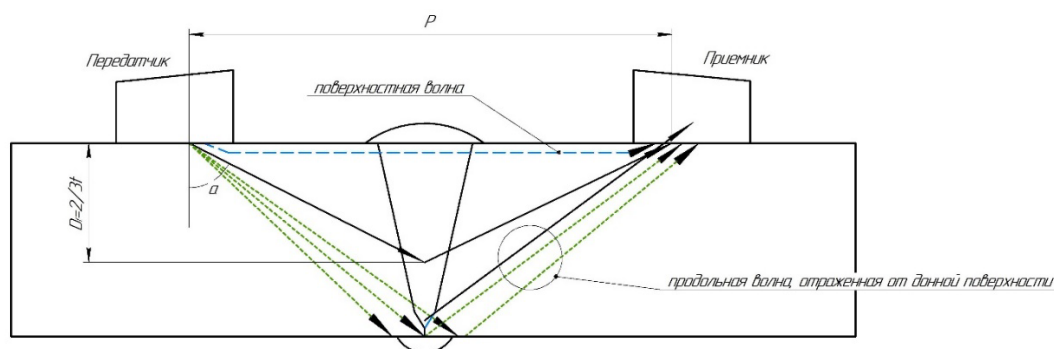


Рис. 1. Выбор расстояния между преобразователями TOFD

Для равнотолщинного сварного соединения между точками ввода приемника и передатчика PCS, мм, рассчитывается по формуле:

$$PCS = 2 * \frac{2}{3} * t * tg(\alpha)$$

где t-толщина стенки, мм;  $\alpha$ -угол ввода, град.

При работе излучателя формируется подповерхностная волна, распространяющаяся непосредственно под верхней поверхностью контролируемого объекта, и продольная волна, поступающая на приемник при отражении от донной поверхности. Поперечная волна, возникающая в результате преломления продольной волны, приходит к приемнику после отраженной продольной. Сигналы TOFD отображаются на экране в виде А-скана недетектированного сигнала. На В-скане (TOFD-скане) амплитуда сигнала отображается в градациях серого цвета. Отображение двухполярного невыпрямленного сигнала дает информацию о фазе сигналов. Подповерхностная волна и волна, отраженная от донной поверхности всегда находятся в противофазе.

Дефект считается четко различимым и подлежит оценке, если дифракционные сигналы от верхней и от нижней граней дефекта разделяются однозначно. Если изображение TOFD нечеткое и сигнал в каналах, работающих по эхо-импульсному методу, отсутствует, то такую индикацию следует расценивать как несущественную и при анализе не рассматривать. Дефект считается плоскостным с ориентацией, отличающейся от продольной и поперечной, если он четко различим, но сигналы в каналах, работающих по эхо-импульсному методу, для данного дефекта отсутствуют. Типичный пример отображения (А-развертки) показан на рис.2.

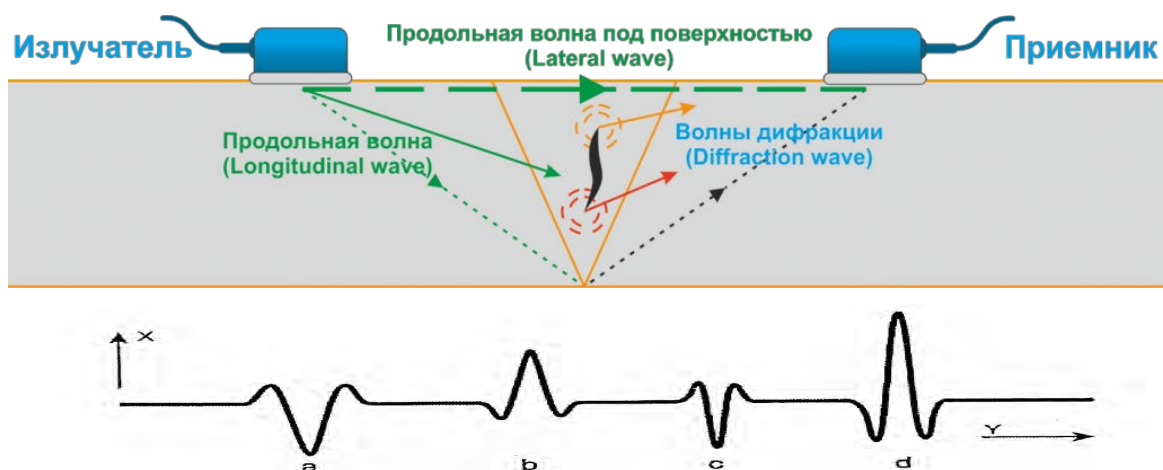


Рис. 2. Изображение дифракции волн на верхнем и нижнем краях дефекта:  
*X – амплитуда; Y – время; a – боковая волна; b – сигнал от верхнего края  
 несплошности; c – сигнал от нижнего края несплошности;  
 d – эхо-сигнал от донной поверхности*

Длину индикаций TOFD следует определять при помощи параболических курсоров, исходя из величины перемещения преобразователей вдоль сварного соединения. Реальная протяженность дефекта может отличаться от измеренной величины по причине того, что ширина диаграммы направленности ультразвукового преобразователя не равняется нулю.

Глубина залегания дефекта при проведении TOFD измеряется от поверхности более тонкой пластины сварного соединения до нижней грани дефекта. Положение верхней грани дефекта вычисляется по сигналу от дефекта с минимальным временем прихода. При УЗК равнотолщинного сварного соединения глубина залегания источника дифрагированного сигнала автоматически определяется встроенным калькулятором дефектоскопа.

Начало развертки должно быть установлено как минимум за 1 мкс до начала сигнала от поверхностной волны и заканчиваться как минимум через 1 мкс после первого сигнала от донной поверхности. Усиление сигнала должно быть таким, чтобы уровень сигнала от головной волны находился от 20% до 30% предельной высоты экрана. Если уровень помех превышает половину сигнала от головной волны, то необходимо выбрать преобразователи с более низкой частотой, при этом увеличится мертвая зона и снизится разрешающая способность по

глубине. Чувствительность метода TOFD значительно снижается при расположении дефектов вблизи к поверхности (до 1/3 толщины стенки от поверхности сканирования).

При настройке чувствительности представлены способы настройки чувствительности для метода TOFD. Нормативный документ ISO 17635 регламентирует четыре уровня чувствительности: А, В, С, D (таблица 1,2)[2]. При этом достоверность контроля повышается от уровня А к уровню D. Уровень А используется для контроля сварных соединений толщиной до 50 мм. При этом для настройки чувствительности нет необходимости использовать контрольные образцы. В то время, как для уровней чувствительности В, С и D проверка чувствительности проводится с помощью контрольных образцов. А для уровней С и D дополнительно необходимо проводить верификацию.

Таблица 1

Уровни контроля

Уровень контроля	TOFD-конфигурация	Контрольный образец для проведения верификации	Контрольный образец для настройки чувствительности	Смещенное сканирование	Разработка инструкции по контролю
А	В соответствии с таблицей 2	Нет	Нет	Нет	Не требуется
В	В соответствии с таблицей 2	Нет	Да	Нет	Не требуется
С	В соответствии с таблицей 2	Да	Да	а)	Требуется разработка
Д	В соответствии с техническим заданием	Да	Да	а)	Требуется разработка
Должны быть определены необходимость, число и позиция смещенных сканирований.					

Для идентификации и интерпретации дефектов при анализе сканов TOFD следует обращать внимание на следующие характеристики:

- отклонение сигнала от головной волны;
- отклонение сигнала от донной поверхности;
- появление сигналов между головной волной и отражением от донной поверхности;

– фаза сигналов между головной волной и отражением от донной поверхности;

– сигналы с изменением фазы после первого отражения от донной поверхности.

Типовое изображение дефекта на TOFD скане приведено на рис. 3 [1,7].

Таблица 2

Рекомендуемые TOFD-конфигурации для простых стыковых швов  
в зависимости от толщины стенки

Толщина t, мм	Количество TOFD-конфигураций	Диапазон глубины At, мм	Средняя частота/, МГц	Угол ввода (продольные волны)а	Размер пьезоэлемента, мм	Пересечение акустических осей
6–10	1	0–t	15	70°	2–3	2/3t
»10–15	1	0–t	15–10	70°	2–3	2/3t
»15–35	1	0–t	10–5	70°–60°	2–6	2/3t
»35–50	1	0–t	5–3	70°–60°	3–6	2/3t

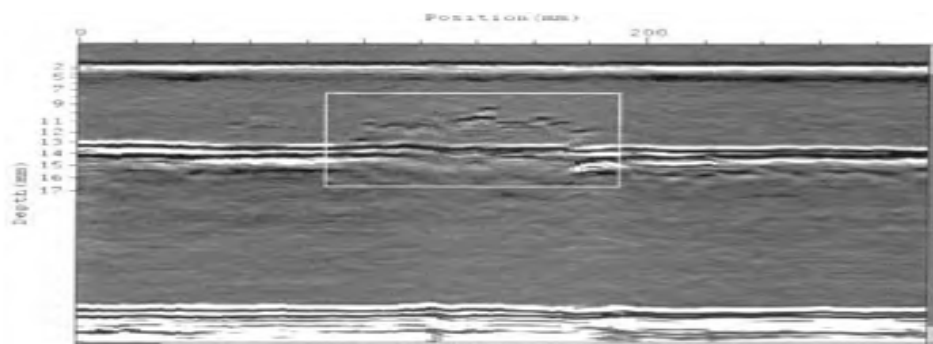


Рис. 3. Непровар в корне шва

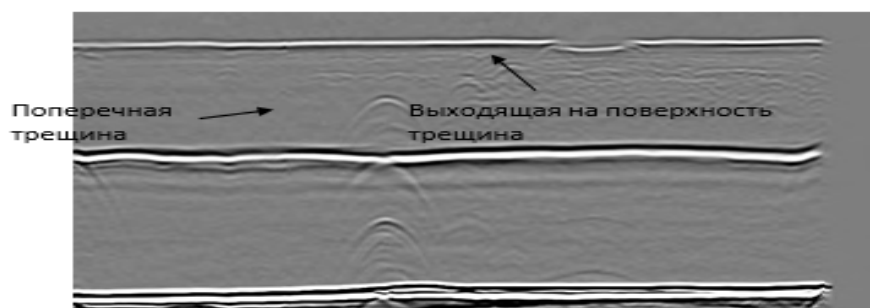


Рис. 4. Поперечные и продольные дефекты на TOFD-изображении

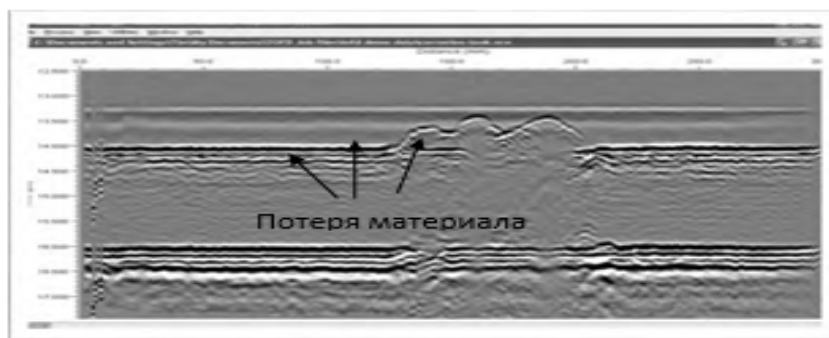


Рис. 5. Коррозия в резервуаре

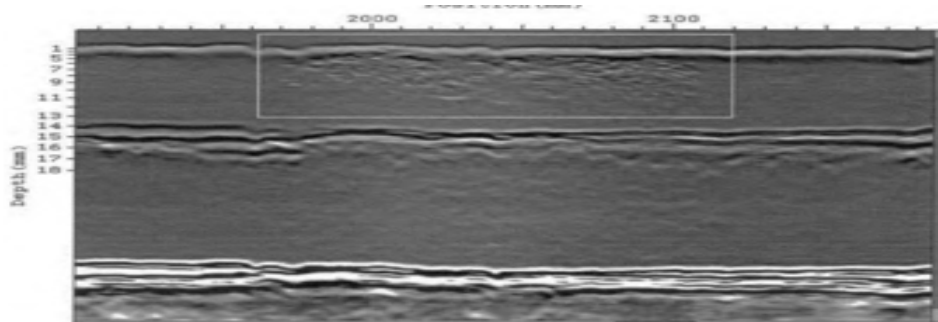


Рис. 6. Скопление газовых пор в сварном шве

### **Выводы**

1. В ходе работы была разработана методика проведения контроля методом TOFD стыкового сварного соединения толщиной 16 мм.
2. В ходе экспериментальных работ получены соответствия между основными видами дефектов стыковых сварных соединений и результатами контроля на сканах TOFD. Описаны признаки интерпретации по форме сигналов на скане TOFD.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. СТБ EN 583-6-2013 Контроль неразрушающий. Ультразвуковой метод. Часть 6. Дифракционно-временной метод обнаружения и измерения несплошностей
2. СТБ EN 10863 Контроль неразрушающий сварных соединений. Ультразвуковой метод. Применение дифракционно-временного метода (TOFD).
3. СТБ EN 15617-2013 Контроль неразрушающий сварных соединений. Дифракционно-временной метод (TOFD). Границы допустимости.
4. ISO 16828:2012 - Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Дифракционно-временной метод (TOFD), как метод обнаружения и определения размеров несплошностей.
5. ISO 23279:2010 - Неразрушающий контроль сварных швов. Ультразвуковой контроль. Определение параметров индикаций в сварных швах.
6. Сайт компании «Olympus» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http : // www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com). – Дата доступа : 20.02.2022.
7. С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко; О. С. Сергеева. Приборы и методы акустического контроля. Методические указания к самостоятельной работе студентов специальности 1-540102 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». – Могилев; ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет, 2014.

УДК 621.2.6

М. Х. ДАВЛЕТОВ

*maruchD@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Р. В. НИКИФОРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА ПОВОРОТНОГО СОПЛА НА ПРИМЕРЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*Аннотация.* Данная статья посвящена анализу технологичности корпуса поворотного сопла, изготовленного сваркой и аддитивными технологиями. Рассмотрены такие параметры, как КИМ, трудоемкость, количество типов применяемого оборудования.

*Ключевые слова:* сварка; аддитивное производство; КИМ; трудоемкость; прямое лазерное выращивание.

### ***Введение***

С каждым годом аддитивное производство все больше и больше внедряются в производство. Аэрокосмическая область, обладая передовыми технологиями, также постепенно внедряет аддитивные технологии. Но, пытаясь угнаться за трендами, не стоит забывать и о традиционных методах, которые успешно применяются не одно десятилетие.

Одним из способов сравнения разных технологий является анализ технологичности, что и является целью данной статьи на примере корпуса поворотного сопла.

*Конструкция узла.* Корпус поворотного сопла авиационного двигателя предназначен для вывода отработавших горючих газов. Корпус входит в модуль реактивного сопла, а устанавливаемые в корпус экраны служат для защиты его от перегрева и соответственно от колебания. Узел служит для усиления конструкции поворотного устройства и реактивного сопла. Корпус поворотного сопла представляет собой цилиндрическое тело, состоящее из шести деталей: фланец передний 1, шпангоут 2, пояс крепления 3, шпангоут 4, обечайка 5, 6 обечайка, 7 фланец задний. 2-6 части являются тонкостенными обечайками.

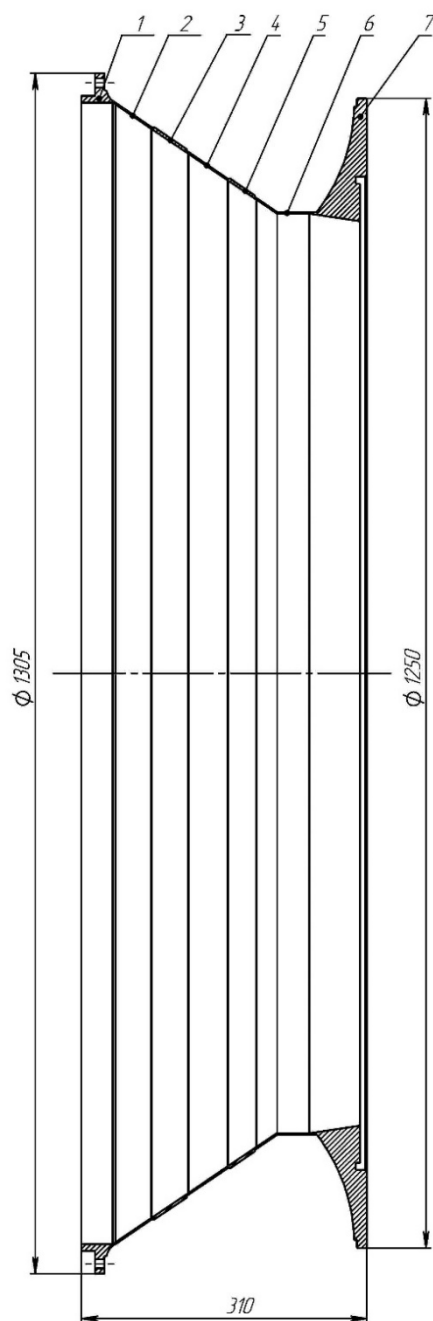


Рис. 1. Эскиз поворотного сопла

*Анализ технологичности сварного узла.* Корпус поворотного сопла делится на 7 частей из-за переменной толщины, что способствует меньшей механ обработке, что в свою очередь, увеличивает КИМ. Передний и задний фланцы изготавливаются литьем.

Части узла, представляющие тонкостенную обечайку, изготавливаются из листового проката гибкой на валковом станке. Размеры листов под заготовки представлены в таблице 1.



Размеры листов проката

Детали по позициям на сборочном чертеже	№2	№3	№4	№5	№6
Размеры листа (ширина, длина, толщина), мм	500x4000x1,5	500x4000x3	500x3600x1,5	500x3400x3	500x3400x1,5

*Расчет КИМ.* Одним из критериев рациональности выбора способа изготовления заготовки детали является коэффициент использования металла («К.И.М.»). Коэффициент использования металла определяем по формуле:

$$\text{К.И.М.} = \frac{F \cdot n}{B \cdot L} * 100 \%, \quad (1)$$

где: В - ширина листа, мм; L - длина листа, мм; F- площадь детали без отверстий, мм<sup>2</sup>; n - количество деталей, получаемых из листа.

$$\text{К.И.М.}_2 = \frac{148804 * 12}{4000 * 500} * 100 \% = 89 \%$$

Аналогичны посчитан КИМ для других деталей, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

КИМ деталей

	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
КИМ, %	90	89	80	83	81	84	91

Как видно из таблицы 2, большего всего КИМ у частей, изготовленных литьем (1 и 7).

*Выбор способа сварки.* Одним из способов сварки никеля, позволяющих получить удовлетворительное качество соединений, является аргонодуговая сварка. При аргонодуговой сварке расплавленный никель в дуге и сварочной ванне надежно предохраняется от окисления защитной струей аргона, в результате чего обеспечивается постоянное и высокое качество сварных соединений. Этот способ хорошо зарекомендовал себя при сварке никеля толщиной до 2 мм.

В связи с тем, что требуются высокое качество шва и высокая прочность на разрыв, следует применять *TIG* сварку с присадочной проволокой.

Аргонодуговая *TIG* сварка – универсальная технология сваривания металлических изделий при помощи вольфрамовых электродов. Она позволяет создавать сплошные швы на тонких деталях из неферромагнитных материалов и их сплавов. Сварка *TIG* активно используется в отраслях тяжелой промышленности, в автосервисах и небольших мастерских.

Все соединения стыковые, толщина соединяемых деталей – 1,5 мм.

В виду того, что параметры б сварных швов одинаковы (кроме длин), то площадь сечения наплавленного металла шва будет считаться по следующей формуле:

$$F = S * b + 0,75(e * g + e_1 * g_1) = 4,5 \text{ мм}^2 \quad (2)$$

Масса наплавленного металла считается по формуле:

$$G_H = F * l * \rho \quad (3)$$

Результаты расчетов массы наплавленного металла представлены в табл. 3.

Таблица 3

Масса наплавленного металла сварных швов

Сварные швы	№1	№2	№3	№4	№5	№6
Масса, г	153	146	140	132	127	123

*Расчет времени изготовления стандартными методами и количества применяемых типов оборудования.* Скорость сварки в нашем случае равна 0,3 м/мин. Исходя из этого найдем время сварки сварных швов:

$$t = \frac{S}{V} \quad (4)$$

где S – длина сварного шва, V- скорость сварки.

Время сварки каждого шва представлено в таблице 4.

Таблица 4

Время сварки швов

Сварные швы	№1	№2	№3	№4	№5	№6
Время, мин	13	12,44	11,87	11,32	10,79	10,46

Общее время сварки:

$$T_{об} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 = 69,88 \text{ мин} \quad (5)$$

Время изготовления деталей из проката (включает время раскроя, гибки):

2-20 мин, 3-18мин, 4-16мин, 5-16мин, 6-14 мин.

Общее время изготовления узла включает время получения деталей и время сварки:

$$T_{об \text{ дет}} = 120 + 150 + 69,88 + 20 + 18 + 16 + 16 + 14 = 423,88 \text{ мин} = 7,06 \text{ ч} \quad (6)$$

Для изготовления стандартными методами нужно оборудование для литейного производства, резки и гибки тонкостенных обечаек, сварочное оборудование и для механообработки. В итоге, получаем, что для производства корпуса поворотного сопла необходимо 5 типов оборудования.

*Анализ технологичности выращенного узла.* В связи с габаритами узла, его материала остановимся на технологии прямого лазерного выращивания. По типологии, технология прямого лазерного выращивания (*laser metal deposition – LMD*) относится к аддитивным технологиям с прямым подводом энергии и материала в зону построения (*direct energy deposition*), а оборудование для реализации этой – к 3D-принтерам. В качестве печатного материала используется металлический порошок. Его расплавляют лучом высокоомощного лазера. В результате быстрого нагрева и охлаждения материала формируется мелкозернистая структура, обеспечивающая высокую прочность выращенных изделий.

В зависимости от габаритов и конструкции изделий, точность печати заготовок соответствует 10-13 качеству, скорость же выращивания составляет до 2,5 кг изделия в час.

Для расчета КИМ воспользуемся массами выращенного и готового изделия, взятыми в программе *Solid Works*. Расчет КИМ:

$$\text{КИМ} = \frac{m_d}{m_b} * 100\% = 87,2\% \quad (7)$$

Исходя из производительности наплавки до 2,5 кг/ч, рассчитаем время выращивания узла:

$$T = \frac{m}{P} = 59,2 \text{ ч} \quad (8)$$

После печати изделия следует произвести механическую обработку. В данном случае в отличие от традиционных методов, отсутствуют технологические разъемы.

Сравнение критериев технологичности представлено в таблице 5.

Таблица 5

Таблица сравнения критериев технологичности

Способ получения детали	КИМ, %	Время изготовления, ч	Количество типов оборудования
Стандартные методы	85,4	7,06	5
Аддитивные технологии	87,2	59,2	2

Как видно из таблицы 5, аддитивные технологии выигрывают в КИМ, требуется меньше оборудования, но при этом время изготовления больше.

### ***Заключение***

В данной статье были сравнены показатели технологичности для изготовления корпуса поворотного сопла традиционными методами и аддитивными. В целом данный метод целесообразен для не крупно серийного производства. Для производства аддитивным методом невозможно средне- и крупносерийное производство ввиду большой трудоемкости изготовления. Данный метод производства выигрывает при изготовлении опытных образцов, т. к. не требуется проектирования и изготовления специальной оснастки.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анализ термдеформационных процессов в зоне термического влияния при сварке жаропрочного никелевого сплава / В.Е. Эйдельштейн, Б.Ф. Якушин, В.И. Махненко и др. // Автоматическая сварка. 1980 №1. С. 11–15.
2. Плавка никеля и никелевых сплавов [Электронный ресурс] Режим доступа – <http://www.tehlib.ru/tpip/plavka-nikelya-i-nikelevih-splavov.htm> (Дата обращения – 26.05.2021)
3. Сварка никеля и его сплавов. Багрянский К.В., Кузьмин Г.С. Машгиз, 1963 г.
4. Технология механической обработки сварных конструкций: практикум по дисциплине «Технология механической обработки сварных конструкций» /Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; сост.: О.В. Коленченко. – Уфа: РИК УГАТУ, 2021. – 60с.
5. Институт лазерных и сварочных технологий [Электронный ресурс] Режим доступа – [http://www.ilwt-stu.ru/research/additive\\_technologies/](http://www.ilwt-stu.ru/research/additive_technologies/) (Дата обращения – 12.06.2021)

УДК 669

Э. Р. ЗАЙНУЛЛИНА

*z.r.r2000@bk.ru*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. В. В. АСТАНИН

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ СПЛАВА В95

**Аннотация.** Сплав В95 был выбран по требованиям конструкторов, ЭЛС из технологических возможностей. Было исследовано 36 швов проплавленных в заготовках толщиной 15 мм на установке ЭЛС по различным режимам. Внимание было сосредоточено на микроструктуре области шва, а факторы локального упрочнения оценивали измеряя микротвердость методом Виккерса при нагрузке 100 гс и выдержке 10 с. Для уменьшения шага удаления отпечатков от плоскости шва, линии расположения отпечатков наклонили относительно плоскости шва.

**Ключевые слова:** ЭЛС, структура, В95, микротвердость.

Высокопрочный алюминиевый сплав В95 обладает невысокой трещиностойкостью, и по этой причине для него не применяют аргонодуговую сварку. Целью данной работы является исследование возможностей электронно-лучевой сварки, в частности, ее влияние на структуру области шва и возникновение трещин.

Первой задачей было поставлено выявить влияние процессов локального плавления и быстрой кристаллизации на структуру и свойства высокопрочного сплава в различных зонах области шва. Был выбран шов, проплавленный на облегченном режиме:  $U=60$  кВ;  $I=40$  мА;  $v=20$  мм/с. Структура сплава в области этого сварного шва показана на рисунке 1. Она включает зоны основного металла (1); термического влияния (ЗТВ, 2) и литой зоны (3). В последней выделяют головку (4) и корень шва (5). В них часто наблюдается пористость и раковины и, по этой причине, эти зоны удаляют с реальных изделий. Интерес представляет центральная зона шва, выделенная прямоугольником.[1,2]

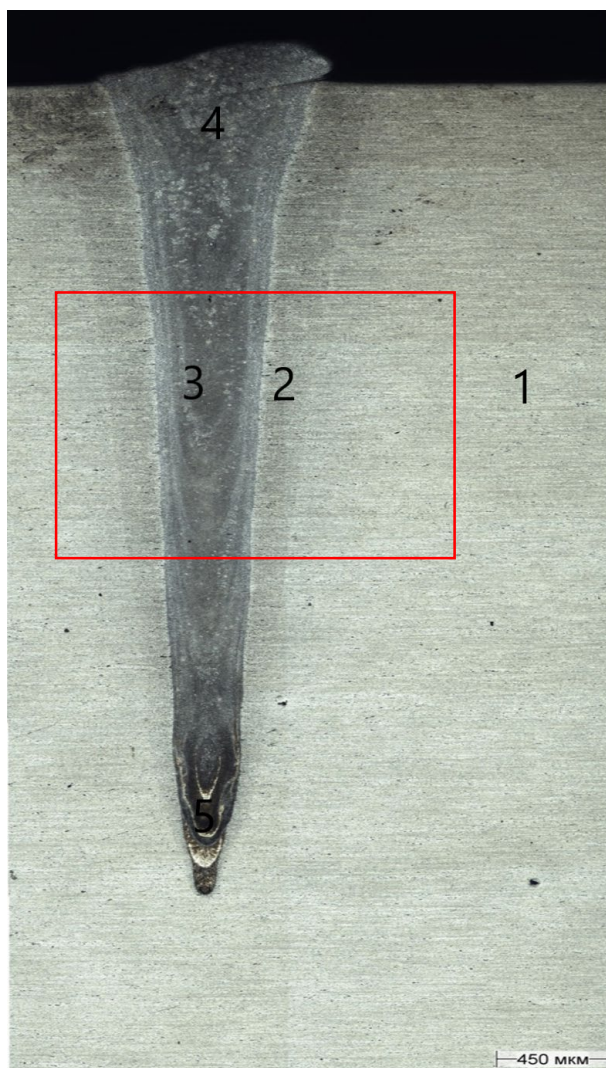
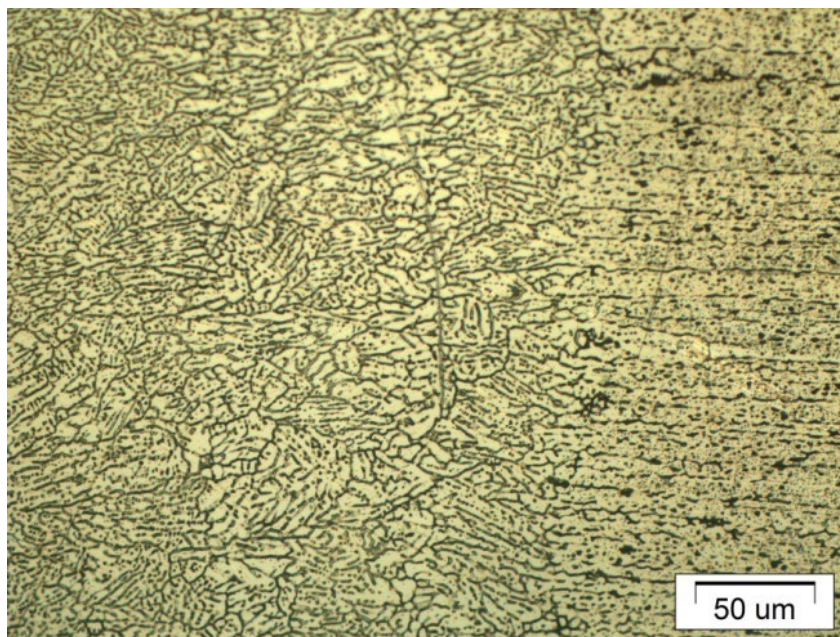
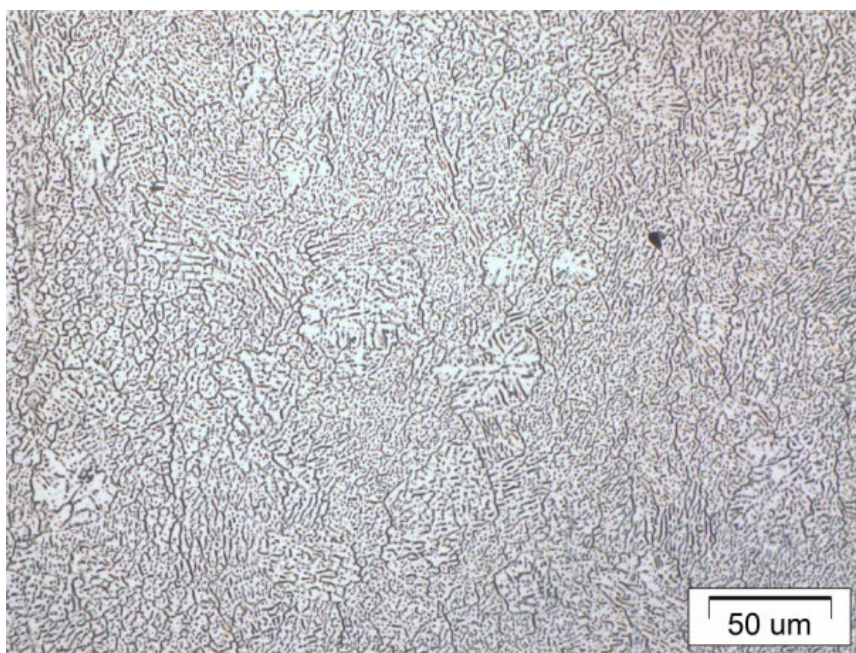


Рис. 1.Строение сварного шва №2

Типичная микроструктура средней части шва представлена на рисунке 2. Структура исходного сплава характерна для прокатанного и термически упроченного состояния. Большая часть дисперсных интерметаллидных фаз равномерно рассеяна по объему материала. Вместе с тем, имеет место строчечный характер расположения частиц, как результат прокатки. По мере приближения к сварному шву заметно укрупнение частиц интерметаллидных фаз, вызванное их коагуляцией в зоне термического влияния. От границы расплава начинается зона вытянутых кристаллитов со средним размером 9мкм, содержащая микродендриты. Следом идут зоны послойной кристаллизации и, наконец, центральная часть ванны с более крупными дендритными зернами со средним размером 12мкм (Рисунок 2,б). [2]



*a*



*б*

Рис. 2. Микроструктура сварного шва: граница литой зоны и ЗТВ (*a*) и зона равноосных кристаллитов (*б*)

Зависимость микротвердости от положения относительно границы шва представлена на рисунке 3. Повышенное значение HV ( $143 \pm 2$  МПа) в ЗТВ и литой зоне можно объяснить закалкой пересыщенного твердого раствора и высоким уровнем остаточных напряжений [3].

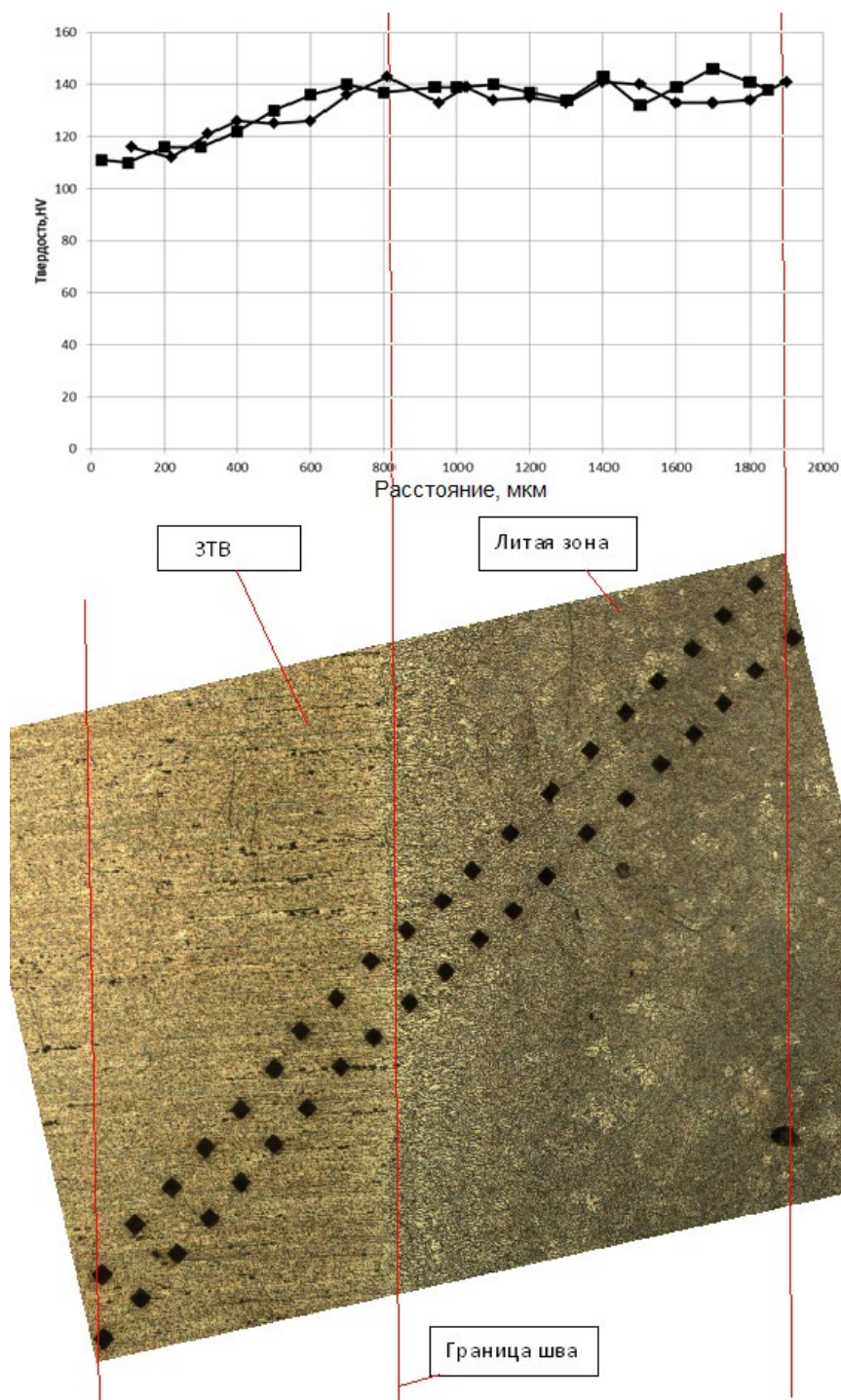
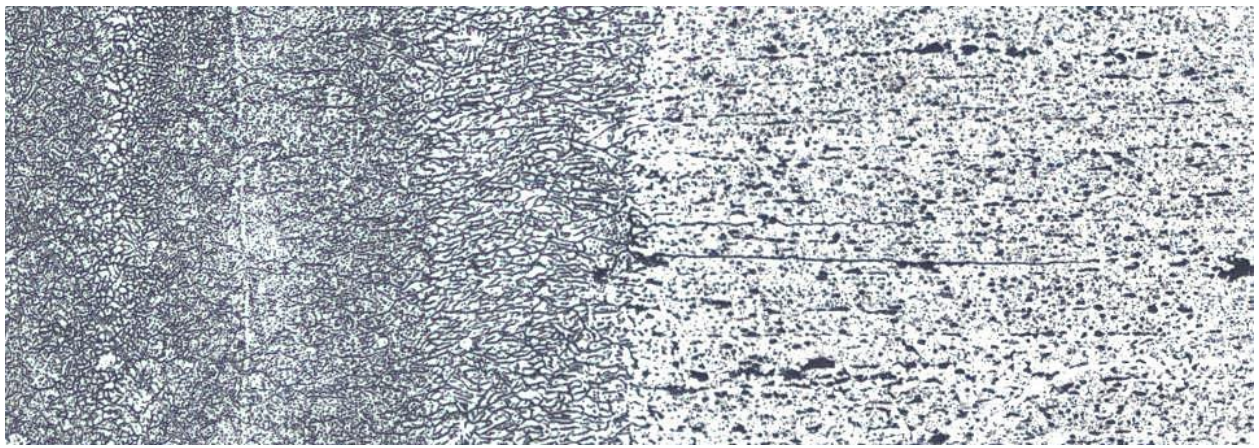


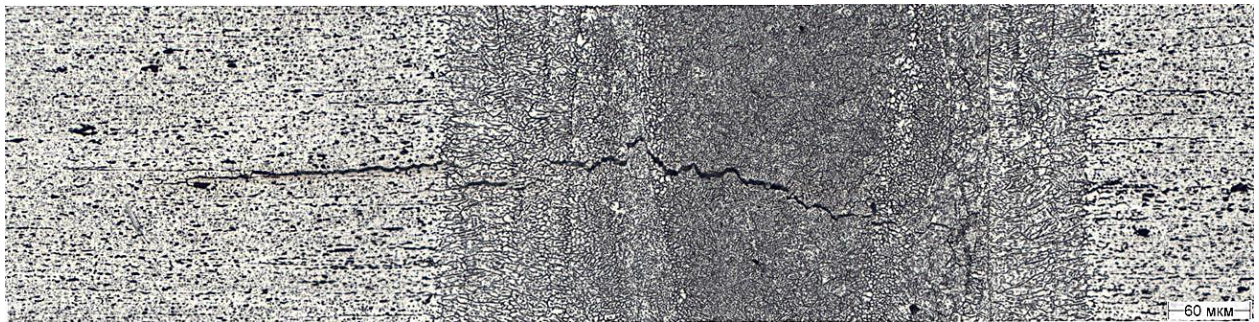
Рис. 3. Зависимость HV от положения относительно границы шва

Высокий уровень остаточных напряжений способен вызывать появление сварочных трещин. В данном сварном шве трещин не обнаружено, но при повышении скорости ЭЛС до  $v = 30$  мм/с замечены трещины в ЗТВ (рис. 4, а), а на режиме  $I = 50$  мА;  $v = 20$  мм/с добавились трещины в литой зоне (рис. 4, б).





*a*



*б*

Рис. 4.

### ***Заключение***

Электронно-лучевая сварка высокопрочного алюминиевого сплава В95 возможна, но требует тщательного подбора режима, исключающего образование сварочных трещин. Следует также уделить внимание последующей термической обработке деталей для снятия остаточных напряжений и выравнивания механических свойств сварного шва с основным материалом.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Структура сварного шва: Методические указания по курсу «Материаловедение и технологии производства материалов» // Составитель: В.П. Ротштейн. Томск: Центр учебно-методической литературы Томского государственного педагогического университета, 2003. 12 с.
2. Арзамасов Б.Н. и др. Материаловедение. - М: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004.- 648с.
3. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов, 1976.

УДК 621.791

В. К. ОРЛОВ

*valera.orlov526@gmail.com*

Науч. руковод. – ст. преп. В. Р. ГАЛИМОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО КОРПУСА КАК СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

**Аннотация.** Алюминиевые сплавы находят свое применение в промышленности за счет своего малого удельного веса и прочностных и химических свойств. Однако свариваемость алюминиевых сплавов сопряжена с рядом сложностей. В данной работе произведен анализ технологичности корпуса электроагрегата как сварной конструкции. Был выбран на замену исходного сплава аналог с лучшими показателями свариваемости. Были подобраны типы сварного соединения и ориентировочные режимы автоматической MIG-сварки.

**Ключевые слова:** сварка алюминия, MIG-сварка.

Малый удельный вес алюминия является тем определяющим фактором, который позволяет создавать легкие и в то же время прочные конструкции самолетов, ракет и других летательных аппаратов. Алюминий находит свое применение в промышленности при изготовлении различных конструкций, в том числе емкостей для переработки, хранения и перевозки химических и молочных продуктов. Алюминий относительно дешев, обладает высокой пластичностью, удельной прочностью, коррозионной стойкостью, а также имеет высокую электропроводность. Однако такие его теплофизические свойства, как низкая температура плавления, высокая теплоемкость, удельная теплота плавления, теплопроводность, очень большое сродство к кислороду и высокая растворимость водорода в жидком металле, налагают свои особенности и затрудняют процесс сварки алюминиевых сплавов.

Считается, что сварка TIG является основной для сварки алюминиевых сплавов, но MIG-сварка является более производительной, однако при ней повышается склонность швов к образованию пор, что требует большего внимания к разработке технологии MIG-сварки.

Данная работа посвящена анализу возможности изготовления элемента корпуса агрегата как сварной конструкции.

Изначально корпус (рисунок 1) планировалось изготавливать из сплава Д16.

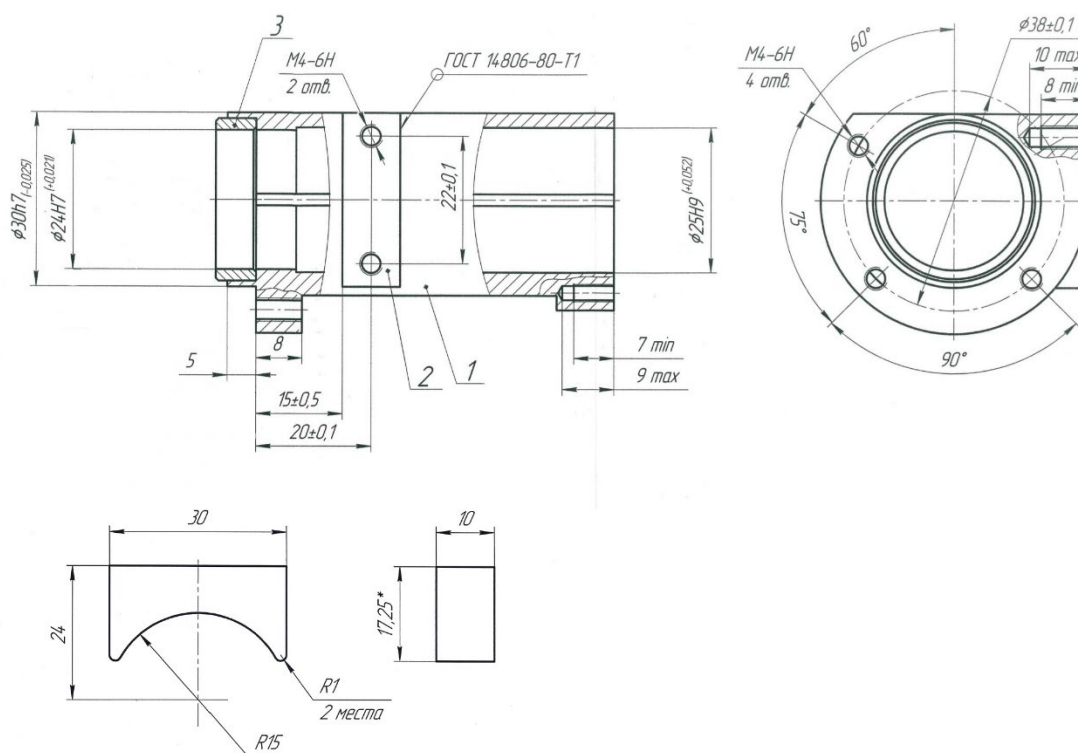


Рис. 1. Внешний вид корпуса (а) и кронштейна (б)

Сплав Д16 относится к деформируемым алюминиевым сплавам системы Al-Cu-Mg. Химический состав приведен в таблице 1.

Таблица 1

#### Химический состав Д16

марка	Массовая доля элемента, %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Прочие
Д16	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	0,15	-	<0,15

Д16 имеет повышенную склонность к кристаллизационным трещинам [1]. При ограничении содержания элементов в пределах ГОСТ и добавке 0,1 и 0,2% Ti соответственно в сплав Д16 склонность к трещинам можно снизить. Снижение склонности к трещинообразованию швов на сплаве Д16 может быть достигнуто применением сварочных проволок В61 и СВАК5 [2]. Однако, даже в таком случае сплав имеет повышенную склонность к трещинам и порам, что заставляет задуматься о поиске аналогов Д16.

В качестве аналогов рассматривались сплавы как такой же системы легирования, так и системы легирования Al-Mg. Критерий выбора – это свариваемость стоимость и механические характеристики. Для сравнения были выбраны сплавы Д19 и АМг6 (таблица 2).

## Сравнение механических свойств

Сплав	Прокат	Толщина, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	Цена, руб/кг
Д16	Лист	2-4	450-460	320-360	250
Д19	Лист	2-4	440-450	310-400	400
АМг6	Лист	2-4	420-440	300-320	200

Как видно из таблицы сплав Д19 немного превосходит сплав Д16, а АМг6 наоборот немного уступает. В тоже время сплав АМг6 значительно дешевле обоих дюралюминиевых сплавов и обеспечивает лучшую сопротивляемость образованию пор и горячих трещин, учитывая сравнительно невысокие статические нагрузки изделия предлагается заменить сплав Д16 на сплав АМг6.

Сплав АМг6 относится к деформируемым алюминиевым сплавам системы Al-Mg. АМг6 хорошо сваривается дуговой сваркой плавящимся и неплавящимся электродом, при этом рекомендуемая проволока Св-АМг6 Химический состав приведен в таблице 3.

Таблица 3

## Химический состав АМг6

марка	Массовая доля элемента, %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Прочие
АМг6	0,4	0,4	0,1	0,5-0,8	5,8-6,8	-	0,2	0,02-0,1	-	<0,1
СвАМг6	< 0,4	< 0,4	< 0,1	0,5-0,8	5,8-6,8	-	<0,2	0,1-0,2	-	<1,2

Выбор типа сварного соединения определяется на основании ГОСТ 14806-80 и толщины в месте сварки. Для соединения толщиной 2-2,5мм доступны сварные соединения Т1, Т3, У5, У4. Из предложенных типов соединений для данной конструкции наиболее рациональным будет тип Т1(Рисунок 2)

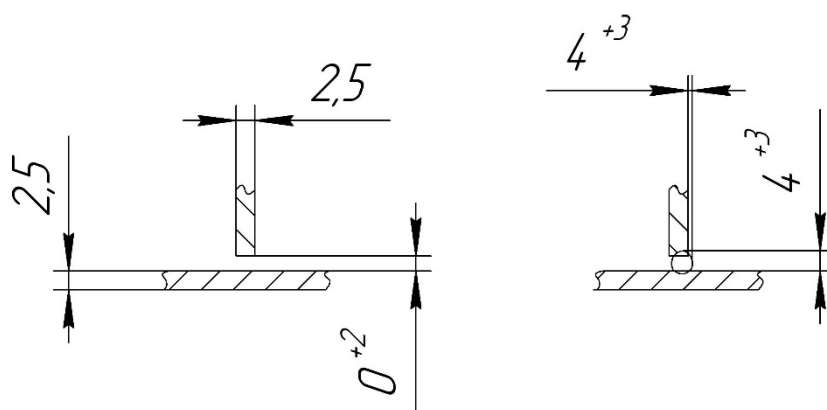


Рис. 2. Вид сварного соединения по ГОСТ 14806-80

Предполагается применение автоматической MIG-сварки, режимы определены на основе анализа литературных источников (таблица 4).

Таблица 4

Режимы сварки

Источник	$\delta$ , мм	I <sub>св</sub> , А	U, В	dэл, мм	qзщ, л/мин	υсв, мм/мин	υпп, м/мин
[3]	2	90...120	18...19	1,2...1,6	8...9	-	-
[3]	3	130...160	19...20	1,2...1,6	9...11	-	-
[2]	3	105...120	17...20	1,2	14	500...700	5,0...7,0

Для автоматической сварки листа толщиной 2,5 мм следует использовать ток 100...120 А, напряжение порядка 19В и присадочную проволоку диаметром 1,2мм.

В качестве контроля сварных соединений предполагается применять визуально-измерительный контроль лицевой стороны, капиллярный контроль обратной стороны и рентген контроль.

В данной работе был представлен анализ конструкции и проведена отработка на технологичность для изготовления корпуса как сварной конструкции. В дальнейшем планируется практическая отработка технологии сварки и контроля соединений для внедрения в производство.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргоно-дуговая сварка алюминиевых сплавов для строительных конструкций. Ред. изд. В.П.Страшных, тех. Ред. Т.Н.Шевченко. Госстройиздат. 180с. 1963г.
2. Сварка специальных сталей и сплавов. Учебное пособие.- 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2012. -272с. –ISBN 978-5-8114-1247-1
3. Дуговая сварка алюминия. Справочно-учебное пособие. В.В.Фролов. Библиотека технолога ИЦ “Технология”. Харьков 2003г.
4. Металловедение сварки алюминия и его сплавов. Рабкин Д.М., Лозовская А.В., Склабинская И.О.; Отв. ред. В.Н. Замков: АН Украины. Ин-т электросварки им Е.О.Патона.- Киев: Наук. Думка,1992 -160с- ISBN 5-12-002022-4
5. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. М., “Машиностроение”, 1972, 264 стр.
6. ГОСТ 4784-2019 “Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.”
7. ГОСТ 7871-2019 “Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия.”
8. ГОСТ 14806-80 “Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.”

УДК 669

А. А. ПРОТАЦКАЯ

*a.protatskaya@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. С. Р. ШАРИПОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОРИСТОСТИ СПЛАВА ИНКОНЕЛЬ 718, ПОЛУЧЕННОГО СЛС**

**Аннотация.** В работе проведена оценка пористости образцов сплава Инконель 718, полученных селективным лазерным сплавлением (СЛС). Актуальным направлением для производства высокотехнологичной продукции из сложно обрабатываемых материалов и с применением новых конструктивных решений являются аддитивные технологии, в частности, селективное лазерное сплавление. Технология СЛС позволяет производить детали сложной формы, в короткие сроки, практически без использования технологической оснастки, за счет чего резко сокращается цикл производства.

**Ключевые слова:** Селективное лазерное сплавление, микроструктура, Инконель 718, пористость.

Целью данной работы являлась оценка пористости жаропрочного сплава Инконель 718, полученного СЛС. На предыдущих этапах работы исследование микроструктуры СЛС образцов сплава Инконель 718 показало наличие «проросших» сквозь несколько слоев укладки порошка дендритов, что, предположительно, связано с малой площадью пятна построения. В данной работе исследовались образцы с малой и большой площадью построения для оценки зависимости доли «проросших» дендритов от площади построения, и их влияния на структуру и пористость материала.

Селективное лазерное сплавление подразумевает изготовление трехмерных физических объектов за счет сплавления частиц металлического порошка, тем самым достигая гомогенной массы. В качестве исходных материалов используются металлические порошки различных сплавов: нержавеющей и инструментальной стали, титановых, алюминиевых и кобальт-хромовых сплавов [1].

Для исследования влияния площади построения были изготовлены цилиндрические образцы одинаковых размеров ( $\varnothing 10 \text{ мм} * 100 \text{ мм}$ ), но с разным направлением построения: вертикальным и горизонтальным.

Для исследования пористости, микроструктуры и микротвердости от каждого образца отрезали цилиндры размером ( $\text{Ø}10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$ ) из которых изготавливали микрошлифы для оценки пористости материала по фотографиям, полученным методом растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Структура полученных образцов типична для СЛС материалов - зерна вытянуты поперек направления построения (так называемый «вязаный узор»). Кроме них присутствуют вытянутые вдоль направления построения дендриты, проросшие сквозь несколько слоев «вязаного узора» (рис. 1).

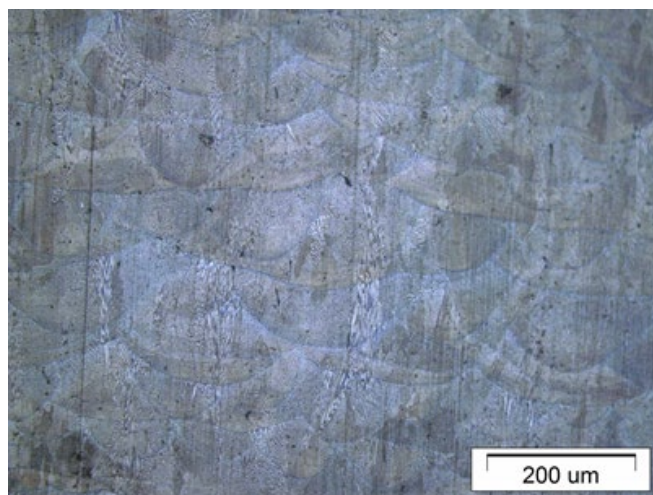


Рис. 1. Микроструктура вертикально выращенного образца сплава Инконель 718

Результаты измерения микротвердости представлены на рис. 2. Средняя микротвердость вертикально-выращенного образца составила 392 HV, горизонтально выращенного 409,6 HV. По графикам видно, что на краю образцов уровень микротвердости может быть ниже, чем в центральной части.

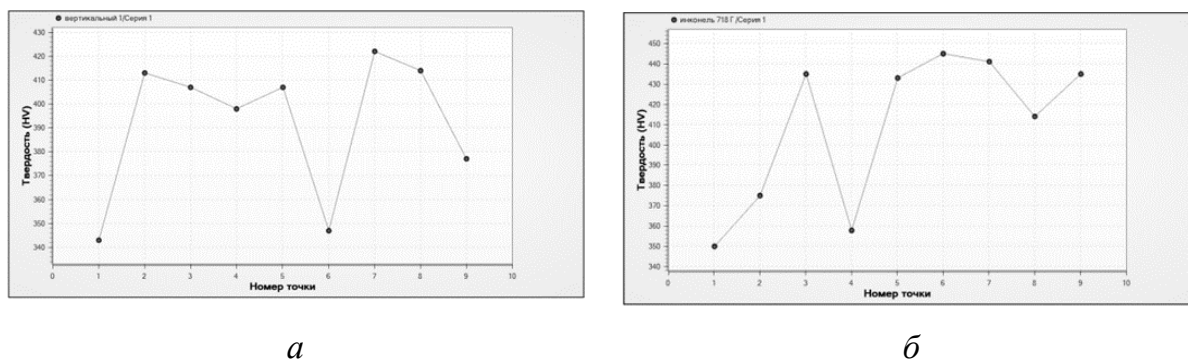


Рис 2. Зависимость микротвердости сплава Инконель 718 от местонахождения точки на диаметре образца:

*а* – вертикально выращенный образец; *б* – горизонтально выращенный образец

Пористость материала оценивали по фотографиям, полученным РЭМ. Для обоих состояний было показано, что пористость по краю образцов была выше, чем в центральной части и поры имели разную форму и размеры (рис. 3).

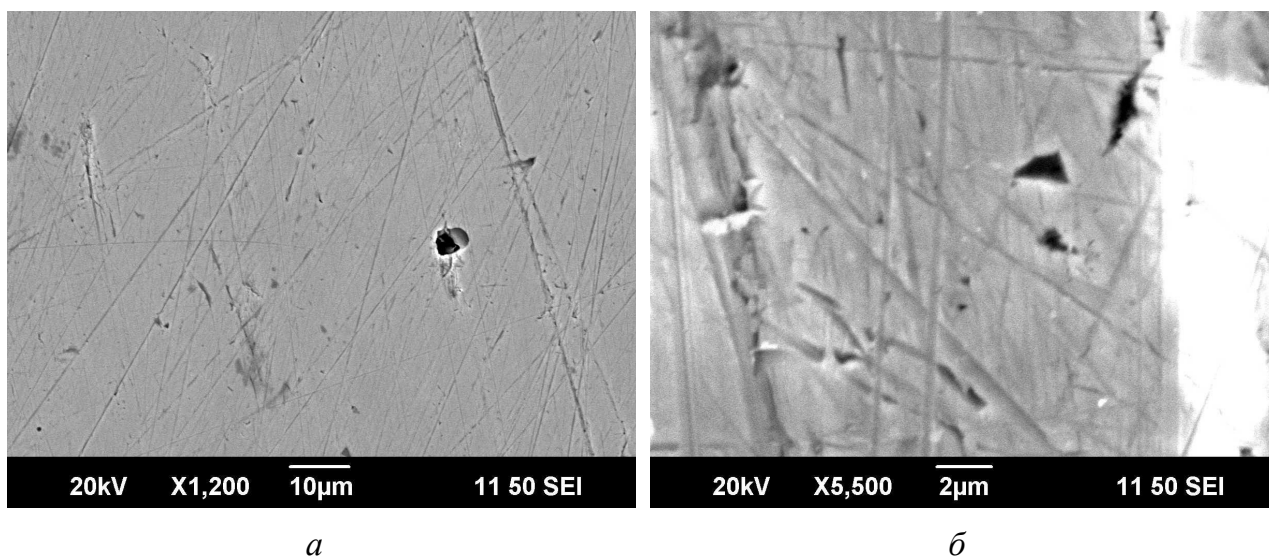


Рис. 3. Микрофотографии РЭМ с изображением пор в центральной (*a*) и краевой (*б*) части образца

Таким образом, выявлено, что причиной снижения твердости в краевой части образцов, полученных СЛС, может быть повышенная пористость этой части.

Повышенная пористость краевой части может быть связана с более экстремальными температурными условиями: на краю происходит длительный нагрев (при движении лазера «туда-обратно») и более длительное подстывание (пока лазер движется вглубь образца). Это может приводить к большей усадке, чем в центральной части и разрывам между структурными элементами – ваннами расплава «вязаного узора».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mark Curies German selective laser melting specialist mulls IPO // Industrial laser solutions. 15.08.2014.



В. М. ПРЯГАЕВ

*pryagaevvadim@gmail.com*

Науч. руковод. – инж. Р. Р.Г АНИЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет***ПРОМЫШЛЕННЫЙ FDM 3D-ПРИНТЕР**

**Аннотация.** В статье рассмотрена отраслевая структура рынка 3D-печати и приведены основные развивающиеся направления аддитивных технологий (АТ) в России. Затронут вопрос импортонезависимости страны в области промышленной 3D-печати по технологии послойного наплавления пластика (FDM), приведены основные производители FDM 3D-принтеров промышленного сегмента рынка АТ и представлены инновационные технические решения, полученные в ходе разработки промышленного FDM 3D-принтера.

**Ключевые слова:** 3D принтер; Fused Deposition Modeling (FDM); 3D-печать; импортозамещение; рынок АТ.

На сегодняшний день аддитивные технологии развиваются быстрыми темпами и находят все большее применение в различных отраслях и порой являются ключевыми при производстве стратегически важных инновационных изделий, особенно это наблюдается в машиностроительной и аэрокосмической промышленности (рис.1).



Рис. 1. Отраслевая структура рынка 3D-печати

Основную долю рынка промышленного аддитивного оборудования представляют зарубежные производители в связи с чем, промышленное аддитивное производство в нашей стране ориентировано на использование импортного оборудования, в частности на китайское.

Существует огромное множество различных аддитивных технологий, которые можно классифицировать и разбить на две группы, отличающиеся методом формирования слоя (рис 2).

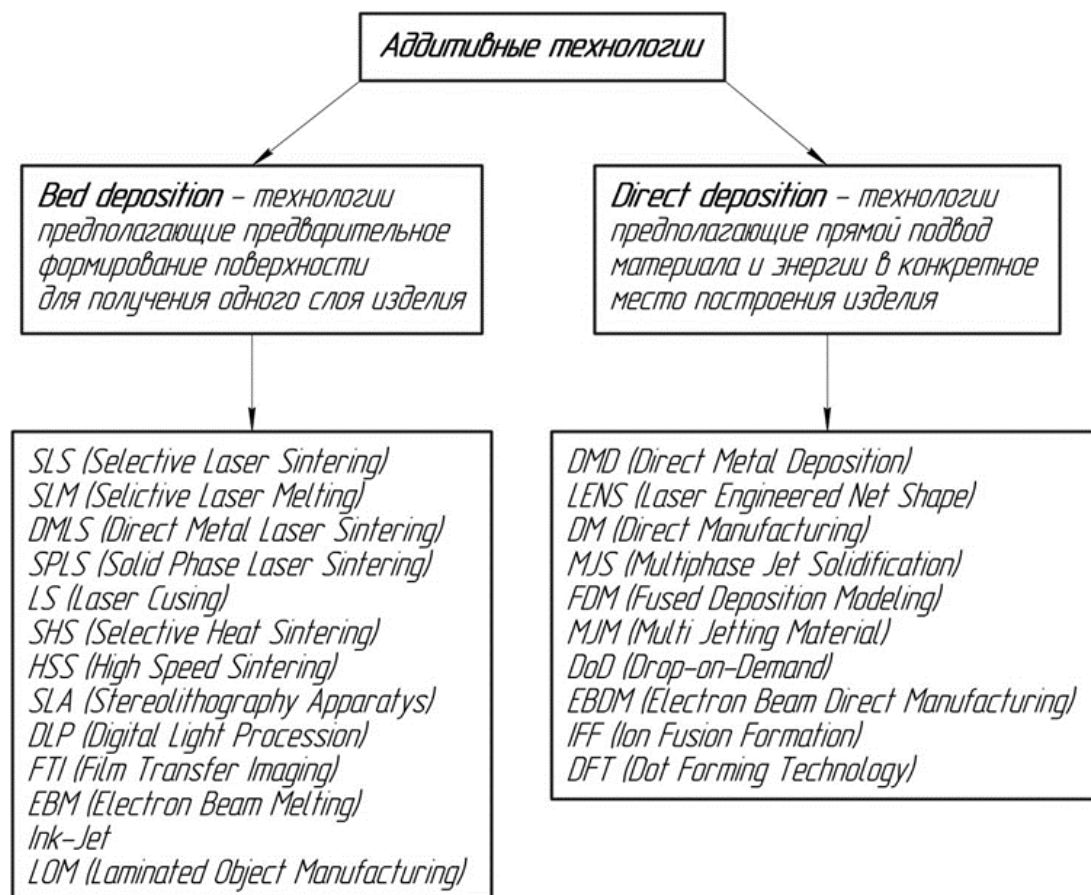


Рис. 2. Классификация по методу формирования слоя

Если рассматривать стратегически важные аддитивные технологии, по мнению правительства РФ, то можно выделить технологию прямого лазерного выращивания изделий из металлов (Direct deposition), технологии фотополимерной и FDM печати (Direct deposition) для производства мастер моделей, прототипов, функциональных изделий и моделей для литейного производства (рис. 3).

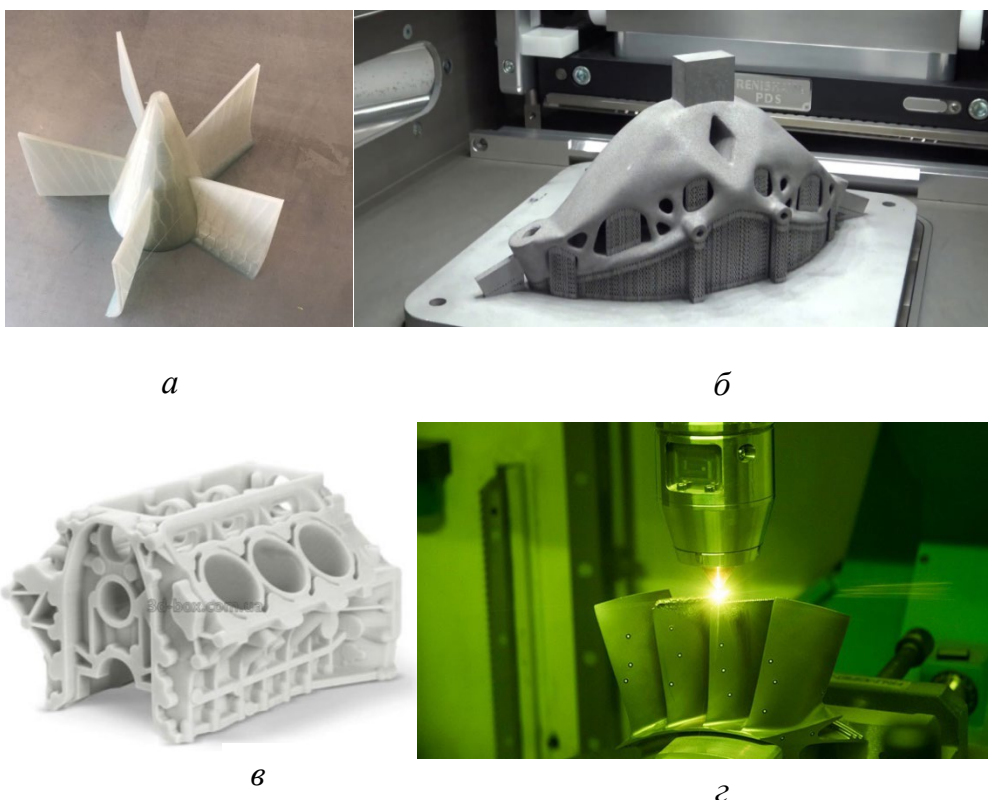


Рис. 3. Изделия полученные АТ:  
*а* – выжигаемая модель для ЛПВМ (FDM – технология); *б* – кронштейн (SLM – технология); *в* – выжигаемая модель для ЛПВМ (SLA – технология); *г* – восстановление пера лопаток (DMD – технология)

Однако следует отметить, что в России активно развивается направление прямого лазерного выращивания изделий из металлов как наиболее перспективное. Что касается рынков фотополимерной и FDM печати, то эти направления развиваются медленными темпами, и на сегодня отечественное производство установок для промышленной печати ограничено одним производителем (табл. 1).

Таблица 1

#### Производители FDM 3D-принтеров

Компания производитель	Страна	Цена
Stratasys	США	От 150 000 дол. США
Intamsys	Китай	От 130 000 дол. США
CreatBot	Китай	От 750 000 руб
BigRep	Германия	От 1 800 000 руб
3DGence Industry	США	От 150 000 дол. США
TotalZ	Россия	От 1 500 000 руб

В связи с чем, вопрос разработки промышленных установок для печати методом послойного наплавления пластика, является актуальным и перспективным, поскольку затрагивает вопрос импортонезависимости страны в данной области.

В процессе выполнения работы по разработке промышленного FDM принтера были разработаны инновационные технические решения, которые позволили повысить эксплуатационные характеристики установки при повышенных температурах (исключено влияние температуры в рабочей камере на точность позиционирования печатающей головки (ПГ), диапазон изменения температуры в рабочей камере от 25°C до 120°C, точность позиционирования ПГ до 10 мкм). Таким образом, промышленная установка для печати по технологии послойного наплавления пластика (FDM), позволяет изготавливать функциональные изделия из тугоплавких и композитных полимеров, а также металлополимеров.

В основе установки лежит охлаждаемая кинематическая схема с быстросъемной печатающей головкой на магнитном подвесе без использования направляющих элементов, порталов и ременных передач (рис 4).

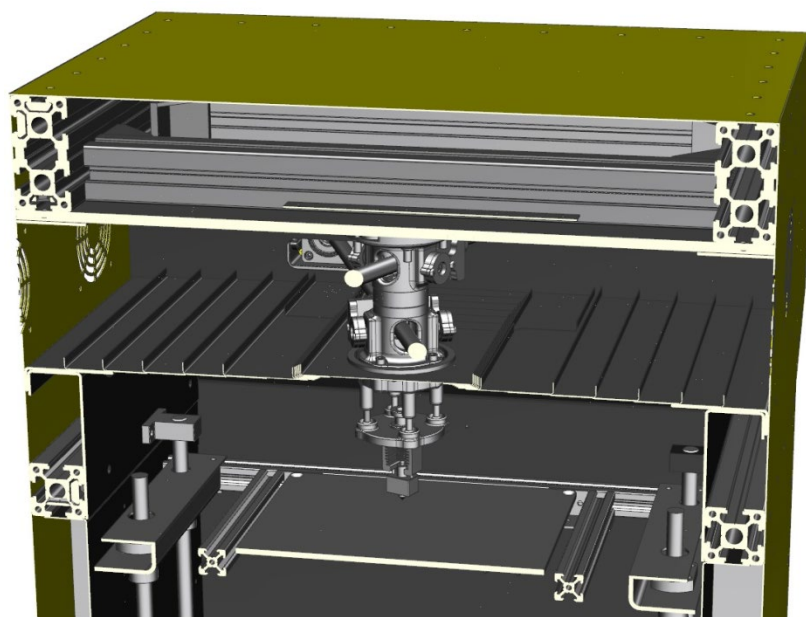


Рис. 4. Охлаждаемая кинематика с быстросъемной печатающей головкой на магнитном подвесе

Данное решение позволяет повысить точность и качество печатаемых изделий по сравнению с существующими установками, за счет высокой жесткости конструкции кинематики, отсутствия подвижных элементов передающих вибрации на ПГ. Также стоит отметить возможность тонкой программной настройки кинематики (рис. 5), что снижает требования к точности ее сборки, а также ее стоимость по сравнению с существующими кинематиками.

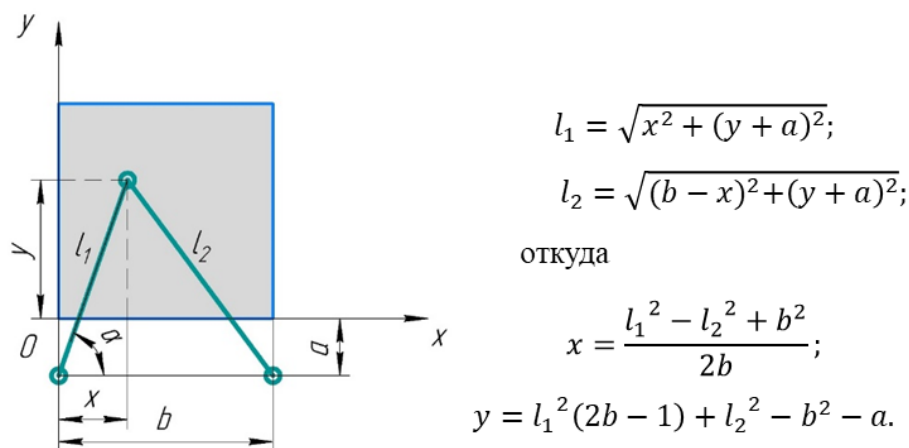


Рис. 5. Математическое описание предлагаемой кинематики

Область применения промышленной FDM установки покрывает все сегменты рынка 3D-печати: аэрокосмическую промышленность, машиностроение, медицину, образование, архитектуру и т.д.

В частности FDM технология активно используется в литейном производстве. С помощью FDM 3D-принтеров изготавливают мастер-модели, различную оснастку, выжигаемы модели и шаблоны. В связи, с чем внедрение разработанной FDM установки в литейное производство позволит существенным образом увеличить эксплуатационные характеристики получаемых функциональных изделий (износостойкость, прочность, рабочая температура и т.д.) за счет возможности применения высокотемпературных инженерных пластиков, в том числе композитов.

### ***Заключение***

Проведен краткий обзор российского рынка 3д печати, из которого видно, что основные сегменты аддитивного производства ориентированы на использование зарубежных установок. Отечественный рынок промышленной печати развивается только в направлении лазерных технологий, в связи, с чем технологии полимерной печати сильно отстают от мировой. Представлены инновационные технические решения, полученные в ходе разработки промышленного FDM 3D-принтера и области его применения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аддитивные технологии в литейном производстве: учебное пособие/ Г14 [А.С. Горюхин и др.]; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : РИК УГАТУ, 2019. – 156 с.
2. Зеленко М. А., Нагайнецв М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 С.

А. Р. САДРИСЛАМОВ, М. Г. ПЕТРОВ, Ю. В. ЛОГАЧЕВ  
*artem22sad@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук А. С. СЕЛИВАНОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

**Аннотация.** Статья посвящена поиску и решению проблем при сварке трением с перемешиванием углеродистой стали. Целью исследований является определение режимов сварки, на которых образуется качественное, без дефектное, стыковое сварное соединение стали. В материале рассматривается ряд статей, в которых описываются проблемы, связанные со сваркой трением с перемешиванием стали. В ходе проведения литературного обзора, были выявлены наиболее частые дефекты сварного шва, форма и геометрические размеры сварочного инструмента.

**Ключевые слова:** Сварка трением с перемешиванием, СТП, сварка стали, сталь, сварные соединения и конструкции, рабочий инструмент, заплечик, пин, режимы сварки.

### ***Введение***

Сталь (ст3) является одним из самых распространенных конструкционных материалов среди малоуглеродистых сталей. Она используется для изготовления малонагруженных деталей, а также при изготовлении сварных конструкций, например, в строительной, машиностроительной, нефтяной отрасли. Хорошо зарекомендовавшим себя методом образования сварного соединения сталей данной марки является дуговая сварка. Одним из ключевых ее преимуществ является возможность использования в «полевых условиях», вне специального помещения, а также отсутствие необходимости применения громоздкого оборудования. [1]

Проблемой сварки стальных пластин традиционными способами заключается в склонности металла шва к образованию различных дефектов, таких как: рыхлость, цепочки пор в шве и у зоны сплавления, трещины в ЗТВ, оксидные и шлаковые включения, свищи, кратеры и многие другие.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) - процесс образования неразъемного соединения. Данный метод является одним из наиболее эффективных способов получения сварного шва деталей различной формы. [2] Выполненные в последние годы исследования показали, что СТП является эффективным спо-

способом получения высококачественных соединений конструкций различной геометрии, включая листовые материалы, пространственные профильные конструкции, трубы, восстановления изношенных деталей, модифицирования и улучшения структуры материалов, залечивания трещин и литейных дефектов. Таким образом, СТП становится универсальной технологией, имеющей большие перспективы в различных отраслях производства.

Целью данной работы является определение режимов сварки и формы инструмента, для получения качественного сварного соединения стали.

### ***Описание метода сварки трением с перемешиванием стали***

Схема процесса СТП изображена на рисунке 3. В начале процесса сварки инструмент, вращаясь, погружается в свариваемый металл и в результате приложенного давления и возникающего трения металл под заплечиком нагревается и переходит в пластичное состояние. Затем инструмент перемещается вдоль стыка и за счет перемешивания пластичного металла образуется сварной шов.

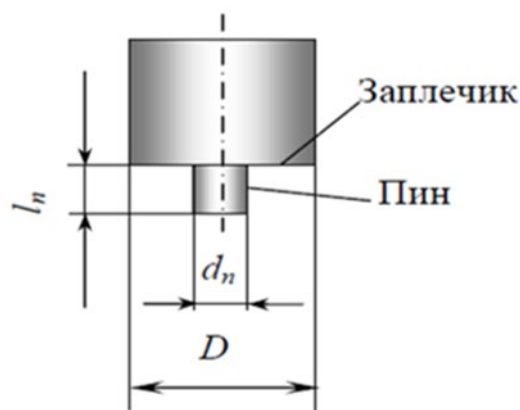


Рис. 1. Инструмент для СТП

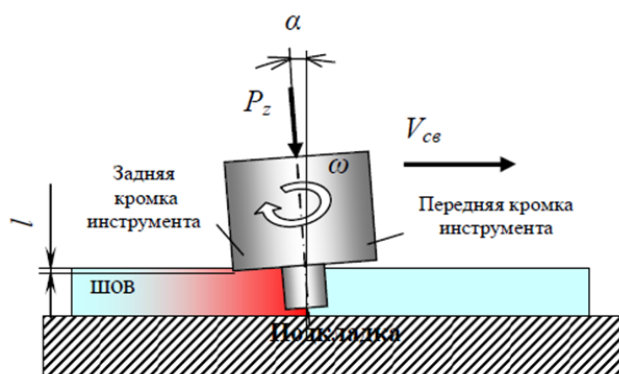


Рис. 2. Параметры процесса СТП

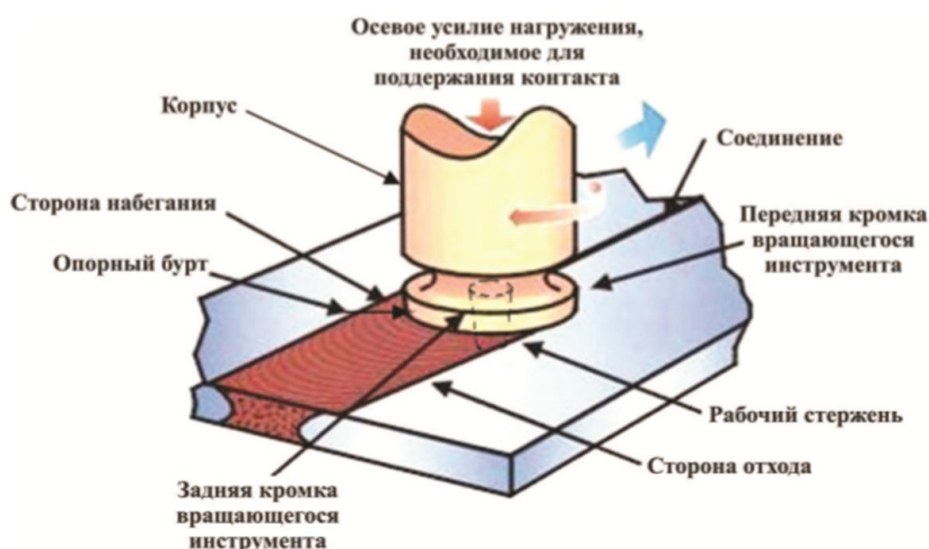


Рис. 3. Схема процесса СТП

Основные параметры процесса СТП являются: частота вращения инструмента,  $n(\omega)$ ; скорость сварки,  $V_{св}$ ; угол наклона инструмента,  $\alpha$ ; глубина погружения инструмента,  $l$ , или осевое усилие,  $P_z$ ; конструкция инструмента.

При проведении эксперимента СТП стальных пластин толщиной 3 мм, с применением инструмента из карбида вольфрама, в результате в стыке наблюдалось образование феррита и перлита. Причина образования феррита и перлита связана с относительно медленными скоростями охлаждения. Также был выявлен рост дендритов, микроструктура которых состоит из измельченных зерен феррита и перлита. Основной металл состоял зерен феррита и аустенита [3].

Испытание на поперечное растяжение показывает, что соединение имело прочность 99,5% (414,10 МПа) с относительным удлинением 18,41%. Уменьшение удлинения связано с наличием дендритов в области сварного шва.

Ноон-Нве Cho пишет, что при СТП сварки стали СК5, в результате основной металл имеет структуру феррита и структуру глобулярного цементита, в сварном шве наблюдалась некоторая дуплексная структура феррита и цементита, и структура остаточного аустенита не была четко видна. В ходе испытаний на растяжение образцы были разрушены в зоне основного металла [4].

Стоит отметить дефекты, которые могут возникнуть в процессе СТП. Характерным для СТП дефектом является вогнутость на протяжении всего свар-



ного шва, так как инструмент углубляется заплечиком в металл. Также стоит отметить что в конце шва на месте выхода инструмента имеется углубление (рис.4). Возможно появление твердых включений: осколки рабочей части инструмента, остатки грязи и масла.

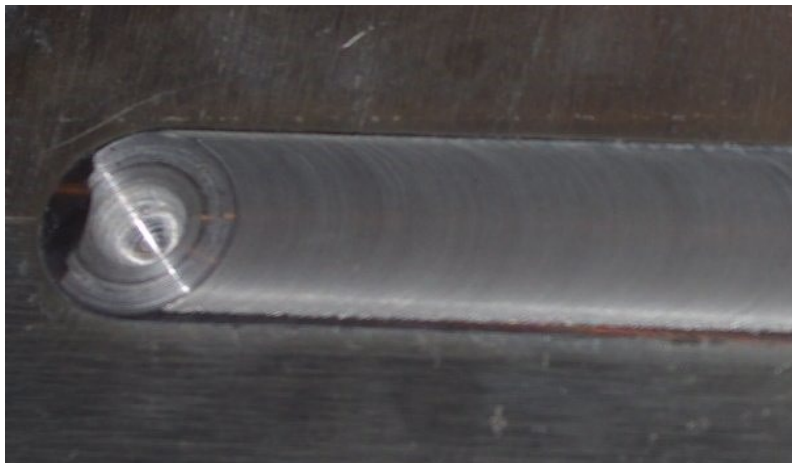


Рис. 4. Углубление в конце шва

Возможно возникновение заглаженного непровара (рис. 5), который представляет собой протяженную несплошность как внутри, так и на поверхности сварного шва, ориентированная в долевом направлении.

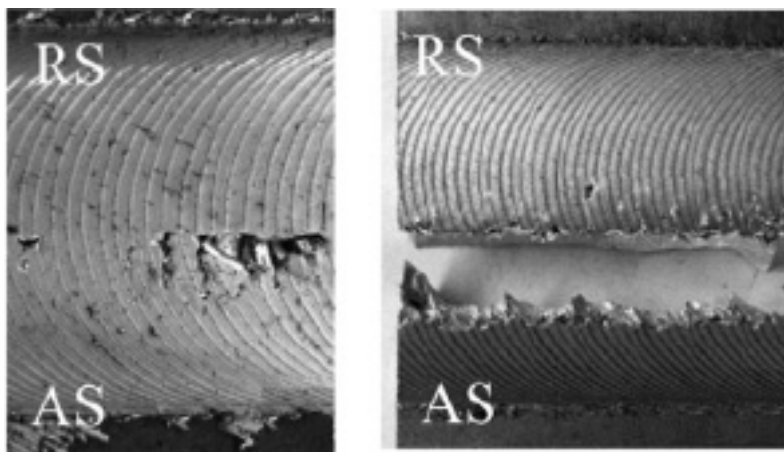


Рис. 5. Заглаженный непровар

G.R. Argade описывает опыт сварки трением с перемешиванием внахлест листов из углеродистой стали AISI 1018 толщиной 6,35 мм и нержавеющей стали AISI 316L толщиной 2,7 мм. Инструмент изготовлен из поликристаллического нитрида бора (PCBN), который имеет следующие размеры: диаметр пина 7,6 мм, длина пина 3,7 мм и диаметр заплечика 24 мм. Сварка проводится на установке

для сварки трением МТИ РМ-1 с перемешиванием со скоростью вращения инструмента 500 об/мин, скорость сварки 25,4 мм/мин и угол наклона инструмента 2° [5].

В серии экспериментов с использованием инструментов с различной геометрией и при разных режимах, была выявлена форма инструмента – с коническим пином, при которой полученное сварное соединение не имеет внешних дефектов [6].

В ходе исследования режимов сварки стали и материала используемого инструмента, были выявлены диапазоны режимов сварки и формы инструмента, приведенные в таблице 1 [7-12].

И. К. Черных и другие провели анализ существующих исследований по сварке малоуглеродистых сталей, близких к стали ст3. На основании анализа предварительно определены режимы сварки и габаритные размеры инструмента. Проведены эксперименты по соединению листов толщиной 4 мм при помощи инструментов с различной геометрией, в т.ч. и не использовавшихся в существующих исследованиях. Установлено, что оптимальная температура при сварке инструментом из твердого сплава – 800-950 °С. Наиболее качественное соединение образуется при использовании инструмента с конической формой пина при скорости его вращения 500 об/мин и подаче 50 мм/мин с глубиной погружения буртика в детали 0.05-0.1 мм и осевой силе 15-18 кН [1].

Данные по литературному обзору представлены в таблице 1.

Таблица 1

Данные литературного обзора сталей

№ статьи	Толщина свариваемых пластин, мм	Материал инструмента	$l_n$ , мм	$d_n$ , мм	$D$ , мм	Геометрия пина	$V_{св}$ , мм/мин	$n(\omega)$ , об/мин
3	3	Корбид вольфрама с 7% кобальта	2,6	-	20	Усеченный конус с углом 15 градусов	60	750
4	2	Поликристаллический кубический нитрид бора (PCBN)	1,2	5,7	36,8	закругленный	-	-
5	-	PCBN	3,7	7,6	24	-	25,4	500
6	2	WC	1,5	5	16	-	50	800

№ статьи	Толщина свариваемых пластин, мм	Материал инструмента	$l_n$ , мм	$d_n$ , мм	$D$ , мм	Геометрия пина	$V_{св}$ , мм/мин	$n(\omega)$ , об/мин
7	3	aWC	2,6	5,5	16	-	50	400,800
8	4	PCBN, WRe	3,6 2	-	36, 8	-	-	-
9	-	PCBN	2	4.1	-	Выпуклый закрученный	-	-
10	6,35	Вольфрамовый инструмент	6,2 2	7,9	19	резьба	-	-
11	3	PCBN	-	-	-	-	35	80, 100, 150, 200
12	-	Вольфрамовый инструмент	-	-	19	-	1,7	300, 500

### **Выводы**

На основании данных литературного поиска были получены режимы сварки и форма инструмента, для получения бездефектного сварного соединения стали. Стоит отметить, что при выполнении СТП инструмент разрушается, дальнейшие исследования будут направлены на проектировку и изготовление нового инструмента, который будет обеспечивать высокую износостойкость и работу в большой промежуток под нагрузкой.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. И. К. Черных, Е. В. Васильев, А. Н. Абакумов, Н. В. Захарова, К. А. Синогина. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ СТ3 // IV International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update", 2020. № 5. С. 306-313.
2. Е. И. Ткаченко, А. С. Лукин, Д. А. Прошутинский. РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ КОНСТРУКЦИОННЫХ, НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ // IV International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update", 2020. № 5. С. 548-552.
3. Anmol Bhatia, Reeta Wattal. Friction stir welding of carbon steel: Effect on microstructure and tensile strength // Materials Today: Proceedings, 2019. №18. PP. 498-503.
4. Hoon-Hwe Cho, Heung Nam Han, Sung-Tae Hong, Jong-Hwan Park, Yong-Jai Kwon, Seok-Hyun Kim, Russell J. Steel. Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel // Materials Science and Engineering A, 2011. Т.528 №25. PP. 2889-2894.
5. G.R. Argade, S. Shukla, K. Liu, R.S. Mishra. Friction stir lap welding of stainless steel and plain carbon steel to enhance corrosion properties // Journal of Materials Processing Technology, 2018. №14. PP. 320-347.

6. T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, T. Shibayanagi, K. Ikeuchi, H. Assadi. On the formation of grain structure during friction stir welding of duplex stainless steel // *Materials Science and Engineering A*, 2010. T.527 №24. PP. 6484-6488.
7. M. Jafarzadegan, A.H. Feng, A. Abdollah-zadeh, T. Saeid, J. Shen, H. Assadi. Microstructural characterization in dissimilar friction stir welding between 304 stainless steel and st37 steel // *Materials Characterization*, 2012. №74. PP. 28-41.
8. Manish P. Meshram, Basanth Kumar Kodli, Suhash R. Dey. Friction Stir Welding of Austenitic Stainless Steel by PCBN Tool and Its Joint Analyses // *Procedia Materials Science*, 2014. №6. PP. 135-139.
9. S. Mironov, Y.S. Sato, H. Kokawa, H. Inoue, S. Tsuge. Structural response of superaustenitic stainless steel to friction stir welding // *Acta Materialia*, 2011. T.59 №14. PP. 5472-5481.
10. R. Nandan, G.G. Roy, T.J. Lienert, T. Debroy. Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel // *Acta Materialia*, 2007. T.55 №6. PP. 883-895.
11. VSM Ramakrishna R, K Bhanu Sankara Rao, G. Madhusudan Reddy, Jai Prakash Gautam. Friction stir welding of advanced high strength (bainitic) steels for automotive applications // *Materials Today: Proceedings*, 2018. №5. PP. 17139-17146.
12. A.P. Reynolds, Wei Tang, T. Gnaupel-Herold, H. Prask. Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds // *Scripta Materialia*, 2003. №48. PP. 1289-1294.

УДК 669

А. П. ТАЙМЕТОВ, Д. А. АДЖИБАЕ

*mr.drysha@gmail.com* , *danno23@mail.ru*

Науч. руковод. – М. П. САВИЧЕВ, В. В. АТРОЩЕНКО

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ АТТЕСТАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

**Аннотация.** Приведены требования к экзаменационным образцам, используемым для обучения и аттестации специалистов по ультразвуковому и магнитопорошковому контролю. Описана технология создания в сварных образцах внутренних дефектов необходимого размера, формы и места залегания.

**Ключевые слова:** экзаменационный образец, аттестация, неразрушающий контроль, ультразвуковая дефектоскопия, магнитопорошковая дефектоскопия.

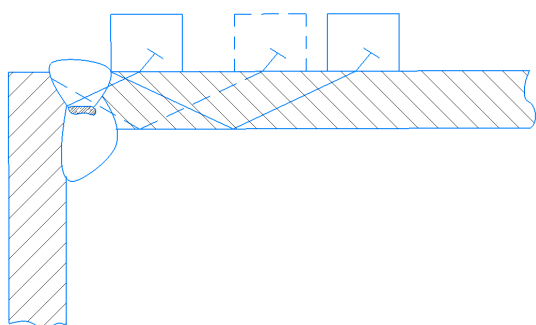
Неразрушающий контроль (НК) является главным источником информации о качестве сварных конструкций ответственного назначения как при строительстве, так и в процессе эксплуатации. Нефтяные резервуары, нефтепроводы, газопроводы, мостовые конструкции, котельное оборудование и др. опасные производственные объекты, подконтрольные Ростехнадзору, а также оборудование атомных электростанций и судостроение. Дефекты в этих конструкциях зачастую приводят к техногенным катастрофам, в том числе и с человеческими жертвами. Поэтому кроме подготовки специалистов, выполняющих сварочные работы особое внимание уделяется и качеству подготовки специалистов неразрушающего контроля.

Аттестация специалистов неразрушающего контроля активно развивается и в настоящее время проводится в соответствии с несколькими документами [1,4 и др.]. В зависимости от подготовки и производственного опыта специалисты аттестуются на один из трех уровней. Аттестованные специалисты могут выполнять неразрушающий контроль теми методами и тех объектов, которые будут указаны в их удостоверении. При этом в процессе аттестации они должны подтвердить знание нормативной документации на объект контроля и сдать практический экзамен. На практическом экзамен аттестуемый должен подтвердить владение средствами НК, технологией контроля и анализа результатов не менее трех

экзаменационных образцов соответствующего сектора объектов контроля. Экзаменационные образцы отражают особенности объекта контроля, воспроизводя геометрию, и содержат дефекты (несплошности) обычно появляющиеся в процессе производства или эксплуатации. Дефекты могут быть естественными или искусственными. Каждый экзаменационный образец должен иметь паспорт, содержащий информацию обо всех имеющихся в нем дефектах и настройках оборудования, которые использовались.

Изготовление экзаменационные образцов (ЭО) с разными типами сварных швов и с необходимыми дефектами достаточно трудоемко и требует разработки определенной технологии. Вначале рассмотрим производство ЭО для ультразвукового метода контроля. Способы создания внутренних дефектов для образцов ультразвукового контроля:

1) Частичное нарушение технологии сварки (рис.1.). Во время сварки заполняющего слоя создаются зоны, не зачищенные от шлака. Данные действия позволяют создать протяженную несплошность в сварном соединении.



*а*

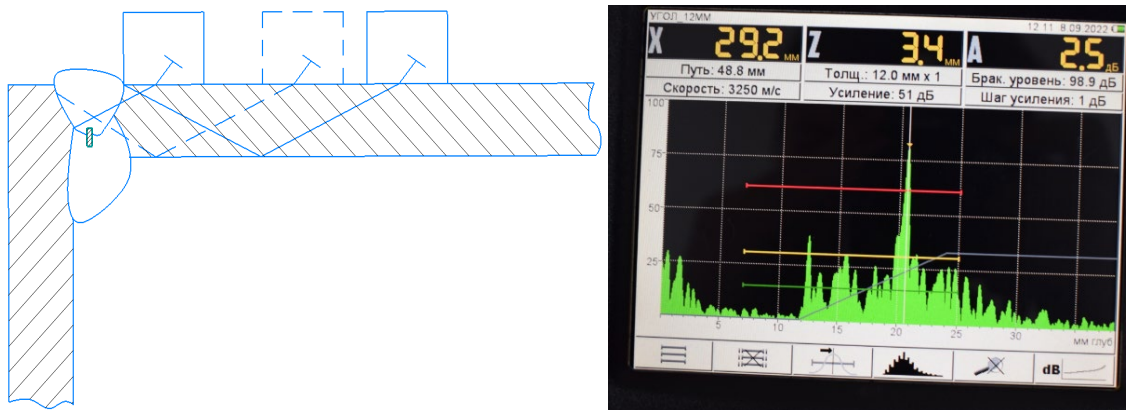
*б*

Рис. 1. *а* – Эскиз шлакового включения в сечении шва;  
*б* – Ультразвуковой контроль образца

При проведении контроля экзаменационного образца со шлаковыми включениями были получены сигналы, свидетельствующие о скоплении дефектов.

2) Закладка вольфрамовых элементов в металл шва (рис.2.). Данный метод является наиболее точным из-за методики создания дефекта. Заранее подготовленный фрагмент вольфрамовой проволоки закладывается в металл шва. При

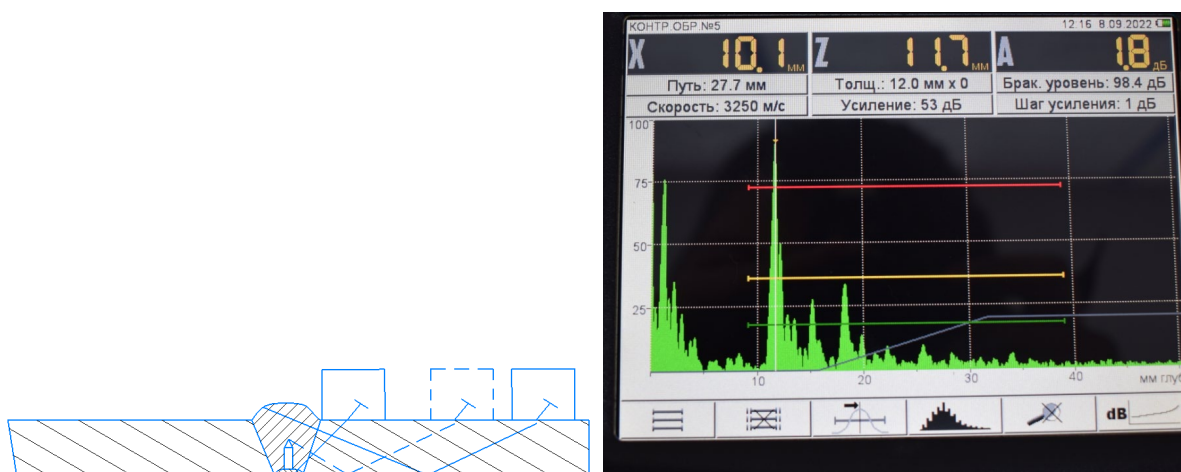
этом размеры положение ориентацию и геометрию дефекта можно изменять для достижения требуемого уровня браковки.



*а* *б*  
Рис. 2. *а* – Эскиз вольфрамового включения в сечении шва;  
*б* – Ультразвуковой контроль образца

При проведении контроля экзаменационного образца с включениями вольфрама были получены единичные сигналы, свидетельствующие о единичном дефекте.

3) Создание искусственных отверстий в сварном шве (рис.3.). Данная методика позволяет создавать дефекты в корневой зоне сварного шва. Глубина сверления и положение дефекта выбирается в соответствии с нормой отбраковки. Для получения данного дефекта с обратной стороны сварного шва высверливается отверстие и наглухо заваривается.



*а* *б*  
Рис. 3. *а* – Эскиз засверловки в сечении шва;  
*б* – Ультразвуковой контроль образца

При проведении контроля экзаменационного образца со внутренними отверстиями был получен сигнал, свидетельствующий о единичном дефекте, расположенном в корне шва.

После отработки методики получения дефектов была изготовлена и аттестована партия экзаменационных образцов. На каждый образец по [2] и [6] была разработана методика контроля. В частности, по методике закладки вольфрамового стержня был создан экзаменационный образец У-1 (рис.4.), после ультразвукового контроля образца была составлена дефектограмма в соответствии с [2] и полный пакет документов, согласно [5] и [1].



Рис. 4. Экзаменационный образец У-1

*Создание экзаменационных образцов для магнитопорошкового метода контроля:*

Магнитопорошковая дефектоскопия – основана на способности потока магнитных частиц менять направление при прохождении через участки с дефектами (то есть со сниженной магнитной проницаемостью). В то время как при отсутствии каких-либо дефектов магнитный поток свободно проходит, на участке с изъянами материала (расслоениями, инородными включениями, непроварами, трещинами и др.) образуются магнитные поля рассеивания. При применении магнитного индикатора (порошка или суспензии) над дефектом формируется индикаторный рисунок, с помощью которого можно выявить даже мельчайшие нарушения.



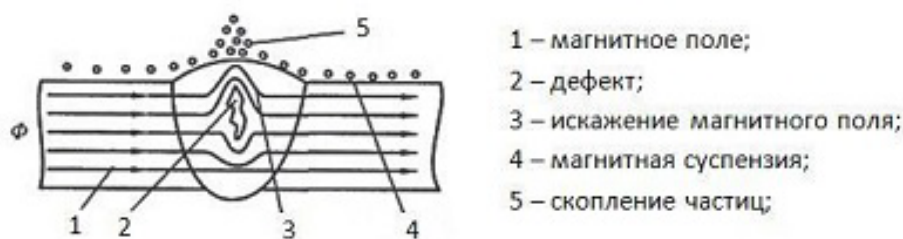


Рис. 5. Схема проведения магнитопорошкового контроля

Способ создания дефектов для образцов магнитопорошкового контроля:

1) Закладка вольфрамовых элементов в облицовочный слой сварного шва.

Данная методика основана на принципе неоднородности магнитного поля между вольфрамовым стержнем и основным металлом из-за этого на магнитные частицы, попавшие в это поле, действует сила, стремящаяся затянуть частицы в место наибольшей концентрации магнитных силовых линий, то есть к дефекту. Частицы в области поля дефекта намагничиваются и притягиваются друг к другу как магнитные диполи под действием силы так, что образуют цепочные структуры, ориентированные по магнитным силовым линиям поля. В результате получается индикаторный след, имитирующий трещины в сварном шве.

На основе предложенной методики был создан экзаменационный образец Т-2-МК (рис.6.), отвечающий требованиям [5], технология магнитопорошкового контроля разработана в соответствии с [3], образец паспортизирован в соответствии с [1].



Рис. 6. Экзаменационный образец Т-2-МК

### ***Выводы:***

1. Отработана технологии создания внутренних несплошностей необходимой конфигурации в сварных швах различного типа для ультразвукового и магнитопорошкового контроля.

2. Разработаны паспорта на экзаменационные образцы, включающие в себя технологию контроля и дефектограмму.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. СНК ОПО РОНКТД – 02–2021 «Аттестация специалистов неразрушающего контроля»
2. ГОСТ Р 55724-2013 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые»
3. ГОСТ Р 56512—2015 «Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод»
4. ГОСТ Р ИСО 9712-2019 «Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала»
5. ГОСТ Р 58713— 2019/ISO/TS22809:2007 Контроль неразрушающий. Несплошности в образцах, используемых в квалификационных экзаменах
6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.: ил.

УДК 621.747.51

П. В. ШУМИХИН

*pavelschum@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О. Б. ДЕМЕНОК

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **РАЗУПРОЧНЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ВЫБИВКОЙ ПРИ ОЧИСТКЕ ТИТАНОВЫХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ОТЛИВОК**

**Аннотация.** С целью отработки технологии изготовления крупногабаритных титановых отливок была исследована методика удаления литейных форм, состоящих из оксидных керамик, основанных на электрокорунде. В качестве методики очистки внутренних сложнопрофильных полостей титановых отливок рассмотрена электрогидравлическая выбивка керамических остатков.

**Ключевые слова:** электрокорунд; титан; отливка; структура.

Объектом исследования в рамках производства деталей для двигателей гражданской авиации стали крупногабаритные титановые отливки, имеющие сложную геометрию с протяженными полостями, формирующиеся путем создания керамической оболочки на основе  $Al_2O_3$ . В ходе получения отливок возникает проблема удаления остатков керамической формы из труднодоступных мест. В связи с этим был рассмотрен вариант применения электрогидравлической установки.

Электрогидравлическая установка представляет собой устройство, вызывающее электрогидравлический эффект, который представляет собой высоковольтный электрический разряд в жидкой среде. При формировании электрического разряда в жидкости выделение энергии происходит в течение достаточно короткого отрезка времени. Мощный высоковольтный электрический импульс с крутым передним фронтом вызывает различные физические явления. Такие как появление сверхвысоких импульсных гидравлических давлений и кавитационные явления способные разрушению электрокорундовых форм.

Для проведения опытных работ была собрана установка, состоящая из частей образующих, следующие группы:

1) электрическая часть, представляющая собой генератор импульсов тока высокого напряжения до 50 кВ;

2) активатор, в котором непосредственно происходит очистка титановых отливок;

3) механическая часть.

В процессе обработки должно предусмотрено вращение отливки в горизонтальной плоскости с расчетной скоростью. Для очистки внутренних полостей необходимо использовать оборудование с возможностью установки рабочих разрядников в определенное положение.

В качестве образца для испытания выбрана стойка отливки, которая была закреплена в макетной электрогидравлической установке с прямоугольным активатором (рисунок 1).



Рис. 1. Размещение электрогидравлической установки

Эффективность выбивки остатков керамики зависит от настройки режимов работы установки. Режимы определяются напряжением разряда, емкостью накопительного конденсатора, рабочим зазором в рабочем разряднике и временем обработки.

При запуске процесса удаления литейной формы из полости стойки отливки, она подвергалась вращению вокруг горизонтальной оси и сериям разрядов. В результате обработки была получена очищенная от керамики титановая отливка.

Также в процессе очистки выполнен эксперимент по подводу разрядников непосредственно к поверхности отливки, что упрощает конструкцию активатора и увеличивается эффективность очистки. Однако в зоне осуществления разряда получены прижоги, что пагубно может влиять на структуру зерен отливки.

Таким образом применение данного метода очистки и подбор оптимальных режимов работы установки способствуют оптимизации изготовления выпускаемой продукции, при решении проблем связанных с возможными деформациями ребер, расположенных внутри стоек оливок, вызванных в процессе склопывания пузырьков газа, разрушающих керамическое покрытие и исключения металлургических дефектов в зоне образования прижогов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.А. Юткин. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986.— 253 с.

## СЕКЦИЯ 2.6 СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА

УДК 53

Д. С. БАЖАНОВ

*interesnoe2003@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. А. Ф. ШИШКИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

### ЧЕРНОБЫЛЬ ГЛАЗАМИ ФИЗИКИ

**Аннотация.** Рассмотрены чернобыльские события, проведен некоторый анализ с точки зрения физики. В связи с широким распространением АЭС по всему миру проблема не теряет актуальности.

**Ключевые слова:** чернобыльская катастрофа, реактор, АЭС, ядерная физика.

Чернобыльская катастрофа – это самая крупная в мире на данный момент авария в области атомной энергетики. Она произошла ночью 26 апреля 1986 года. Чтобы разобраться в случившемся необходимо знать принципы работы и устройство атомного реактора и иметь теоретические знания о процессе деления ядра.

Эти вопросы относятся к ядерной физике - разделу физики, изучающему структуру и свойства атомных ядер, а также их распады, взаимодействия и т.п.

Открытие цепных ядерных реакций и оценка энергетического выхода таких реакций подтолкнули ученых на создание ядерного реактора как альтернативный способ добычи электричества. У любого ядерного реактора есть несколько частей: активная зона с топливом и замедлителем, отражатель нейтронов, теплоноситель, система управления и защиты. Естественная ядерная реакция происходит очень быстро – меньше, чем за секунду. Такая быстрая ядерная реакция провоцирует ядерный взрыв. Однако ядерной реакцией можно управлять, для этого используется замедлитель. Замедлитель – не устройство, а вещество, которое уменьшает кинетическую энергию нейтронов за счет многократного столкновения с молекулами замедлителя. В качестве замедлителя используют графитовые стержни и воду, а в качестве топлива в реакторах чаще всего

используются изотопы урана (235, 238, 233), плутония (239) и тория (232). Активная зона представляет собой котел, через который протекает обычная вода (теплоноситель). Среди других теплоносителей реже используется тяжелая вода и жидкий графит. Цель работы АЭС – это получение тепла. Электричество же вырабатывается тем же методом, что и на других типах электростанций – пар вращает турбину, а энергия движения преобразуется в электрическую энергию.

В реакторе топливо находится в так называемых тепловыделяющих элементах (ТВЭЛах). Это стержни, в которых в виде небольших таблеток находится ядерное топливо. ТВЭЛы соединены в кассеты шестигранной формы, которых в реакторе могут быть сотни. Кассеты с ТВЭЛами располагаются вертикально, при этом каждый ТВЭЛ имеет систему, позволяющую регулировать глубину его погружения в активную зону. Помимо самих кассет среди них располагаются управляющие стержни и стержни аварийной защиты. Стержни изготовлены из материала, хорошо поглощающего нейтроны. Так, управляющие стержни могут быть опущены на различную глубину в активной зоне, тем самым регулируя коэффициент размножения нейтронов. Аварийные стержни призваны заглушить реактор в случае чрезвычайной ситуации.

Чернобыльская АЭС была оборудована РБМК (реактор большой мощности канальный) – одним из серии энергетических ядерных реакторов, разработанных в Советском Союзе. Реактор РБМК канальный, гетерогенный, графитоводный, кипящего типа, на тепловых нейтронах. Теплоноситель – кипящая вода.

Для понимания того, что произошло в Чернобыле, не нужно быть физиком-ядерщиком, необходимо лишь знать, что внутри реактора происходят два процесса. Реактивность, которая генерирует энергию, либо повышается, либо понижается. Задача операторов, обслуживающих АЭС, поддерживать равновесие. Во время расщепления и столкновения атомов урана, реактивность повышается, но если не сбалансировать реактивность, она так и будет повышаться, что приведет к взрывоопасной ситуации. Поэтому в реакторе находятся стержни управления из бора, которые снижают реактивность, действуя как тормоза в автомобиле.

Нужно учесть и третий фактор – воду. Холодная вода забирает тепло из системы, благодаря которому она преобразуется в пар. У реактора РБМК положительный паровой коэффициент – это означает, что чем больше пара в системе, тем выше реактивность, а значит больше тепла вырабатывается. Во время расщепления урана и высвобождения энергии возникает новый элемент – ксенон, который понижает реактивность. Когда активная зона работает на максимуме, ксенон сгорает, не вызывая никаких проблем. Однако при долгосрочной работе на малых мощностях ксенон не сгорает, а наоборот накапливается, что нарушает равновесие системы.

В день аварии на Чернобыльской АЭС проводился эксперимент, в ходе которого испытывался турбогенератор. Суть испытания состояла в проверке того, сможет ли турбогенератор при аварии осуществлять энергоснабжение 45-50 секунд, чтобы обеспечить необходимой энергией аварийные системы.

Эксперимент пошел не по плану, сначала произошло резкое падение мощности, а затем резкое увеличение мощности. Ситуация вышла из-под контроля и привела к взрыву и уничтожению четвертого реактора.

«Прежде всего нужно отметить, что это эксперимент, который не должен был проводиться на атомной электростанции, потому что величина выбега турбины на холостом ходу это вещь, которая должна была бы определяться на специальном стенде, сооруженном у конструктора турбины... Он там не проверялся. Поэтому это заставило, вроде бы из благих побуждений, руководство станции провести этот эксперимент» – так говорил советский химик-неорганик Валерий Легасов об эксперименте, проводимым на ЧАЭС.

Чернобыльская авария сегодня обросла огромным количеством версий. Однако целесообразнее остановиться на отчетах комиссий, которые занимались исследованием катастрофы. Всего таких комиссий было две: в 1986 году и в 1991 году, причем выводы комиссий противоречили друг другу.



В августе 1986 года была создана комиссия по изучению вопросов чернобыльской катастрофы. Эта комиссия должна была установить причины, по которым случилась авария. Главный вывод этой комиссии – в чернобыльской аварии виноват персонал, который допустил сразу несколько грубых ошибок, которые привели сначала к аварии, а затем и к катастрофе.

Основные ошибки персонала следующие:

– Отключение средств защиты реактора. Регламент работ запрещал любой отключение средств защиты.

– Вывод из зоны работы 204 стержней из 211. Регламент говорил о том, что если стержней осталось меньше 15, реактор немедленно следует заглушить.

Ошибки персонала оказались грубыми и необъяснимыми. Они отключили защиту и нарушили все основные пункты Регламента (инструкции).

В 1991 году Госатомнадзор создал новую группу для изучения аварии, в которую входил практически весь персонал АЭС. Вывод по результатам работы данной группы был следующим – в катастрофе виноваты конструкторы, поскольку у четвертого реактора были конструктивные недостатки. Событие, после которого взрыв был неизбежен – нажатие на кнопку АЗ-5 (аварийная кнопка), после чего заклинило все стержни.

Валерий Легасов о причине катастрофы: «В чем состоит роковая эта ошибка? Весь мир признает нормальный стандарт безопасности по любому опасному производству, в том числе и по атомным станциям. Этот стандарт состоит из трех элементов:

– сделать максимально надежный реактор;

– сделать максимально надежной эксплуатацию (обученный персонал, хорошая дисциплина, удобная для эксплуатации техника и т.д.);

– сделать защиту.

Везде стремятся к максимальной надежности, но, поскольку весь мир понимает, что «максимально» – это не значит 100%, и что всегда есть какая-то ве-

роятность того, что какой-то элемент техники, даже самый надежный, может отказать, или какой-то человек по злему умыслу, или неграмотности, или по стечению обстоятельств что-то может совершить, то и вводится этот обязательный третий элемент: все это опасное производство с максимально надежным реактором и максимально надежной эксплуатацией обязательно должно быть капсулировано, закрыто в контеймент (как его называют на Западе), поставлено под колпак (как его называем мы). Так что если вдруг, с какой-то малой вероятностью, но все же произойдет что-то непредвиденное, то это все-таки будет ограничено зоной самого реактора. Все неприятности останутся внутри.

И вот самые главные преступники – это те, кто проигнорировали третий элемент...»

Человеческий фактор нередко является причиной аварий и катастроф. Без него не обошлось и на ЧАЭС. Произошло разрушение реактора четвертого энергоблока вследствие двух взрывов. Реактор был полностью разрушен, а в окружающую среду выброшено большое количество радиоактивных веществ. Основными причинами аварии послужило нарушение персоналом техники безопасности и порядка проведения испытаний, а также конструктивные недостатки в строении реактора РБМК-1000.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стенограмма аудиозаписи с кассет Легасова Валерия Алексеевича о Чернобыльской катастрофе.
2. Статья «Чернобыльская авария - взрыв 4-го реактора АЭС» с сайта [istoriarusi.ru](http://istoriarusi.ru)
3. Материалы сайта [ru.wikipedia.org](http://ru.wikipedia.org)
4. Пятая серия сериала Chernobyl, 2019.

УДК 620.001

М. А. БЕЛЯНСКАЯ

*blnskm@icloud.com*

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук, доц. М. М. АБРАМОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ЗЕЛЕНый ВОДОРОД

**Аннотация.** В работе представлен обзор литературы, результаты которого показывают большой интерес научного сообщества к вопросам «зеленой» энергетики, и в частности «зеленого водорода». Показано что в результате взаимодействия с водородом различных материалов, в том числе и аустенитных сталей наблюдается водородное охрупчивание и снижение пластичности в материалах.

**Ключевые слова:** зеленая энергетика, воздействие водорода, водородное охрупчивание, нержавеющая сталь

Зеленая энергетика - часть энергопроизводящей системы, использующая возобновляемые источники энергии. Самыми распространенными видами зеленой энергетики являются фотоэлектрические преобразования солнечной энергии и использование энергии ветра. Эти способы получения электроэнергии нацелены на рациональное использование природных ресурсов и одновременно на уменьшение негативного влияния на окружающую среду[1].

«Зеленая» энергия и «зеленые» технологические инновации положительно связаны с «зеленым» ростом. А зеленые технологические инновации могут усилить положительное влияние зеленой энергии на экономический рост и способствовать дальнейшему устойчивому экономическому развитию. Зеленые технологические инновации являются положительным посредником в воздействии зеленой энергии на экономический рост. Влияние «зеленой» энергии неоднородно и асимметрично, тогда как влияние «зеленых» технологических инноваций постоянно[2].

При переходе на зеленую энергетику, и в частности, на энергетику использующую водород, как на топливо будущего, важно, каким образом этот водород получен. Зеленый водород – это топливо, полученное без выбросов в окружающую среду.

Сам термин "зеленый водород" – это скорее статус топлива, подтверждающий, что оно было получено при помощи преобразования энергии из возобновляемых источников энергии, и в процессе его производства в окружающую среду не было выбросов парниковых газов.

Главным преимуществом зеленого водорода является то, что он может заменить классические ископаемые виды топлива во многих областях человеческой деятельности.

Возрождение интереса к водороду объясняется с одной стороны технологическими достижениями, с другой усилением конкуренции в энергетической отрасли. Но не менее важными мотивами для изучения водорода и его взаимодействием с различными материалами являются связанные с энергетикой проблемы энергетической безопасности, загрязнения воздуха и изменения климата – проблемы, которые в совокупности ставят под сомнение фундаментальную устойчивость нынешней энергетической системы. Эти факторы показывают, почему острова, находящиеся на переднем крае уязвимости перед высокими ценами на нефть и изменением климата, находятся в авангарде перехода на водород

Водород сам по себе не может полностью решить каждую из сложных проблем, такие как: изменение климата и связанные с ним последствия повышения уровня моря, затопления прибрежных районов, потери малых островов; экстремальные погодные явления; снижение продуктивности сельского хозяйства и доступности воды; потеря биоразнообразия на которые влияют не только запасы топлива, но и такие факторы, как численность населения, чрезмерное и недостаточное потребление, разрастание, заторы и зависимость от транспортных средств. Но водород может обеспечить серьезную защиту от этих рисков. Благодаря распространению бытовой техники, более децентрализованных «микростанций» и транспортных средств на основе эффективных топливных элементов, единственным побочным продуктом которых является вода, водород резко сократит выбросы твердых частиц, окиси углерода, оксидов серы и азота и

других местных загрязнителей воздуха. Обеспечивая надежные и обильные внутренние запасы топлива, водород значительно снизит потребность в импорте нефти, обеспечив энергетическую независимость и безопасность, которых жаждут многие страны [3].

В результате взаимодействия водорода с любыми материалами наблюдается водородное охрупчивание. Это хрупкость материала под воздействием водорода. Это явление происходит из-за диффузии и растворения водорода в микроструктуре металлических трубопроводов или инфраструктур. В сочетании с механическим напряжением водород создает волосяные трещины, которые со временем становятся все больше и больше [4].

Явление водородного охрупчивания не является новым. Еще в 1875 году Джонсон обнаружил изменения в упругости и напряжении разрушения железа после его временного погружения в кислоту.

Выводы Джонсона привели к дальнейшим исследованиям, которые показали, что только кислоты, выделяющие водород, ухудшают свойства железа в результате своего воздействия. Таким образом, связь с водородом была быстро установлена.

Следовательно наличие водородных трещин и блистеров, как правило, ухудшает механические свойства металлов, что обусловлено, по крайней мере, тремя причинами: а) уменьшается «живое» сечение металла; б) появляются внутренние концентраторы напряжений; в) высокое давление молекулярного водорода в порах облегчает зарождение и развитие трещин. Общая особенность этих явлений заключается в том, что они развиваются исключительно под действием внутреннего давления молекулярного водорода, без приложения какой-либо внешней нагрузки.

На данный момент воздействию водорода подвергается целый ряд материалов, одним из которых является аустенитная коррозионностойкая сталь AISI 316. Благодаря добавлению молибдена и никеля коррозионная устойчивость металла настолько высокая, что позволяет использовать сталь в криогенных условиях и

агрессивных средах. Помимо этого, молибден защищает данную сталь от питтинговой и щелевой коррозии в хлористой среде и в парах уксусной кислоты.[5]

Нержавеющая сталь 316 характеризуется отличной прочностью, жаростойкостью, пластичностью и устойчивостью к любым кислотам.

Данная сталь AISI 316 подходит для применения во многих областях промышленности благодаря расширенным и улучшенным свойствам. Изготовление емкостей, предназначенных для использования в коррозионной среде и хранения жидкостей, активно катализирующих окислительные процессы; а так же в качестве приспособлений и оборудования для химического производства, горнодобывающей промышленности, нефтедобычи, бумажной промышленности и продовольственного сектора. Во всех этих применениях данная сталь может подвергаться воздействию с водородом.

Воздействие водорода на сталь проявляется в двух формах: охрупчивание в результате повышения концентрации водорода в стали (обратимая водородная хрупкость) и охрупчивание в результате взаимодействия водорода с углеродом стали (необратимая водородная хрупкость). Несмотря на большое число публикаций, освещающих влияние водорода на свойства сталей, специфичность поведения водорода в сталях при различных условиях до настоящего времени не позволяет дать однозначные ответы на ряд вопросов относительно физической природы и механизма влияния водорода на свойства сталей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедева Т.А. , Лебедев Ю.В. Зеленая экономика, зеленая энергетика, зеленые инвестиции // Журнал. – 2018 . - С. 367-373.
2. Jiaman Li / Green energy as a new determinant of green growth in China: The role of green technological innovation / Jiaman Li, Kangyin Dong, Xiucheng Dong // Energy economics. – 2022. – Vol.114. 106260
3. Seth Dunn. Hydrogen futures: toward a sustainable energy system // International Journal of Hydrogen Energy. – 2002. Vol. 27. – P. 235-264.
4. Скрипчук Г.А. Водородная хрупкость / Г.А. Скрипчук. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2009. № 11 (11). – С.13-15.
5. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. Марочник сталей и сплавов // RUGRAM. – 2012.

УДК 53.04: 612.1

Р. Г. ГУБАЙДУЛЛИН, С. Р. ЯГАФАРОВ

*radik1998.GRG@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук, доц. З. А. ЯГАФАРОВА

*Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета  
Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ НА КРОВОТОК**

*Аннотация.* В работе представлены результаты численного эксперимента по исследованию объемного кровотока через сосуды в зависимости от вязкости жидкости.

*Ключевые слова:* кровоток, сосуды, реологические свойства, вязкость.

Реологические свойства крови определяются совокупностью функционального состояния форменных элементов крови (подвижность, деформируемость, агрегационная активность эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов) и вязкостью. Вязкость крови является одной из интегральных характеристик микроциркуляции, влияющих на гемодинамические параметры.

Течение крови по крупным и мелким сосудам и по капиллярам отличается по некоторым характеристикам. При некоторых патологиях тенденция к агрегации эритроцитов – основных форменных элементов плазмы, концентрация которых в крови составляет  $(4 - 6) \cdot 10^6 \text{ мм}^3$  может настолько возрасти, что требуются дополнительные затраты энергии для продвижения крови. Ввиду малой концентрации лейкоцитов и тромбоцитов они не оказывают такого существенного влияния на механические свойства крови как эритроциты. Признаками загущения крови являются: сонливость, быстрая утомляемость, слабость, ухудшение памяти и т.п.

К причинам загущения крови относятся нарушение биохимического состава крови, способствующее склеиванию эритроцитов и приводящее к кислородному голоданию клеток; избыточной кроверазрушающей функции селезенки; закислению организма; обезвоживанию; нехватке в организме минералов и витаминов и т.д.

По мере увеличения градиента скорости и уменьшения диаметра кровеносных сосудов агрегаты эритроцитов распадаются на отдельные клетки, что вызывает уменьшение вязкости крови. Эффект снижения вязкости крови наблюдается в сосудах диаметром менее 500 мкм и особенно сильно проявляется в капиллярах, где вязкость крови снижается почти вдвое по сравнению с крупными сосудами, приближаясь, таким образом, к значению вязкости плазмы. При некоторых патологических состояниях эластичность стенок эритроцитов уменьшается и как следствие – ухудшается кровообращение. Вязкость крови возрастает с увеличением концентрации эритроцитов. Так, вязкость крови в крупных сосудах в норме составляет 4 – 6 мПа с; при анемии (уменьшении содержания эритроцитов) – 2 – 3 мПа с; при полицитемии (увеличении содержания эритроцитов) – 15 – 20 мПа с.

Движение крови по сосудам происходит в результате градиента давления. Этот градиент предопределяет направление и скорость движения крови. В общих чертах движение крови по сосудам описывается законом Пуазейля. Трение частиц крови о стенку сосуда создает сопротивление кровотоку. При сужении сосудов сопротивление току крови возрастает, а при расширении – снижается. Соудистое сопротивление описывается следующей формулой:

$$R = \frac{8l\eta}{\pi r^4};$$

где  $l$  – длина сосуда,  $r$  – радиус сосуда,  $\eta$  – вязкость крови.

На рис. 1. приводятся значения объемного кровотока через сосуды в зависимости от вязкости жидкости при различных давлениях на концах сосуда: 1 –  $p = 180$  мм. рт. ст.; 2 –  $p = 150$  мм. рт. ст.; 3 –  $p = 120$  мм. рт. ст.; 4 –  $p = 100$  мм. рт. ст.



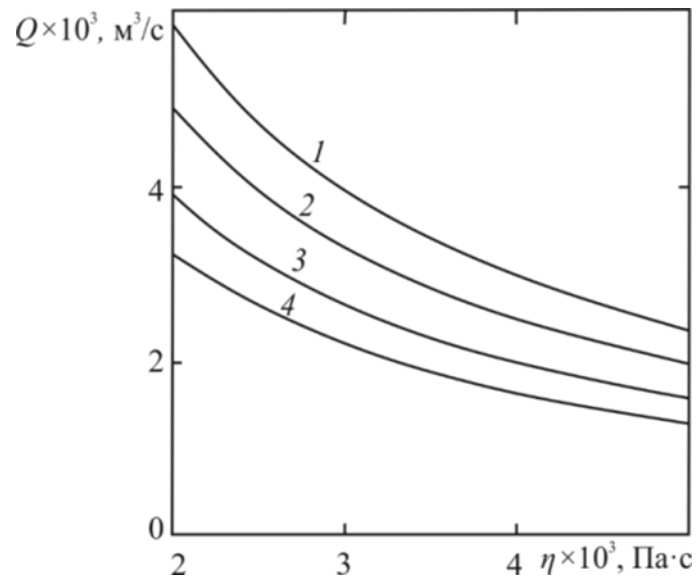


Рис. 1. Объемный кровоток через сосуды в зависимости от вязкости жидкости

Таким образом, в ходе эксперимента нами были изучены механизмы движения крови в сосудистой системе и определено количество протекающей жидкости через определенный участок при различных давлениях в зависимости от вязкости жидкости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. –М.: Дрофа. 2003. –560 с.
2. Ягафарова З.А., Зеленова М.А., Нигматуллина Г.Р. Исследование гемодинамических характеристик системы кровообращения // Инженерная физика. 2020. № 10. С. 23–28.

М. А. ДАВЛЕТШИН, С. Р. ЯГАФАРОВ, А. С. ПЕТРОВ

*mlk3mlke@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук, доц. З. А. ЯГАФАРОВА

*Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета  
Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОРГАНИЗМ

*Аннотация.* Рассмотрены физические аспекты влияния радиоактивного облучения на организм и некоторые характеристики этого воздействия.

*Ключевые слова:* лучевая терапия, радиоактивное излучение, изотопы.

Люди ежедневно подвергаются воздействию природных источников радиации, естественному излучению космических лучей, влиянию антропогенных источников, начиная от производства ядерной энергии до использования радиации для диагностики или лечения. Согласно информации ВОЗ, медицинское использование радиации составляет 98% дозы от всех искусственных источников и составляет 20% от общего облучения населения. Ежегодно во всем мире проводится более 3600 миллионов диагностических радиологических обследований, проводится 37 миллионов процедур ядерной медицины и проводится 7,5 миллиона лучевой терапии [1].

Радиационное повреждение включает в себя морфологические и функциональные изменения, происходящие в нераковых или «нормальных» тканях как результат ионизирующего излучения [5, 6].  $\beta$ -излучение может проникать на несколько сантиметров в кожу, тогда как  $\gamma$ -излучение проникать через кожу в организм человека. Степень радиационного поражения связана с общей дозой облучения, долей облученного тела, объемом облученных тканей и временным интервалом полученной дозы облучения. Наиболее радиочувствительными клетками в организме являются те, которые являются пролиферативно-активными и достаточно насыщены кислородом. Наиболее радиочувствительными из органов являются костный мозг, репродуктивная и желудочно-кишечная системы, кожа, мышцы и мозг.

Среди всех искусственных радиоактивных изотопов, используемых на практике наиболее широкое применение нашел кобальт 60. Этот изотоп имеет сочетание высокой удельной активности, высокой энергии гамма-излучения, удобного периода полураспада и наличия всего одного природного стабильного изотопа, что упрощает трансмутацию. Фактически, источники гамма-излучения на базе кобальта 60 являются неким стандартным вариантом везде, где нужны фотоны с энергией больше 1 МэВ. Кобальт 60 является активационным изотопом, его получают в результате поглощения нейтронов природным кобальтом 59. Этот процесс имеет максимальную эффективность (37 барн) на тепловых нейтронах, поэтому для производства подходит практически любой реактор.

В работе исследованы физические основы действия ионизирующего излучения на биоткани, рассчитана поглощенная доза и мощность эквивалентной дозы облучения организма пациента, проходившего лечение на гамма-аппарате с изотопом  $^{60}\text{Co}$ , определена зависимость удельной активности данного изотопа от времени и рассчитана годовая доза при внутреннем облучении.

Поглощенная доза  $D_{\text{полгл}}$ , т.е. энергия, передаваемая веществу единичной массы, определяется по формуле:

$$D_{\text{полгл}} = E/m \quad (1),$$

где  $E$  – энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым веществом,  $m$  – масса облучаемого вещества.

Мощность эквивалентной дозы дозы  $D_{\text{экв вн}}$ , получаемой в рассматриваемом органе или ткани при облучении определяется:

$$D_{\text{экв вн}} = 2,7 \cdot 10^{-11} \cdot A_{\text{уд}} \cdot K_{\gamma} \cdot \rho \cdot g \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (2),$$

где  $A_{\text{уд}}$  – удельная активность радионуклида в излучаемом органе пациента;  $K_{\gamma}$  – гамма-постоянная данного радионуклида;  $\rho$  – плотность ткани;  $g$  – геометрический фактор;  $K_1$  – коэффициент перевода единицы экспозиционной дозы в единицу поглощенной дозы ( $K_1 = 0,01$  Гр/Р);  $K_2$  – коэффициент качества облучения ( $K_2 = 1$  Зв/Гр). Табличные данные при расчетах получены из источников литературы [2-5].

Мощность дозы, получаемая пациентом рассчитана по формуле 2 и принимает значение  $D_{\text{ЭКВ ВН}} = 200,8 \cdot 10^{-11} \text{Зв/ч}$ .

Поглощенная доза, полученная при энергии облучения  $E = 1,25 \text{ МэВ} = 2 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ , оказалась равной:  $D_{\text{ПОГЛ}} = 2,19 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/кг}$

Годовую дозу внутреннего облучения следует определить с учетом эффективного периода полувыведения нуклидов из организма ( $T_{1/2}$  и  $T_{B/2}$ ), эффективный период определялся как  $T_{\text{эф}} = \frac{T_{1/2} \cdot T_{B/2}}{T_{1/2} + T_{B/2}}$ , и принимает значение  $T_{\text{эф}} = 9,45 \text{ сут}$ .

При облучении всего организма уровень риска от облучения пациента  $r$ , рассчитанная по формуле:

$$r = 1,65 \cdot 10^{-2} \cdot D_{\text{ЭКВ}} \quad (3),$$

где  $D_{\text{ЭКВ}}$  – годовая эквивалентная доза облучения пациента,  $\text{Зв/год}$ . Таким образом,  $r = 8,25 \times 10^{-4} \text{ (чел} \times \text{год)}$ .

На рис.1. приведена зависимость мощности эквивалентной дозы от плотности тканей в организме.

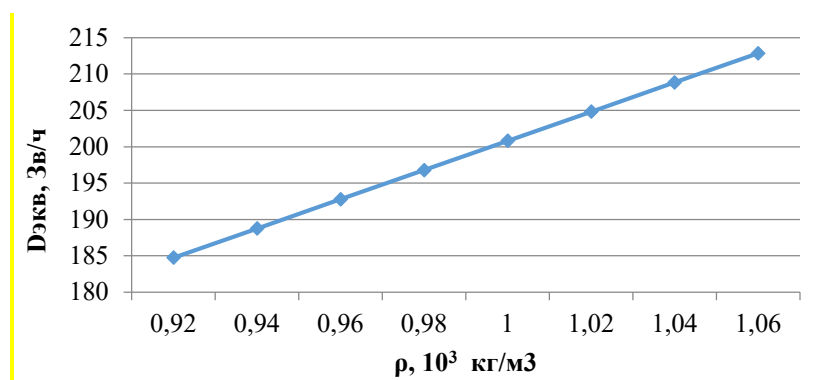


Рис. 1. Зависимость полученной мощности эквивалентной дозы от плотности ткани

Значения средней плотности органов получены усреднением данных полученных из источников [2-5], при этом учитывались минеральный состав кости, мышечная масса, вес жировой ткани и т.д., исходя из того, что плотность биотканей организма занимает диапазон от  $930 \text{ кг/м}^3$  до  $1070 \text{ кг/м}^3$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ionizing radiation, health effects and protective measures. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures> (дата обращения 10.09.22)
2. Джойнер М.С. Основы клинической радиобиологии. – М.: Бином. Лаб. знаний, 2013 – 600 с.
3. Линденбратен Л.Д., Королук П.И. Медицинская радиология и рентгенология М.: Медицина, 1993 г. – 566 с.
4. Пономаренко Г.Н. Физические методы лечения // Справочник. – СПб.: ВМедА, 2002. С. 299.
5. Терновой С.К., Васильева А.Ю., Синицин В.Е. Лучевая диагностика и терапия. – М.: Медицина, 2008.–231 с.
6. Mendelsohn F, Divino CM, Kerstein ED (2002) Wound care after radiation therapy. *AdvSkin-Wound Care* 15(5): 216–24.

А. Р. ДАЛИМОВА, Л. И. ЗАЙНУЛЛИНА

*dalimovaalina8@gmail.com*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. И. В. АЛЕКСАНДРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СОСТОЯНИЙ В БЕРИЛЛИЕВЫХ БРОНЗАХ ЗА СЧЕТ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТОДАМИ ИПД**

*Аннотация.* В данной статье представлен обзор научной литературы, результаты которого показывают возможность повышения прочностных свойств бериллиевых бронз за счет формирования ультрамелкозернистых и наноструктурных состояний различными методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Показано, что ИПД положительно влияет на микротвердость, предел прочности, пластичность и коэффициент трения.

*Ключевые слова:* Бериллиевые бронзы; интенсивная пластическая деформация; упрочнение.

Бериллиевые бронзы – это сплавы меди с бериллием. Они применяются в промышленности для изготовления упругих элементов ответственного назначения (плоских и витых пружин, упругих элементов в виде гофрированных мембран, токопроводящих упругих деталей электрооборудования, пружинящих деталей электронных приборов и устройств и т.д.). Их отличают высокие прочностные свойства, предел упругости и релаксационная стойкость, электро- и теплопроводность, сопротивление коррозии. Обладая высоким отношением предела текучести к модулю Юнга, такие сплавы также используются для изготовления изделий с высокой износостойкостью, таких как подшипники.

Бериллиевые бронзы мало склонны к хладноломкости и могут эксплуатироваться в интервале температур 200-250°C. К недостаткам этих сплавов относятся высокая стоимость и дефицитность бериллия, а также его токсичность [1].

Широко известно, что методы интенсивной пластической деформации (ИПД) могут обеспечить формирование ультрамелкозернистых (УМЗ) и наноструктурных (НС) состояний в различных металлических материалах. Получаемый размер зерен и характер формирующейся структуры зависят от применяемого метода ИПД, режимов обработки, фазового состава и исходной микроструктуры материала [2]. В данной работе анализируются известные из научных литературных источников результаты применения таких методов ИПД, как равноканальное угловое прессование (РКУП) и интенсивная пластическая деформация

кручением (ИПДК), для формирования наноструктурных состояний и, за счет этого, повышения прочности и износостойкости бериллиевых бронз.

В работе [3] представлены результаты исследования бериллиевой бронзы, содержащей 2,0 мас. % Ве и 0,3 мас. % Ni. Образцы в состоянии поставки подвергли 1 проходу РКУП в оснастке с внутренним углом пересечения каналов 90° при температуре 400°C.

В результате ИПД методом РКУП была сформирована ультрамелкозернистая (УМЗ) структура с зернами размером 200-400 нм (рисунок 1а).

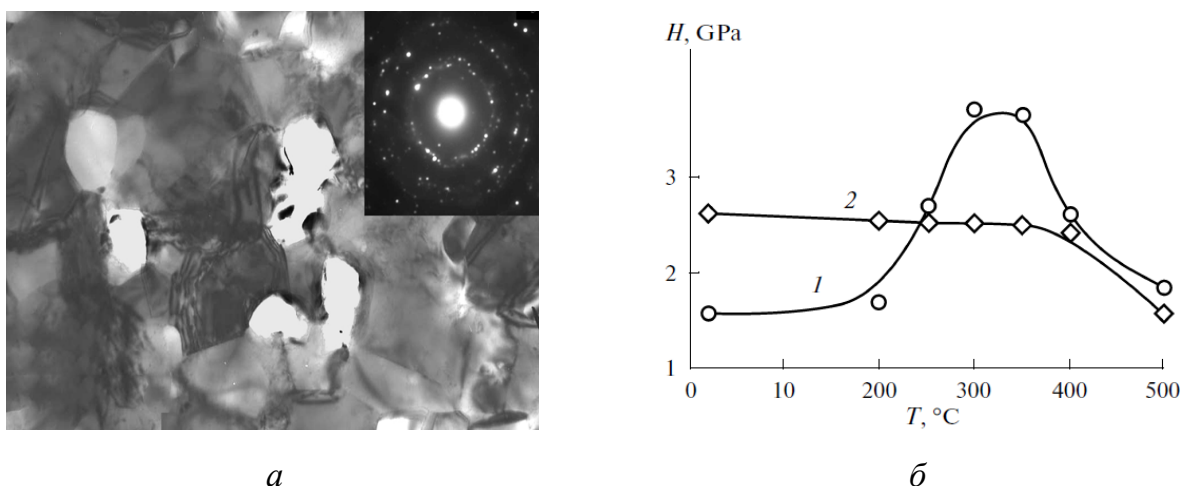


Рис. 1. а – Изображение тонкой структуры сплава Cu-Ве после РКУП; б – изменение твердости сплава в зависимости от температуры старения [3]

В процессе деформации  $\alpha$  - твердый раствор претерпел распад с выделением частицы  $\gamma'$ -фазы. При этом микротвердость бериллиевой бронзы в результате РКУП повысилась с 1,6 ГПа до 2,6 ГПа (рисунок 1 б) [3]. Наблюдалось положительное влияние РКУП на износостойкость бронзы. Это связано с тем, что в деформированных заготовках образовалась дисперсная нанокристаллическая структура, характеризующаяся зернами матрицы со средним размером 40-50 нм.

Максимальное значение микротвердости 3,6 ГПа бериллиевой бронзы наблюдается при температурах старения 300-350°C. При температурах выше 350°C микротвердость резко падает из-за перестаривания  $\alpha$ -твердого раствора. Как следует из рисунка 1 б, в сплаве, подвергнутом РКУП, старение при температурах 250-400°C практически не изменяет уровень микротвердости и значение остается на уровне 2,5-2,6 ГПа. Дальнейшее повышение температуры старения до 500°C приводит к значительному снижению микротвердости аналогично изменению микротвердости после старения исходного состояния. Отсутствие изменения

микротвердости бериллиевой бронзы, подвергнутой РКУП, при старении в интервале температур 200-400°C, по-видимому, связано с тем, что в процессе ИПД, протекающей при температуре 400°C, происходил распад  $\alpha$ -твердого раствора, характеризующийся выделением  $\gamma'$ -фазы (CuBe) и, соответственно, уменьшением степени легирования твердого раствора бериллием. По этой причине последующее старение сплава при температурах до 400°C практически не приводило к интенсивному выделению упрочняющей  $\gamma'$ -фазы из  $\alpha$ -твердого раствора, обедненного бериллием.

В работе [4] образцы сплава Cu-2% Be были подвергнуты 5 оборотам ИПДК при давлении 6 ГПа. Часть образцов подвергли искусственному старению при 325°C в течение 10 часов в исходном состоянии и после ИПДК с целью выделения наноразмерных частиц CuBe.

Микроструктура сплава после ИПДК оказалась относительно однородной и характеризовалась наноразмерными зёрнами. Среднее значение размера зёрен составило около 20 нм (рисунок 2, а).

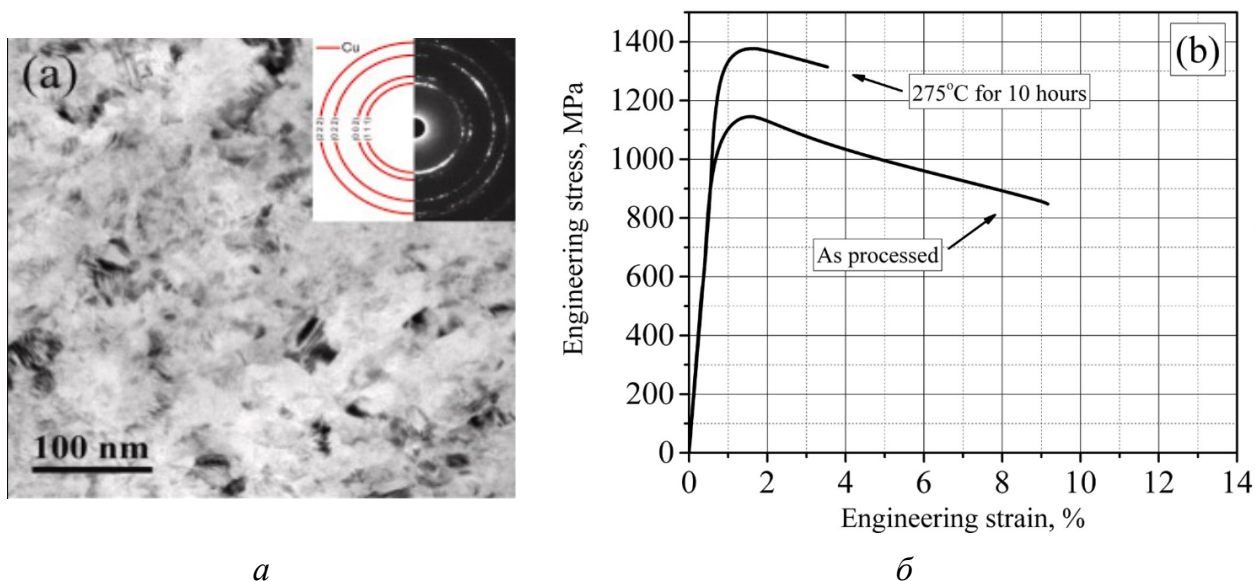


Рис. 2. а – изображение сплава Cu-2% Be после ИПДК; б – кривая растяжения НС сплава Cu-2% Be после ИПДК и искусственного старения при температуре 275 °С [4]

Микротвердость выросла с 100 HV в исходном состоянии до 390 HV после ИПДК. Незначительное изменение параметра решетки исходной медной матрицы указало на незначительную сегрегацию атомов легирующего элемента на границах зёрен.



Прочностные свойства крупнозернистого сплава Cu-2% Be контролировались частицами вторичной фазы CuBe, существенно влияющими на скольжение дислокаций. ИПД привела к значительному упрочнению (предел текучести достиг 1050 МПа) (рисунок 2 б), что авторы объяснили комбинацией упрочнения Холла-Петча и твердорастворного упрочнения. Последующее старение при 275°C в течение 10 часов привело к дальнейшему упрочнению (предел текучести достиг 1300 МПа) (рисунок 2 б), обусловленному формированием наноразмерной двухфазной структуры [4].

Таким образом, в результате проведенного анализа научной литературы, можно сделать вывод о том, что в сплавах системы Cu-Be возможно повысить прочностные свойства с помощью методов ИПДК и РКУП. При этом повышение механических свойств бериллиевой бронзы (Cu-2% Be) происходит за счет формирования УМЗ и НС состояний. Показано, что ИПД положительно влияет на микротвердость, предел прочности и износостойкость. Высокие прочностные свойства открывают новые перспективы в использовании медных сплавов в различных отраслях промышленности.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ проект № 0838-2020-0006 «Фундаментальные исследование новых принципов создания перспективных электромеханических преобразователей энергии с характеристиками выше мирового уровня, с повышенной эффективностью и минимальными удельными показателями, с использованием новых высокоэффективных электротехнических материалов».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь: структура, свойства полуфабрикатов // Справочник. Инженерный журнал. 2002. №1. С. 1-24.
- Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура, свойства // М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. С. 397.
- Korshunov L.G., Korznikov A.V., Chernenko N.L. Effect of the Severe Plastic Deformation and Aging Temperature on the Strengthening, Structure, and Wear Resistance of a Beryllium Bronze // The Physics of Metals and Metallography. 2011. Vol. 111. No. 4. P. 395-402.
4. Lomakin I., Castillo-Rodríguez M., Sauvage X. Microstructure, mechanical properties and aging behaviour of nanocrystalline copper - beryllium alloy // Mater. Sci. Eng. A. 2019. V.744. P. 206–214.

О. А. ЕРМИШЕВ, М. А. СМИРНОВ, А. Ф. ХАЙРУЛЛИН, Н. М. АРСЛАНОВ  
*narkis@yandex.ru*

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева–КАИ  
Казанский квантовый центр, лаборатория интегральной квантовой оптики*

## **ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НАНОВОЛНОВОДА НА НИОБАТЕ ЛИТИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ БИФОТОНОВ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1010 НМ**

*Аннотация.* В работе оптимизируются параметры наноразмерного волновода из ниобата лития для эффективной генерации квантовых запутанных фотонных пар с повышенной яркостью и высокой скоростью двухфотонной генерации. С помощью моделирования структуры поперечного сечения нановолновода были найдены оптимальные параметры его геометрии, обеспечивающие генерацию сверхширокополосных двухфотонных состояний с максимальной шириной спектра достигает ~180 ТГц для длины волны излучения вблизи 1.0 мкм.

*Ключевые слова:* источник фотонных пар; нановолоновод, дисперсионные параметры

Генераторы фотонных пар являются ключевыми элементами во многих современных активно разрабатываемых устройствах в области квантовых технологий, среди которых можно выделить квантовый повторитель [1], а также генераторы одиночных фотонов [2]. В настоящее время большой интерес представляют фотонные пары (бифотоны) с широкой частотной полосой спектра (десятки – сотни ТГц), которые часто называют широкополосными [3-5]. Широкая полоса спектра дает ряд преимуществ, так как позволяет увеличить количество оптических каналов связи с WDM[6], использовать многоуровневое кодирование информации[7], улучшить чувствительность измерительных систем в метрологии[8]. Также широкополосные бифотоны находят широкое применение в литографии [9], квантовой томографии [11], микроскопии [10] и биомикроскопии [15].

Для биомикроскопии требуется создание двухфотонного источника, который совместит в себе не только большую яркость, широкий спектр и высокую скорость генерации фотонных пар, но и возможность контролировать параметры генерируемых фотонных пар в широком диапазоне длин волн в ближнем инфракрасном диапазоне [15], где уже могут быть активными маркеры и не поглощает

вода. Перспективным подходом, позволяющим решать подобные задачи, являются генераторы фотонных пар на основе наноразмерных волноводов [13]. Возможность управлять их дисперсионными параметрами путем конструирования оптимальной структуры позволяет достичь высокой эффективности генерации фотонных пар при широком спектре двухфотонного излучения, что продемонстрировано, например, в работе [14], в которой путем моделирования вблизи центральной длины волны 1550 нм была показана возможность генерации фотонных пар с шириной спектра 100 ТГц. Кроме того, такие генераторы могут быть интегрированы в нанофотонные чипы вместе с другими оптическими и электрооптическими устройствами, такими как модуляторы Маха-Цендера, детекторами, резонаторами, что позволяет значительно уменьшить размеры всей системы и открывает большие перспективы практического применения таких устройств [13]. Однако, в работе [14] практически не был затронут вопрос оптимизации геометрии волновода и длины волны накачки для достижения максимальной ширины спектра бифотонов и минимальной длины волны фотонов в ближнем инфракрасном диапазоне частот, что очень актуально для двухфотонной микроскопии биологических объектов [15]. В нашей работе мы исследуем нанофотонные волноводные структуры из ниобата лития в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн и находим оптимальные параметры геометрии волновода при которых возможно увеличение ширины спектра бифотонов до 177 ТГц.

Наиболее распространенным методом генерации фотонных пар является метод, основанный на явлении спонтанного параметрического рассеяния света (СПР). Необходимым условием возникновения данного процесса является выполнение условий фазового синхронизма. В данной работе нами был использован квазифазовый синхронизм (волновод с периодической поляризацией), ввиду его большой управляемости и высокой точности настройки [2].

Условие квазисинхронизма с учетом дисперсионных свойств волновода при генерации вырожденного двухфотонного состояния с центральной частотой  $\omega_0$  в общем случае принимает следующий вид [14]:

$$\Delta kL = \left[ k(2\omega_0) - 2k(\omega_0) - \frac{2\pi}{\Lambda} \right] L - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{L\beta_{2n}(\omega_0)}{(2n)!} \left( \frac{\Delta\omega}{2} \right)^{2n} \quad (1)$$

где  $\beta_{2n}(\omega_0) = \frac{d^{2n}}{d\omega^{2n}} k(\omega_0)$  – дисперсия четного порядка. Первое слагаемое выражения (1) можно уменьшить практически до 0 при правильном подборе периода домена  $\Lambda$ . Второе слагаемое определяется дисперсионными свойствами волновода, поэтому при проектировании волновода необходимо минимизировать дисперсию  $\beta_{2n}$  на центральной частоте генерируемых бифотонов  $\omega_0$  большего числа порядков ряда разложения. Это приведет к уширению возможного спектра, который будет ограничиваться только вкладом дисперсий высших порядков.

Для расчета дисперсии  $\beta_{2n}$  проводилось моделирование зависимости волновых чисел мод от частоты в различных структурах поперечного сечения волновода в программном пакете Comsol Multiphysics. На рисунке 1а изображена конфигурация поперечного сечения волновода, которая исследовалась в данной работе с указанием всех размеров и материалов слоев. Мы варьировали следующие параметры:  $w$  – ширина верхней части выступа,  $h$  – ширина верхней части выступа,  $p$  – толщина слоя ниобата лития на подложке. Параметры подложки не менялись. Значение длины нановолновода  $L = 5$  мм. Модовый анализ электромагнитного поля проводился в диапазоне длин волн 400 – 3000 нм. На основе построенной модели и численного расчета дисперсионной зависимости эффективного показателя преломления  $n_{eff}(\omega)$  далее нами рассчитывалась дисперсия мод  $\beta^{(2)}$  для анализа спектральных параметров генерируемых фотонных пар.

На рисунке 2 а показаны кривые дисперсии групповых скоростей основной моды нановолновода  $\beta^{(2)}$  для трех различных значений ширины волновода  $w$  – 1, 1.5 и 2 мкм, на рисунках 2б,в,г – кривые дисперсии для различных значений высоты выступа  $h$  при различной толщине слоя ниобата лития  $p$  (2б – при  $p=0.3$  мкм, 2в – при  $p=0.6$  мкм, 2г – при  $p=0.9$  мкм).

На основе собранных данных нам удалось не только подробно изучить поведение дисперсии в волноводных структурах с различными геометрическими параметрами, но и определить области длин волн, в которых можно добиться

генерации сверхширокополосных двухфотонных состояний. В данной работе такие состояния были получены на центральной длине волны 1010 нм в волноводе со следующими параметрами поперечного сечения:  $w = 0.7$  мкм,  $h = 0.8$  мкм,  $p = 1$  мкм. Ширина спектра бифотонного состояния для данной конфигурации составляет по расчетам примерно 180ТГц (см. рис. 3а, б).

Полученные результаты могут быть полезны в нелинейной микроскопии биологических объектов, использующих двухфотонное поглощение.

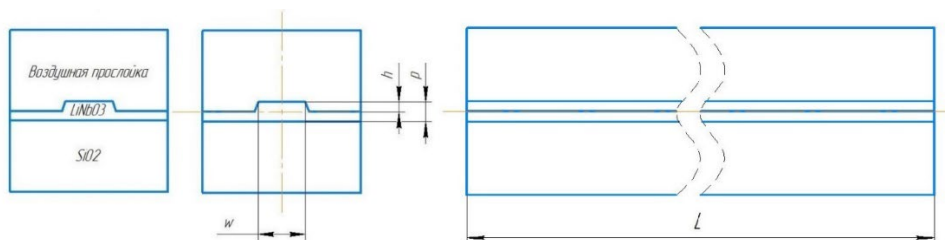


Рис. 1. общий вид модели с указанием размеров. Значение длины  $L = 5$  мм было выбрано аналогично указанному в работе [5], параметры  $w$ ,  $h$ ,  $p$  варьировались при построения поля

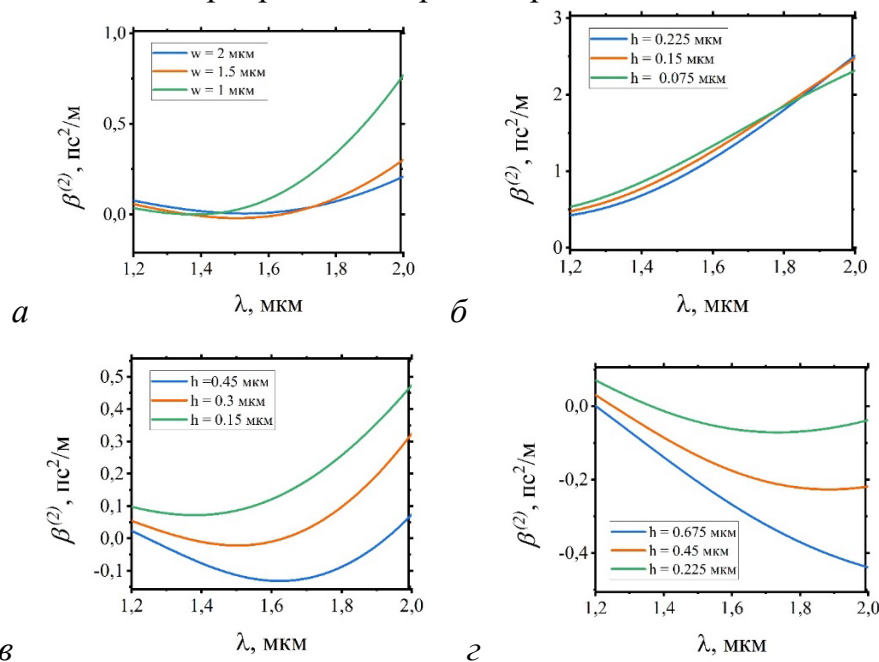


Рис. 2. Дисперсионные кривые для различных геометрических параметров волновода:

*а* – для трех значений ширины  $w$ ; *б* – для трех значений высоты  $h$  при фиксированном значении  $p = 0.3$  мкм; *в* – для трех значений высоты  $h$  при фиксированном значении  $p = 0.6$  мкм; *г* – для трех значений высоты  $h$  при фиксированном значении  $p = 0.9$  мкм

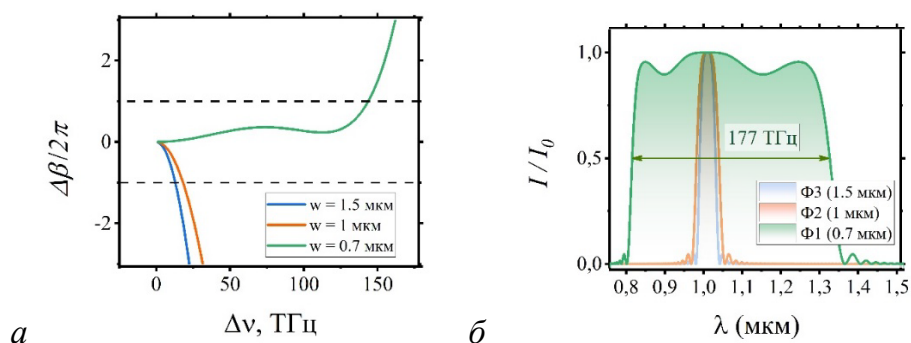


Рис. 3. *а* – Фазовая расстройка;  
*б* - форма спектра бифотонов на длине волны вблизи 1010 нм

*Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России*

*Рег. номер НИОКТР 121020400113-1.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu X. et al. // Nature. 2021. V. 594. № 7861. P. 41.
2. Migdall A., Bienfang J., Polyakov S., Fan J. Experimental Methods in the Physical Sciences Elsevier, 2013.
3. Katamadze K.G. et al. // Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys. 2015. V. 92. № 2. P. 1.
4. Chekhova M. V. et al. // arXiv. 2017. V. 43. № 3. P. 3.
5. Javid U.A. et al. // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 2021. V. 127. № 18. P. 183601.
6. Lim H.C. et al. // Opt. Express. 2008. V. 16. № 26. P. 22099.
7. Bessire B. et al. // New J. Phys. 2014. V. 16. P. 033017 .
8. Giovannetti V., Lloyd S., MacCone L. // Nat. Photonics. 2011. V. 5. № 4. P. 222.
9. Boto A.N. et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. № 13. P. 2733–2736.
10. Dayan B. et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. № 2. P. 023005 .
11. Abouraddy A.F. et al. // Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys. 2002. V. 65. № 5. P. 6.
12. Bisht N.S., Shimizu R. // J. Opt. Soc. Am. B. 2015. V. 32. № 4. P. 550.
13. Zhu D.I. et al. // Advances in Optics and Photonics, 2021. V. 12. № 2. P. 242.
14. Javid U.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127. № 18. P. 1.
15. Желтиков А.М., Скалли, М.О. УФН, 2020. V 190. №7. P.749; Zheltikov A.M., Scully M.O. // Uspekhi Fiz. Nauk. 2020. V. 190. № 07. P. 749.
16. Калачев А.А. Спонтанное параметрическое рассеяние и задачи квантовой информатики: учеб.-метод. пос. Казань: Казан. ун-т, 2012.
17. Д.Н. Клышко Фотоны и нелинейная оптика, Наука, 1980г.

УДК 669

Я. С. ЖЕРЕБЦОВА

*zhyana2002@gmail.com*

Науч. руковод. –канд. физ.-мат. наук, доц. М. М. АБРАМОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ TWIP СТАЛИ**

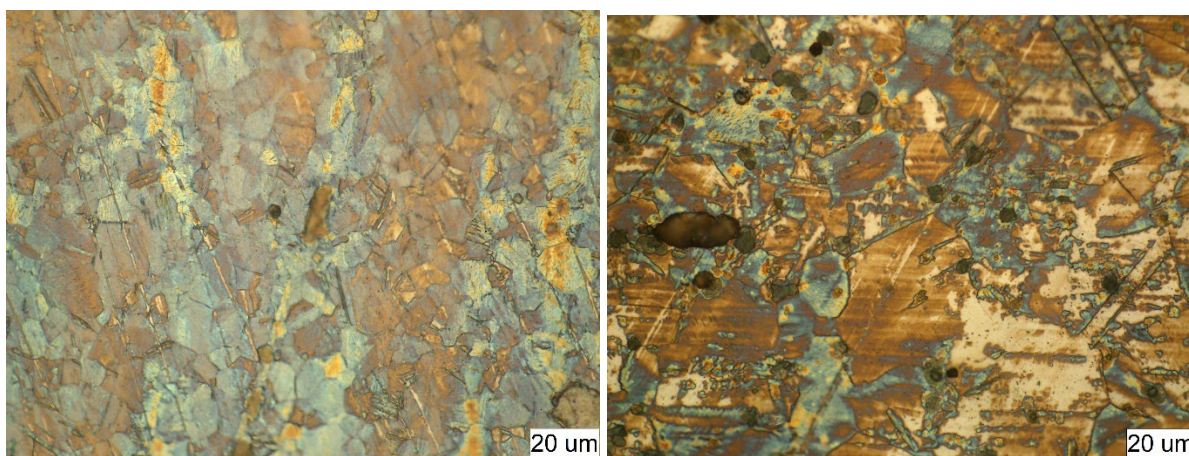
**Аннотация.** Были проведены исследования влияния термической обработки на микроструктуру и микротвердость TWIP стали. Подобран режим (температура и продолжительность) термической обработки позволяющий получить различные структурные состояния.

**Ключевые слова:** TWIP сталь, микротвердость, микроструктура, термическая обработка, размер зерен.

TWIP стали (от английского «пластичность наведенная двойникованием»), являются конструкционными сталями, применяемыми в автомобильной промышленности [1-3]. В наибольшей степени эта сталь востребована в современной автомобильной промышленности, так как может быть использована для производства более сложных деталей, обеспечивая большую свободу инженерам при выборе дизайна, оптимизации (снижении) веса и общей технологии производства автомобиля. Широкому применению данных сталей препятствует высокая легированность (стоимость производства) и сложная технология изготовления. Автопроизводители также пытаются запатентовать автомобильные приложения с использованием стали TWIP и добиваются более сильной защиты своих технологических процессов и своей новой металлургической концепции. (Hyundai, Kia, Honda) В отличие от многих конструкционных материалов, применение которых ограничивается недостаточной прочностью, TWIP стали имеют высокие значения предела прочности и очень хорошую пластичность. Но их недостатком является довольно низкий предел текучести. Одними из эффективных методов повышения прочностных свойств является методы интенсивной пластической деформации, особенно эти методы актуальны для термически не упрочняемых материалов. Исследователями [4], было показано, что исходное состоя-

ние значительно влияет на формирование структуры при интенсивной пластической деформации, и как следствие на прочностные характеристики. Таким образом целью работы было подобрать термические обработки позволяющие получить различные структурные состояния, которые в дальнейшем будут использованы в качестве исходных перед интенсивной пластической деформацией.

Материалом исследования была выбрана TWIP стали: Fe-18Mn-1,5Al-0,6C. В качестве режимов термической обработки были предложены: (1) закалка с температуры 850 °С с предварительной выдержкой 2 часа и (2) закалка с температуры 1050 °С с предварительной выдержкой 1 час [5].



*а* *б*  
Рис. 1. Микроструктура после термической обработки:  
*а* – термообработка (1); *б* – термообработка (2)

Микроструктурный анализ показал, что в результате термических обработок формируется аустенитная структура с различным размером зерен (рисунок 1). В результате после термообработки (1) средний размер зерна составил  $14 \pm 3$  мкм, в структуре наблюдается большое количество двойников со средней толщиной 1,1 мкм. В результате повышения температуры закалки (термообработка (2)) средний размер зерен составил  $49 \pm 14$  мкм, толщина двойников осталась примерно на том же уровне.



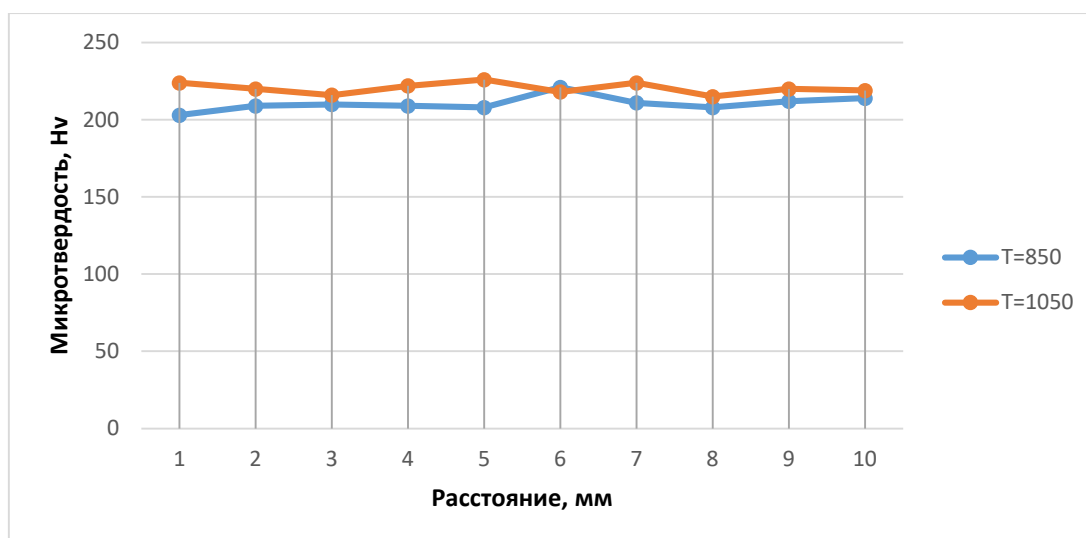


Рис. 2. Распределение микротвердости по сечению образца после различных термических обработок

Измерения микротвердости показали, что не смотря на различный размер аустенитных зерен микротвердость имеет близкие значения: 210 Hv и 220 Hv соответственно после (1) и (2) термической обработок. Такие близки значения могли получиться в связи с тем, что в структуре обнаружено большое количество двойников отжига, которые также выступают как в качестве упрочняющего фактора.

Таким образом, было получено два различных структурных состояния с различным размером зерен, обеспечивающих схожий уровень микротвердости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O. Bouaziz, S. Allain, C.P. Scott, P. Cugy, D. Barbier, High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 15(2011) 141-168
2. Grässel O., Frommeyer G., Derder C., Hofman H. (1997), *J. Phys. IV France*, vol.60, 383 Grässel O., Kruger L., Frommeyer G., Meyer L. (2000), *International Journal of Plasticity*, 16, 1391
3. Jung, J.K. Lee, O.Y., Park, Y.K., Kim, D.E., Jin, K.G., Kim, S.K., Song, K.H. Microstructure and mechanical properties of high Mn TWIP steels. – *Journal of Korean Institute of Metals and Materials*. V.46 (10), pp. 627-633 (2008)
4. Абрамова М.М. Повышенная прочность и функциональные свойства аустенитных наноструктурных сталей, 2017, -171с.
5. И.И.Новиков Теория термической обработки металлов, М.: Металлургия, 1986, - 480с.

УДК 691.735

А. Р. ЗАЙНУЛЛИНА, Л. И. ЗАЙНУЛЛИНА

*adelina27032003@mail.ru*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. И. В. АЛЕКСАНДРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ПОВЫШЕННЫЕ ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ БРОНЗ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИПД**

**Аннотация.** В данной работе представлен обзор научной литературы, результаты которого свидетельствуют о возможности получения высокопрочных состояний в сплавах системы Cu-Al за счет формирования наноструктурных состояний различными методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Рассмотрено влияние интенсивной пластической деформации кручением и равноканального углового прессования на структуру и механические свойства медных сплавов системы Cu-Al с разным содержанием Al. Продемонстрировано положительное влияние низких значений энергии дефекта упаковки на уровень прочностных свойств указанных сплавов.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация; наноструктурные состояния; алюминиевые бронзы; энергия дефекта упаковки.

Развитие современного промышленного производства требует разработки новых высоких наукоемких технологий. Соответственно возрастает необходимость в создании перспективных материалов, обладающих привлекательными физическими и эксплуатационными свойствами. При этом особое внимание уделяется получению конструкционных металлических материалов с повышенными прочностными свойствами [1].

Известно, что повысить прочностные свойства можно за счет измельчения микроструктуры. В связи с этим последние три десятилетия большое внимание ученых привлекли ультрамелкозернистые (УМЗ) материалы, обладающие средним размером зерна не более 1 мкм. Среди них особое место занимают наноструктурные (НС) материалы, обладающие элементами микроструктуры с размером менее 100 нм. Среди таких структурных элементов отметим зерна, двойники, частицы вторичных фаз.

Одними из перспективных методов получения УМЗ и наноструктурных (НС) материалов с привлекательными свойствами является метод интенсивной пластической деформации (ИПД) [1]. При этом, за счет значительного измельчения зерен в результате применения методов ИПД происходит значительное

(в 2-5 раз) повышение микротвердости и прочности по сравнению с крупнозернистыми (КЗ) аналогами [1].

Важным структурным параметром, влияющим на уровень прочностных свойств материалов, является энергия дефекта упаковки (ЭДУ). Изменение ЭДУ в металлических сплавах происходит в результате легирования. Более высокая степень легирования соответствует меньшим значениям ЭДУ. В частности, это характерно для медных бронз.

В данной работе представлены результаты обзора научной литературы, посвященной результатам исследований, направленных на повышение прочностных свойств медных бронз системы Cu-Al с различной ЭДУ, подвергнутых ИПД. В качестве методов ИПД рассмотрены ИПД кручением и равноканальное угловое прессование (РКУП) [1].

В работе [2] заготовки сплавов системы Cu-Al с содержанием Al, равным 2,3, 7,2 и 11,6 ат.%, подвергали РКУП, в ходе которого они продавливались в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями. Внутренний угол пересечения каналов равнялся  $90^\circ$ , а внешний составлял  $30^\circ$ . Для достижения равноосного НС состояния было выполнено 8 проходов заготовок через оснастку при комнатной температуре. Между очередными проходами заготовку поворачивали по часовой стрелке на угол  $90^\circ$  (маршрут В<sub>c</sub>) [2].

Микроструктурные исследования показали, что средний размер зерна сплавов системы Cu-Al в результате РКУП монотонно уменьшается с увеличением числа проходов и концентрации атомов Al (ЭДУ) [2]. Низкое значение ЭДУ в сплаве Cu-11,6 ат.% Al способствовало достижению НС состояния с наименьшим для исследованных сплавов средним размером зерна, равным 57 нм после 8 проходов. Измельчение структуры произошло за счет увеличения плотности дислокаций, деформационного двойникования и образования полос сдвига, которые с увеличением числа проходов РКУП образуются и пересекаются еще больше. На начальном этапе РКУП ширина этих полос сдвига обычно меньше 1 мкм, после 4 проходов РКУП ширина полос составила около 2 мкм. Ширина полос сдвига увеличилась за счет взаимодействия дислокаций и двойников по мере увеличения количества проходов. В пределах этих полос сдвига сформировались

зерна с размером, равным нескольким десяткам нанометров [2]. В итоге окончательная структура представлена НС состоянием.

Формирование НС состояний в результате РКУП способствовало повышению прочности исследованных сплавов. В исходном состоянии значения предела прочности сплавов были равны 220 МПа, 300 МПа и 380 МПа, соответственно. При этом пластичность равнялась 54%, 60% и 70%, соответственно. В результате РКУП сплава с содержанием 2,3 ат.% Al предел прочности повысился с 220 МПа до  $512 \pm 20$  МПа, относительное удлинение при этом изменилось с 54 % до  $9,8 \pm 1,4$ %. В сплаве Cu-7,2 ат.% Al предел прочности повысился с 300 МПа до  $698 \pm 39$  МПа, относительное удлинение при этом изменилось с 60 % до  $10,2 \pm 1,5$ %. В сплаве Cu-11,6 ат.% Al предел прочности вырос с 380 МПа и составил  $854 \pm 24$  МПа, относительное удлинение изменилось с 70 % до  $10,7 \pm 2,1$ % [2]. Таким образом, прочность и относительное удлинение НС сплавов системы Cu-Al были одновременно повышены благодаря значительному измельчению зерна, твердорастворному упрочнению (добавлению атомов алюминия в медную матрицу) и дислокационному/двойниковому упрочнению.

В работе [3] НС состояния были сформированы методом ИПДК. В ходе которого диски сплавов системы Cu-Al с содержанием Al, равным 5 и 15 ат.%, подвергали 5 оборотам кручения под высоким давлением, равным 5 ГПа при комнатной температуре [3].

После ИПДК микроструктура сплавов системы Cu-Al характеризовалась однородностью и наноразмерными зернами. В сплаве Cu-5 ат.% Al средний размер зерен составил 65 нм, в сплаве Cu-15 ат.% Al – 40 нм.

Как видно, средний размер зерна в сплавах, подвергнутых ИПДК, уменьшается с уменьшением ЭДУ. Это связывают с ограниченным поперечным скольжения дислокаций и склонностью к формированию двойников в сплавах с меньшей ЭДУ [3].

В результате проведения ИПДК предел прочности сплава Cu-5 ат.% Al повысился до  $776 \pm 7$  МПа, относительное удлинение изменилось до  $4,2 \pm 0,1$ %. В

сплаве Cu-15 ат.% Al предел прочности увеличился до  $942 \pm 15$  МПа, относительное удлинение при этом изменилось до  $3,4 \pm 0,2\%$  [3].

Таким образом, в результате проведенного анализа литературы, можно сделать вывод о том, что в сплавах системы Cu-Al возможно повысить прочностные свойства в результате формирования УМЗ состояний с помощью методов ИПД. При этом более высокие прочностные свойства достигаются в сплавах с меньшей ЭДУ. Повышение прочностных свойств главным образом достигается за счет измельчения размера зерна, формирования деформационных двойников, увеличения плотности дислокаций, чему способствует понижение ЭДУ в результате растворения в медной матрице атомов алюминия. Высокие прочностные свойства открывают новые перспективы для широкого использования НС алюминиевых бронз в различных отраслях промышленности.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ проект № 0838-2020-0006 «Фундаментальные исследование новых принципов создания перспективных электромеханических преобразователей энергии с характеристиками выше мирового уровня, с повышенной эффективностью и минимальными удельными показателями, с использованием новых высокоэффективных электротехнических материалов».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура, свойства // М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. С. 397.
2. Huang C.X., Hu W., Yang G., Zhang Z.F., Wu S.D., Wang Q.Y., et al. The effect of stacking fault energy on equilibrium grain size and tensile properties of nanostructured copper and copper-aluminum alloys processed by equal channel angular pressing // Mater. Sci. Eng. A. 2012. Vol. 556. P. 638–647.
3. An X., Lin Q., Wu S., Zhang Z. Improved Fatigue Strengths of Nanocrystalline Cu and Cu–Al Alloys // Mater. Res. Lett. 2015. P. 1-7.

А. И. КАШАПОВ

ajratkasapov20781@gmail.com

Науч. руковод. – канд. хим. наук, доц. С. Э. СВИРСКОЙ

*Уфимский государственный авиационный технический университет***СИНТЕЗ И ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ  
ЗОНЫ ПЕРОВСКИТОВ СОСТАВА  $\text{KSnX}_3$  ( $\text{X}=\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ )**

**Аннотация.** В статье рассматриваются перовскиты как полупроводниковые материалы для солнечных ячеек и светоизлучающих диодов, рассматривается возможность замены цезия на калий и олова на свинец.

**Ключевые слова:** перовскиты, солнечные ячейки

Перовскиты состава  $\text{CsPbX}_3$  ( $\text{X}=\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ) являются прекрасными полупроводниковыми материалами для солнечных ячеек и светоизлучающих диодов, а квантовые точки на основе этого перовскита обладают крайне высоким квантовым выходом, также один из плюсов это легкость изменения ширины запрещенной зоны, использованием разных галогенидов в разных соотношениях. Перовскитные нанопленки, используемые в солнечных ячейках и светодиодах, обычно наносят из раствора, готовится раствор галогенидов в ДМСО или ДМФ и наносится с помощью напыления или спинкоатинга, после чего слой высушивают и отжигают. Однако у него есть несколько минусов среди которых дороговизна цезия и токсичность свинца. Цель данной работы – создание и изучение свойств перовскитов состава  $\text{KSnX}_3$  ( $\text{X}=\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ), которые возможно могли бы решить выше указанные проблемы дороговизны цезия и токсичности свинца. Предположение о возможности существования таких перовскитов выдвинуто на основе того что их  $t=0.81$  для хлора и  $t=0.805$  для брома, а  $u=0.51$  для хлора и  $u=0.47$  для брома:

$$t = \frac{R_A + R_X}{\sqrt{2}(R_B + R_X)}$$
$$u = \frac{R_B}{R_X}$$

что соответствует требованиям для структуры перовскита  $\mu > 0,41$  и  $0,8 \leq t \leq 1$  [1]. В итоге задача заключается в синтезе перовскита состава  $\text{KSnX}_3$  ( $\text{X}=\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ), определении ширины запрещенной зоны и выводе о возможности использовании данных перовскитов в солнечных ячейках и светоизлучающих диодах.

Был произведен синтез перовскитов  $\text{KSnCl}_3$  и  $\text{KSnBr}_3$  в ДМСО, с последующим упариванием и отжигом, ширина запрещенной зоны для них находится в пределах 2-3 Эв. Можно сделать вывод что есть смысл продолжать исследование этих перовскитов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. G. Palgrave, D. O. Scanlon, H. Bronstein, E. N. K. Glover, W. Travis On the application of the tolerance factor to inorganic and hybrid halide perovskites: a revised system.

Ю. С. КОБЯКОВА, Ю. Б. САБУРОВА

*kobyakova\_j@mail.ru*

Науч.руковод. – канд. физ.-мат. наук, доц. М. М. АБРАМОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ AISI316L

**Аннотация.** Водород и другие газы в заметных количествах растворяются в твердых и жидких металлах. На практике наводороживание сталей может происходить при: металлургических процессах (выплавка, разливка), контакте с водородосодержащими средами при высоких температурах и давлениях (хранение, переработка и транспортировка нефти, газа и других химических продуктов), термической обработке, сварке, химических и электрохимических процессах (электроосаждение покрытий, травление, коррозионные процессы) и др. При этом в процессе наводороживания происходит значительное снижение пластичности материалов, что существенно может отразиться на эксплуатации деталей. При этом отмечается, что со временем свойства восстанавливаются. В работе исследовано влияние наводороживания на механические характеристики стали а также стабильность этих свойств во времени.

**Ключевые слова:** аустенитная сталь, водород, наводороживание, водородное охрупчивание, механические свойства

В наше время люди стремятся убрать из своего производства углеродистые вещества, загрязняющие окружающую среду, переходя на экологически чистые топлива или экологически чистые зеленые источники энергии. Одним из самых чистых является водород. [1]

Проблема взаимодействия водорода с металлами привлекает внимание исследователей на протяжении многих лет и остается актуальной до сих пор. Водород оказывает сильное влияние на физико-химические свойства материалов и является одной из важнейших причин ухудшения эксплуатационных характеристик. Больше число работ посвящено изучению влияния водорода на аустенитные нержавеющие стали на хромоникелевой основе, что показывает широкий спектр их применения [2].

Наводороживание стали (водородная хрупкость) – явление, связанное с ухудшением физико-механических свойств стали, вызванное включением в ее структуру водорода, причем негативный эффект может проявляться даже от ничтожно малого количества. От наводороживания в первую очередь страдают высокопрочные и закаленные стали [3].



Целью данной работы является исследование влияния наводороживания на механические свойства аустенитной хромоникелевой нержавеющей стали (316L) при одноосном растяжении в различных структурных состояниях.

В качестве материала исследования была выбрана коррозионностойкая сталь 316L. В качестве исходного состояния было использовано состояние полученное в результате закалки на воздухе с температуры 1050°C с предварительной выдержкой в течение часа. Электролитическое наводороживание в растворе NaOH (гидроксид натрия) с добавлением + тиомочевина ( $CS(NH_2)_2$ ) проводили в течение 2 и 4 часов. Испытания на одноосное растяжение проводили сразу после наводороживания и далее спустя 6 часов, спустя 78 часов. Скорость деформации составила  $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

В исходном состоянии материал имеет аустенитную структуру со средним размером около 30 мкм. В исходном состоянии прочностные характеристики составили:  $\sigma_B=578 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2}=289 \text{ МПа}$ ,  $\delta=95\%$ . По сравнению с исходным состоянием (рисунок 1, 2) предел прочности после наводороживания увеличивается и составил 638 МПа и 578МПа при наводороживании в течение 2 часов и 4 часов соответственно, но при этом наблюдается уменьшение пластичности материала с 92% до 63% (таблица 1) (водородное охрупчивание).

Увеличение времени наводороживания и приводит к незначительному снижению пластичности (5-7%) и увеличению прочностных свойств до 638МПа (на 18%).

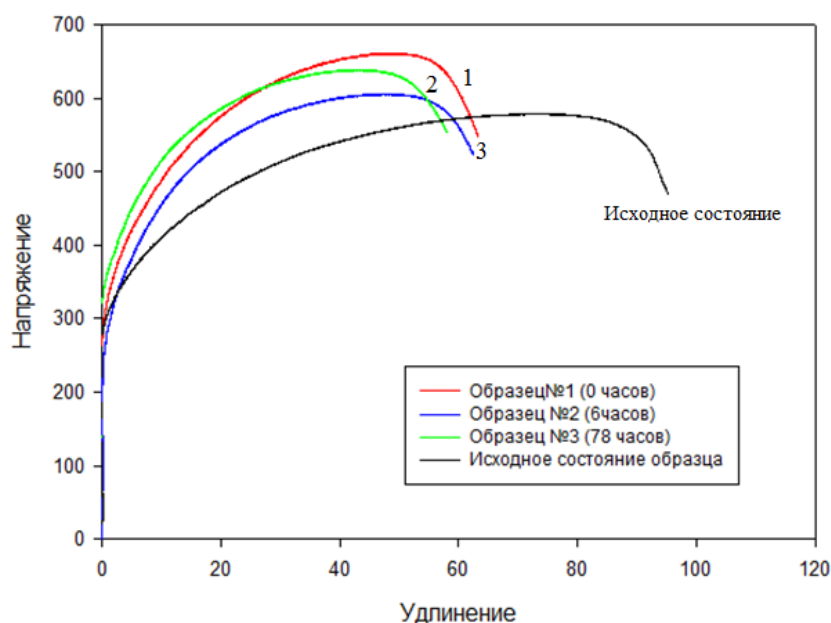


Рис. 1. График зависимости напряжения от удлинения при наводороживании в течение 2 часов с разным временем выдержки перед механическими испытаниями

## Данные механических характеристик аустенитной стали 316

	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Образец №1 (сразу после наводороживания)	659±20	303±50	63±3
Образец №2 (спустя 6 ч после наводороживания)	605±20	209±50	62±3
Образец №3 (спустя 78 ч после наводороживания)	638±20	338±50	58±3
Исходное состояние образца	578±3	284±5	95±3

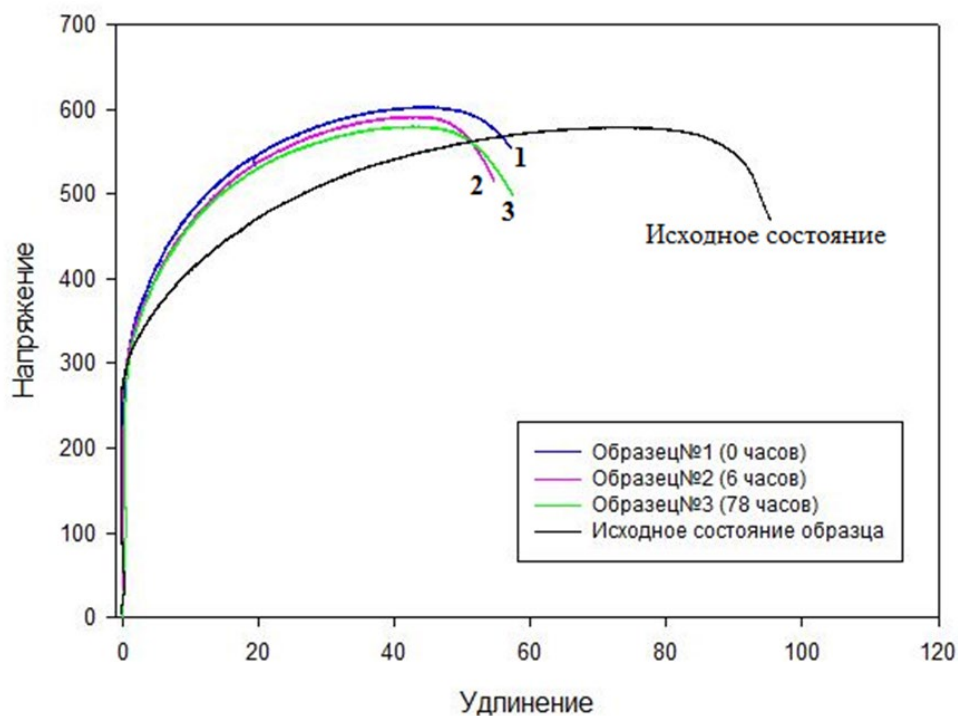


Рис. 2. График зависимости напряжения от удлинения при наводороживании в течение 4 часов с разным временем выдержки перед механическими испытаниями

## Данные механических характеристик аустенитной стали 316

	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Образец №1 (сразу после наводороживания)	602±9	260±19	56±3
Образец №2 (спустя 6 ч после наводороживания)	591±9	274±19	54±3
Образец №3 (спустя 78 ч после наводороживания)	578±9	224±19	57±3
Исходное состояние образца	578±3	293±5	95±3

В работе [4] было показано, что в течение 7 часов времени концентрация водорода в образцах снизилась вдвое, а спустя 9 дней образцы восстанавливают свои свойства. Для исследований времени сохранения данных свойств, механи-

ческие испытания проводили спустя 6 и 78 часов после наводороживания. В результате, даже спустя 78 часов, свойства стали свойства не восстанавливаются и остаются на прежнем уровне.

Таким образом, был отработан режим наводороживания образцов. Показано, что с увеличением продолжительности наводороживания наблюдается снижение пластичности материала (5-7%) и незначительное увеличение прочности 638 МПа (на 18%). Уровень свойств остается стабильным в течение трех дней.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрейдер А. В. Водород в металлах [Текст] / А. В. Шрейдер. – М.: Знание, 1979. – 64 с.
2. Зуев Л.Б. Физика макролокализации пластического течения[Текст] / Данилов В.И., Баранникова С.А. – Новосибирск: Наука, 2008. – 327 с.
3. Wang T. Hydrogen embrittlement fracture mechanism of 430 ferritic stainless steel: The significant role of carbides and dislocations [Текст] / T. Wang, H. Zhang, W. Liang // Materials Science & Engineering. A 829. – 2022. – P. 1-13.
4. Е.В. Мельников Влияние легирования водородом на особенности фазовых превращений при прокатке метастабильной аустенитной стали Х18Н10Т[Текст]/ Е.В. Мельников, Ю.Л. Кретов, М.С. Тукеева, Г.Г. Майер, В.С. Кошовкина, Е.Г. Астафурова // Вестник ТГУ. – 2013. – №4. – с. 1613-1614.

УДК 656.021.8

Р. Р. КОДО

*codorol22@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. М. Т. ХАТМУЛЛИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РИКОШЕТА КАМНЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

**Аннотация.** В работе представлена упрощенная модель круглого камня, брошенного и соприкасающегося с поверхностью воды, реакция которой вызывает отскок или рикошет камня. Моделирование движения камня в воздухе и воде проведено в математической среде MAPLE, получены траектории движения камня в воздухе и воде, определен оптимальный угол броска, показана зависимость сопротивления воздуха на камень.

**Ключевые слова:** камень, траектория, лобовое сопротивление, число Рейнольдса

Каждый из нас хотя бы раз пробовал себя в бросании камней по водной глади на берегу реки или, по крайней мере, когда-либо был свидетелем этого. Интуитивно выбранные камни имеют тенденцию иметь круглую форму и довольно плоскую. Затем камень бросают немного вниз к поверхности воды, и кончиками пальцев ему сообщают вращающийся спин, чтобы он стабилизировался во время полета. При небольшой технике и удаче при броске камень мог иногда не сразу погружаться, а выполнять несколько подскоков, прежде чем в конечном итоге утонуть.

Цель данной работы состоит в том, чтобы проиллюстрировать с помощью законов физики траекторию, описываемую камнем, и смоделировать ее с различными углами и скоростями броска.

Движение камня состоит из двух частей – полет камня в воздухе и в воде. Рассмотрим движение камня в воздухе. На камень действуют сила тяжести и сила тре-

ния о воздух, модуль которой пропорционален квадрату скорости:  $\vec{f} = -kV^2 \frac{\vec{v}}{v}$ .

Рассмотрим коллизионный процесс - взаимодействие камня с водой (Рис.1). При контакте с водой реакция поверхности воды дополняет баланс сил. Что касается этой последней силы, сложность моделирования заключается в том, что она возникает из-за потока вокруг камня при контакте камень с водой. В на-

шем случае мы будем считать, что поток воды достаточно медленный, и если мы обозначим  $V$  – скорость камня порядка нескольких метров в секунду,  $L_c$  – характерный размер камня и  $\nu$  – скорость потока воды, то число Рейнольдса [1]

$Re = \frac{VL_c}{\nu}$  намного больше единицы, и тогда можно пренебречь вязкими силами.

В этом режиме сила  $\vec{F}$  воздействия воды пропорционально квадрату скорости, погруженной поверхности движущегося камня и плотности жидкости. Ее можно разложить в соответствии с направлением камня и перпендикулярно ему:

$\vec{F} = \frac{1}{2}C_l\rho_w V^2 S_{im} \vec{n} + \frac{1}{2}C_f\rho_w V^2 S_{im} \vec{t}$ , где  $C_l$  и  $C_f$  являются коэффициентами лобового сопротивления и подъема соответственно,  $\rho_w$  плотность воды,  $V$  модуль скорости камня,  $S_{im}$  погруженная поверхность камня.

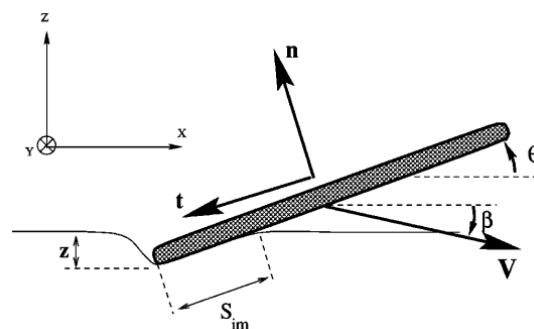


Рис. 1.

Проекции на декартовы оси этих различных сил принимают следующий

вид:

$$\vec{f} = \begin{cases} f_x = -f \cos(\theta) \\ f_y = \begin{cases} -f \sin(\theta), Vy > 0 \\ f \sin(\theta), Vy < 0 \end{cases} \end{cases} = \begin{cases} f_x = kV^2 \cos(\theta) \\ f_y = \begin{cases} kV^2 \sin(\theta), Vy > 0 \\ -kV^2 \sin(\theta), Vy < 0 \end{cases} \end{cases},$$

$$\vec{P} = \begin{cases} P_x = 0 \\ P_y = -P = -mg \end{cases},$$

$$\vec{F} = \begin{cases} F_x = -\frac{1}{2}C_l\rho_w V^2 S_{im} \sin(\theta + \beta)(C_l \sin \theta + C_f \cos \theta) \\ F_y = \frac{1}{2}C_l\rho_w V^2 S_{im} \sin(\theta + \beta)(C_l \cos \theta - C_f \sin \theta) \end{cases}.$$

где  $\beta = \arctan\left(-\frac{Vy}{Vx}\right)$ .

Запишем 2-й закон Ньютона для камня в проекциях на декартовы оси:

$$\begin{cases} ma_x = kV^2 \cos(\theta) \\ ma_y = -mg + \begin{cases} kV^2 \sin(\theta), Vy > 0 \\ -kV^2 \sin(\theta), Vy < 0 \end{cases} \end{cases} \text{ в воздухе}$$
  

$$\text{и } \begin{cases} ma_x = -\frac{1}{2}C_l\rho_w V^2 S_{im} \sin(\theta + \beta)(C_l \sin \theta + C_f \cos \theta) \\ ma_y = -mg + \frac{1}{2}C_l\rho_w V^2 S_{im} \sin(\theta + \beta)(C_l \cos \theta - C_f \sin \theta) \end{cases} \text{ на поверхности воды.}$$

Полученная система уравнений не имеет аналитического решения. Решение системы произведено в математической среде MAPLE с помощью метода решения дифференциальных уравнений rkf45 который основан на метод решения Рунге-Кутта-Фельберга [2]. Предполагаем, что камень имеет круглую форму радиусом  $R$ . Тогда поверхность, погруженная в контакт с водой:

$$S_{im} = R^2 \left( \arccos\left(1 - \frac{|y(t)|}{R \sin(\theta)}\right) - \left(1 - \frac{|y(t)|}{R \sin(\theta)}\right) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{|y(t)|}{R \sin(\theta)}\right)^2} \right)$$

Система уравнений была решена со следующими параметрами:

$$g = 9.81 N / Kg$$

$$R = 0.025 m$$

$$\rho_w = 1 g / cm^3$$

$$C_l = 0.999$$

$$C_f = 0.499$$

$$\theta = 15^\circ$$

$$m = 0.1 kg$$

$$V_0 = 15 m / s$$

$$k = 0.001 N / m$$

Получим траекторию движения камня, представленную на рис.2:

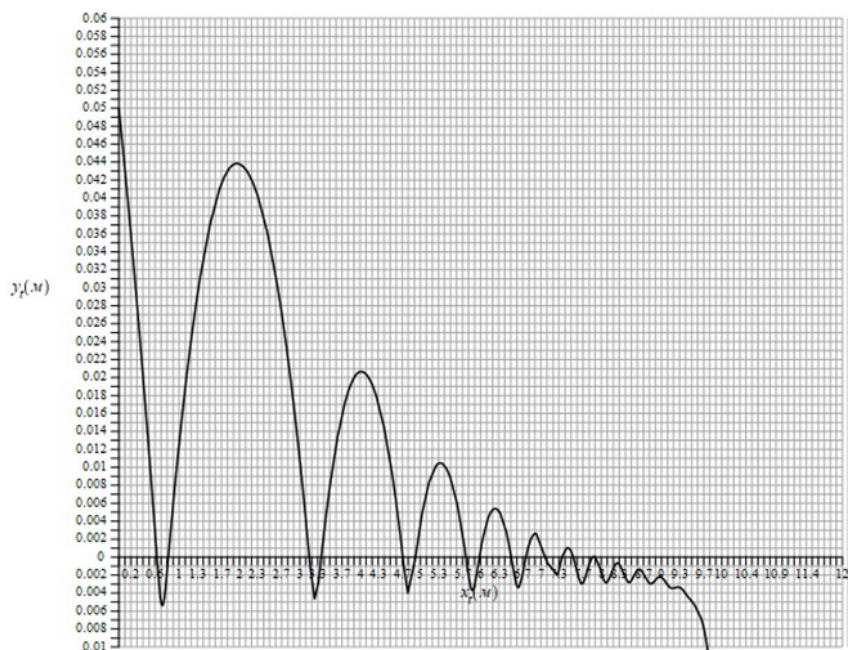


Рис. 2. Траектория камня

Параллельно, изменение модуля скорости в зависимости от времени имеет вид (Рис.3):

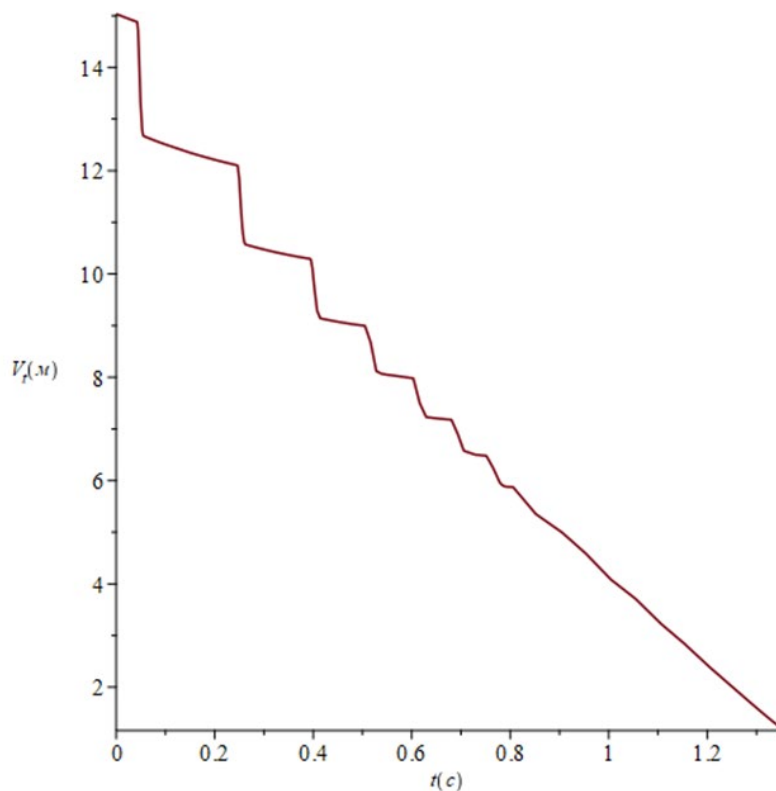


Рис. 3. Изменение скорости камня от времени

Наблюдаются отскоки, в результате чего скорость камня каждый раз постепенно уменьшается. Другими словами, кинетическая энергия уменьшается после каждого отскока.

При начальной скорости  $V_0 = 20 \text{ m/s}$  броска, проекции и разных угла броска Рис. 4:

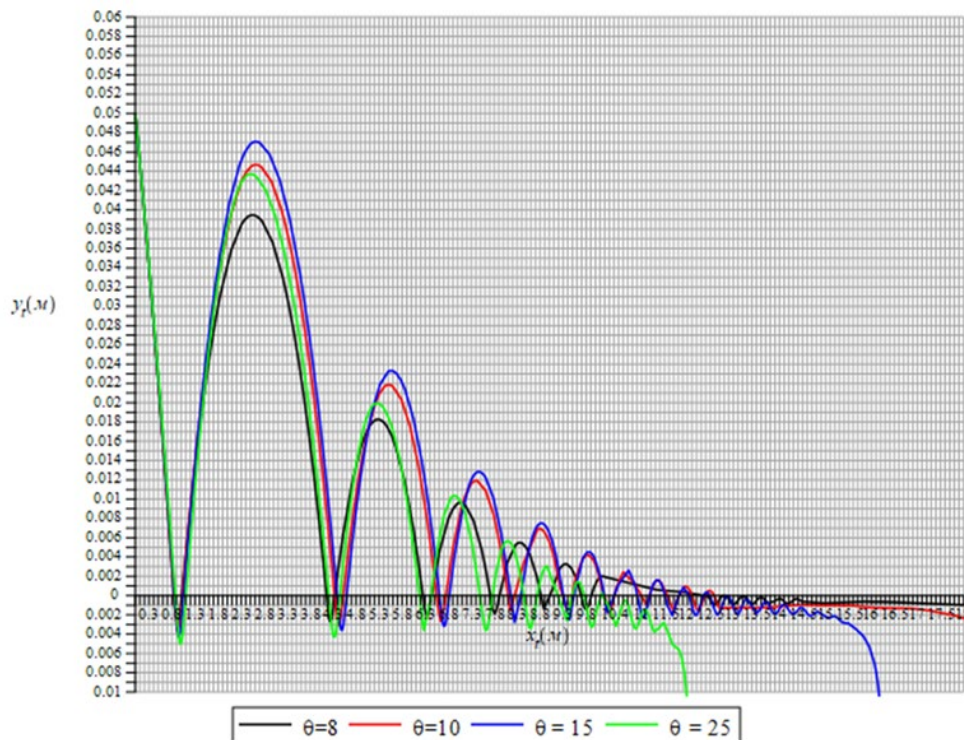


Рис. 4. Траектории при разных углах

Оценим количество отскоков от угла наклона

Таблица 1

Количество отскоков от угла наклона

$\theta$ (в градусах)	$N_{\max}$	$\theta$ (в градусах)	$N_{\max}$
7	5	22	8
8	5	23	8
9	7	24	8
10	7	25	6
11	7	26	6
12	7	27	6
13	7	28	6
14	7	29	5
15	8	30	5
16	8	31	5
17	8	32	5
18	8	33	5
19	8	34	4
20	8	35	4



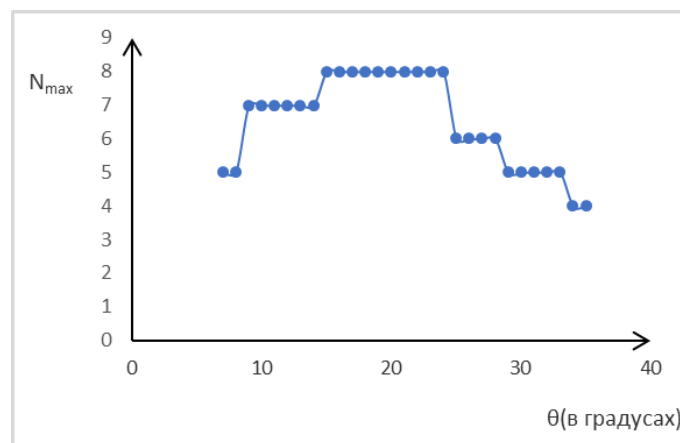


Рис. 5.  $N_{\max}$  в зависимости от  $\theta$

Из графика на Рис.5 видно что существует более благоприятный диапазон углов броска  $\theta \in [15^\circ, 25^\circ]$ .

Оценим глубину погружения в зависимости от угла броска и сравним с глубиной погружения, которая была получена аналитически в статье [3] после некоторых упрощений по формуле:

$$|y_{\max}| = \frac{g}{\omega_0^2} \left[ 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\omega_0 V_{y0}}{g} \right)^2} \right]$$

Таблица 2

$\theta$ (в градусах)	$Z_{\max}$ (м)	$Z_{\max}$ теоретически(м)
7	0.00353	0.00554
8	0.0037	0.00594
9	0.00385	0.00632
10	0.00399	0.00668
11	0.00411	0.00702
12	0.00423	0.0073528
13	0.00434	0.0076688
14	0.00444	0.0079735
15	0.00453	0.0082677
16	0.00462	0.0085526
17	0.0047	0.0088290
18	0.00478	0.0090970
19	0.00486	0.0093580
20	0.00493	0.0096115
21	0.00509	0.0098585
22	0.0052	0.010099
23	0.00531	0.010334
24	0.00541	0.010563
25	0.00551	0.010787
26	0.00561	0.011006
27	0.00571	0.011219
28	0.0057	0.011428
29	0.00584	0.011632
30	0.00599	0.011832

Отметим, что глубина погружения больше при теоретическом решении.

### ***Заключение***

Численное решение задачи оказывается более точным, оно точнее отражает явление, которое мы наблюдаем в реальности. Количество рикошетов увеличивается с увеличением скорости, сообщаемой в начале, и существует более благоприятный диапазон углов броска. Дальнейшее исследование может заключаться в анализе того, в каких мерах момент вращения, сообщаемый камню (спин), повлияет на результаты эксперимента

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Charles F. Babbs, Theoretical Limits of Stone Skipping, 11-30-2017
2. Find numerical solution of ordinary differential equations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fr.maplesoft.com/support/help/maple/view.aspx?path=dsolve%2frkf45>
3. Lydéric Bocquet, «The physics of stone skipping», American Association of Physics Teachers, 16-09-2002. –p.150–151

М. М. МАГАЗЕЙЩИКОВ, Д. О. ШИЛИНКОВ  
Науч. руковод. – канд. техн. наук, проф. О. Б. ДЕМЕНОК

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**Аннотация.** В исследуемой работе приводится влияние развития аддитивных технологий на скорость прохождения этапов НИОКР в машиностроительной области. Проводится обзор изготовления современных SLA-моделей. Рассматриваются технология литья металлов с использованием мастер-моделей.

**Ключевые слова:** Аддитивные технологии; SLA-технология; SLS-технология; пресс-форма; технологическая оснастка.

При разработке и создании новой промышленной продукции особое значение имеет скорость прохождения этапов НИОКР, которая в свою очередь существенно зависит от технологических возможностей опытного производства.

Термин НИОКР расшифровывается как научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Это совокупность экспериментов, теоретических идей, поисков, производства типовых образцов, комплекс мероприятий, направленных на выпуск готового изделия по заданным стандартам.

При создании новой продукции, особенно на этапе ОКР, в опытном производстве, для которого характерны вариантные исследования, необходимость частых изменений конструкции и, как следствие, постоянной коррекции технологической оснастки для изготовления опытных образцов – проблема быстрого изготовления литейных деталей становится ключевой.

Использование аддитивных технологий в литейном производстве позволяет «выращивать» литейные модели и формы, которые невозможно было изготовить традиционными способами, а также значительно сокращает сроки изготовления модельной оснастки. Использование в процессе вакуумного литья форм и моделей, полученных с помощью аддитивных технологий, дало возможность уменьшить время изготовления пилотных, опытных образцов и в ряде случаев серийной продукции – в десятки раз. Например, для изготовления первого опытного образца детали, характерной для автомобильного двигателестроения –

блок цилиндров – традиционными методами требуется не менее шести месяцев, при этом основные временные затраты приходится на создание модельной оснастки для литья «в землю». Использование для этой цели технологии Quick-Cast («выращивание» литейной модели из фотополимера на SLA-машине с последующим литьем по выжигаемой модели), что сокращает срок получения первой отливки до двух недель.

SLS-технология: полистирол широко используется в качестве модельного материала для традиционного литья по выжигаемым моделям. SLS-технология относится к категории Powder Bed Fusion, и заключается в следующем: Модельный материал – полистирольный порошок с размером частиц 50-150 мкм накачивается специальным роликом на рабочую платформу, установленную в герметичной камере с атмосферой инертного газа – азота. Лазерный луч, при помощи сканера, обнаруживает в данном сечении необходимые точки для спекания полистирола. В этом случае лазерный луч является источником тепла (рабочая температура около 120°C). Преимуществом данной технологии является отсутствие поддержек, поскольку во время построения модель и все ее строящиеся слои удерживаются массивом порошка.

При работе с полистирольными моделями выделяются требующие нейтрализации горючие газы: материал частично выгорает в самой форме, в результате чего возникает опасность образования золы и засорения формы, поэтому необходимо предусмотреть возможность стекания материала из застойных зон.

К недостаткам технологии надо отнести следующее. Процесс спекания порошка – это тепловой процесс, характеризующийся неравномерностью распределения тепла по рабочей камере и массиву материала, короблением вследствие температурных деформаций

Литейные модели могут быть получены («выращены») из следующих материалов:

– порошковых полимеров для последующего литья по выжигаемым моделям;

– фотополимерных композиций, в частности, по технологии Quick-Cast для последующего литья по выжигаемым моделям или по технологии MJ (Multi Jet) для литья по выплавляемым моделям.

SLA – лазерная стереолитография. Основой в SLA-процессе является ультрафиолетовый лазер (твердотельный или CO<sub>2</sub>). Лазерный луч в данном случае – не источником тепла, как в SLS-технологии, а источник света. Луч «штрихует» текущее сечение CAD-модели и отверждает тонкий слой жидкого полимера в местах прохождения. Затем платформа, на которой производится построение, погружается в ванну с фотополимером на величину шага построения, и новый жидкий слой наносится на затвердевший слой, и новый контур «обрабатывается» лазером.

Качество поверхности стереолитографических моделей весьма высокое, и часто модель не требует последующей обработки.

Изготовление высокоточных мастер-моделей: синтезированные из фотополимерных композиций модели используются в качестве мастер-моделей для изготовления эластичных форм, посредством которых затем получают восковые литейные модели, либо отливки из литейных полимеров, например, полиуретановых смол. Использование силиконовых форм чрезвычайно эффективно при штучном и малосерийном производстве высокоточных восковок.

Внедрение аддитивных технологий в литейное производство носит масштабный характер. Выращивание моделей упрощает получение высокоточных отливок, что приводит к повышению экономической целесообразности производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов, В.В., Барзали В.В., Ладнов П.В. Перспективы развития аддитивного производства в российской промышленности // Опыт ФГБОУ УГАТУ. Новости материаловедения. Наука и техника. №2 (14). 2015. С. 23-27
2. Григорьев С.Н., Смуров И.Ю. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // Инновации. 2013. Т. 10. С. 2-8.
3. Смирнов В.В., Шайхутдинова Е.Ф. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 2-2. С. 90-94.

УДК 53.06

Н. Д. ОВЧИННИКОВА

*h2018i@yandex.ru*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. Р. Г. ЧЕМБАРИСОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОГО ТОПЛИВА

**Аннотация.** В работе с применением законов термодинамики представлены результаты вычисления количества теплоты, необходимого для образования единицы площади пленок на поверхности экологически чистого биодизельного топлива А-72+75%МЭРМ и топлива А-72, и удельной теплоемкости, приходящейся на единицу их площади. Представлен метод определения этих важных для эффективного сжигания топлива характеристик.

**Ключевые слова:** коэффициента поверхностного натяжения; количество теплоты; удельная теплоемкость; свободная энергия.

На практике жидкое топливо сжигается в распыленном состоянии, что значительно ускоряет его сгорание и позволяет получить высокие тепловые напряжения объемов топочных камер в результате увеличения контактной площади топлива с окислителем. Для эффективного и экономичного сжигания жидкого топлива необходимо увеличивать дисперсность распыляемого топлива. Дисперсность зависит от коэффициента поверхностного натяжения. Чем больше коэффициент поверхностного натяжения, тем более дисперсным будет распыленное топливо.

Известно, что при подводе одного и того же количества теплоты при одинаковых условиях, тело, обладающее меньшей теплоемкостью, будет нагреваться до более высокой температуры, тело, обладающее большей теплоемкостью, нагреется до более низкой температуры. Этот факт необходимо учитывать при оценке степени нагрева различных топлив от внешних источников. Например, корпус самолета будет нагреваться при его сверхзвуковом полете за счет аэродинамического трения. Тогда топливо, имеющее меньшую теплоемкость, нагреется в баке до более высокой температуры. При этом такое топливо, если

оно не будет отличаться повышенной термической стабильностью, будет испытывать более глубокий и ускоренный термохимический распад. Таким образом, теплоемкость определяет термическую стабильность топлив при их нагреве.

Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma(T)$  зависит от температуры  $T$ . Разложим функцию  $\sigma(T)$  в ряд Тейлора и ограничимся первыми двумя членами разложения:

$$\sigma(T) = \sigma(T_0) + \left. \frac{d\sigma}{dT} \right|_{T=T_0} (T - T_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\sigma}{dT^2} \right|_{T=T_0} (T - T_0)^2 + \dots \quad (1)$$

Можно показать, что свободная энергия пленки равна

$$F(T, A) = \sigma(T) \Sigma, \quad (2)$$

где  $\Sigma$  – площадь поверхности пленки. По определению, дифференциал свободной энергии равен

$$dF = -SdT - PdV - \delta A, \quad (3)$$

где  $\delta A$  – элементарная работа. В случае работы, совершаемой силой поверхностного натяжения при увеличении поверхности пленки, его можно записать в виде

$$dF = -SdT + \sigma(T) d\Sigma. \quad (4)$$

Откуда следует, что энтропия пленки равна

$$S(T, \Sigma) = -\Sigma \frac{d\sigma}{dT}. \quad (5)$$

Так как внутренняя энергия, приходящаяся на единицу поверхности, равна

$$\frac{U}{\Sigma} = \sigma - T \frac{d\sigma}{dT}, \text{ то } \frac{d\sigma}{dT} < 0. \text{ Согласно определению энтропии количество тепла,}$$

сообщенного системе, равно

$$\delta Q = TdS = T \left( -\Sigma \frac{d^2\sigma}{dT^2} dT - \frac{d\sigma}{dT} d\Sigma \right). \quad (6)$$

Если поддерживается постоянная температура, то

$$(\delta Q)_T = -T \frac{d\sigma}{dT} (d\Sigma)_T. \quad (7)$$

Чтобы температура была постоянной, необходимо сообщать какое-то количество теплоты  $(\delta Q)_T$ . Если это количество теплоты отнесем к единице площади, получим количество теплоты  $q$ , необходимое для образования единицы площади:

$$q = \frac{(\delta Q)_T}{(d\Sigma)_T} = -T \frac{d\sigma}{dT}. \quad (8)$$

Откуда следует, что

$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{q}{T}. \quad (9)$$

Следовательно, коэффициент при первой степени приращения температуры  $(T - T_0)$  в разложении (1) – первая производная от коэффициента поверхностного натяжения в точке  $T=T_0$ , имеет смысл количества теплоты  $q$ , необходимого для образования единицы площади пленки, отнесенного к температуре  $T_0$ .

Из формулы (6) следует, что количество теплоты, сообщаемое системе при неизменной площади поверхности пленки  $\Sigma$ , равно

$$(\delta Q)_\Sigma = -\Sigma T \frac{d^2\sigma}{dT^2} (dT)_\Sigma. \quad (10)$$

Из равенства (10) следует, что удельная теплоемкость  $c_\Sigma$ , приходящаяся на единицу площади, равна

$$c_\Sigma = \frac{1}{\Sigma} \frac{(\delta Q)_\Sigma}{(dT)_\Sigma} = -T \frac{d^2\sigma}{dT^2}. \quad (11)$$

Откуда следует, что коэффициент при второй степени приращения температуры  $(T - T_0)$  – вторая производная от коэффициента поверхностного натяжения в точке  $T=T_0$ , имеет смысл удельной теплоемкости, приходящейся на единицу площади, отнесенной к температуре  $T_0$ :

$$\left. \frac{d^2\sigma}{dT^2} \right|_{T=T_0} = -\frac{c_\Sigma}{T_0}. \quad (12)$$

Таким образом, коэффициенты в разложении в ряд Тейлора (1), имеет физический смысл.



$$\sigma(T) = \sigma(T_0) - \frac{q}{T_0}(T - T_0) - \frac{1}{2} \frac{c_{\Sigma}}{T_0}(T - T_0)^2. \quad (13)$$

Если известна зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры, то можно найти физические коэффициенты  $q$  и  $c_{\Sigma}$ .

Определим коэффициенты  $q$  и  $c_{\Sigma}$ , воспользовавшись известной зависимостью коэффициента поверхностного натяжения от температуры для бинарного топлива А-72+МЭРМ и топлива А-72 (Рис. 1), полученного к.т.н., доцентом кафедры ДВС НТУ ХПИ Семеновым В. Г. (Харьков, 1999–2009).

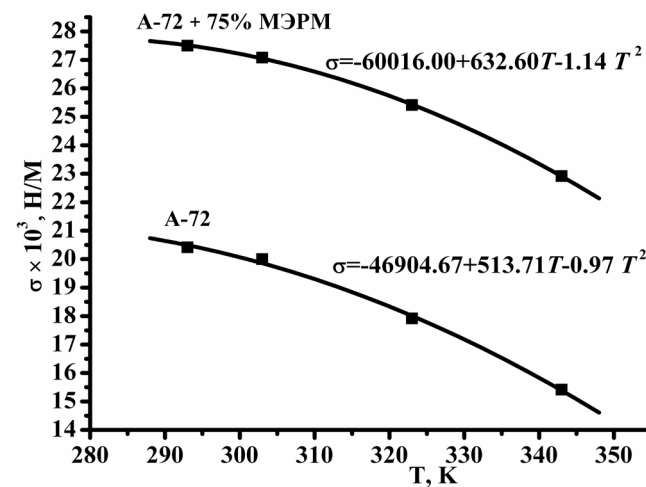


Рис. 1. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры

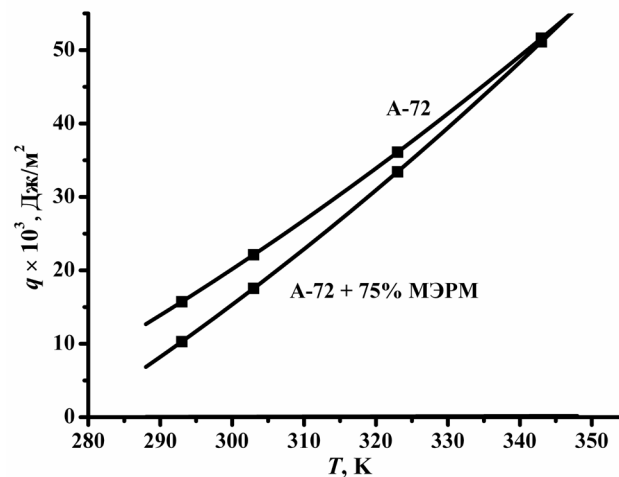


Рис. 2. Зависимость количества теплоты  $q$ , необходимого для образования единицы площади пленки от температуры

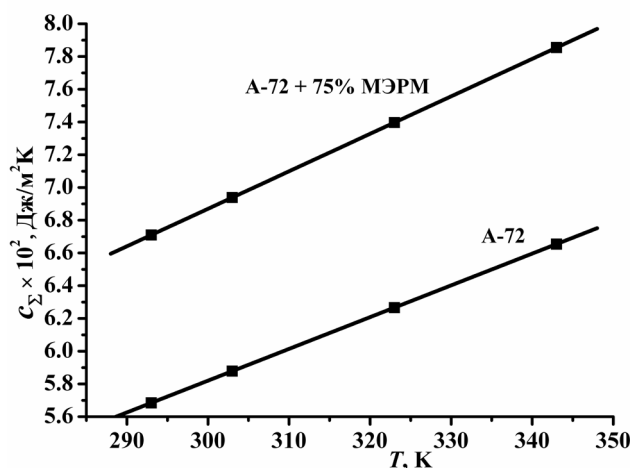


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости, приходящейся на единицу площади пленки  $c_{\Sigma}$  от температуры

Зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры для рассматриваемых видов топлива были аппроксимированы формулами, представленными на рисунке 1. Получены зависимости количества теплоты  $q$  (Рис.2), необходимого для образования единицы площади пленки и удельной теплоемкости, приходящейся на единицу площади пленки  $c_{\Sigma}$  (Рис.3) для бинарного топлива А-72+МЭРМ и топлива А-72. Полученные результаты указывают на явные преимущества топлива А-72+МЭРМ, обладающего более высоким коэффициентом поверхностного натяжения. В случае топлива А-72+МЭРМ требуется меньшее количество энергии для образования единицы поверхности пленки. А удельная теплоемкость, приходящаяся на единицу площади пленки, которая пропорциональна удельной теплоемкости жидкого топлива, оказывается больше такового для топлива А-72. Представленный метод определения термодинамических характеристик может быть использован для анализа качества используемых видов топлива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базаров И. П. Термодинамика: Учебник – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 384 с.

УДК 669:621.785

Т. Б. СУМЫНИНА

*tsumynina@list.ru*

Науч. руковод. – канд. физ.- мат. наук, доц. М. М. АБРАМОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## «ЖИВАЯ» TWIP СТАЛЬ

**Аннотация.** TWIP стали – стали, проявляющие эффект пластичности, наведенной двойникованием (Twinning Induced Plasticity). Эти стали имеют структуру аустенита в холоднокатанных листах. Стали TWIP с идеальным сочетанием прочности и пластичности играют незаменимую роль в повышении безопасности, надежности, экономичности и эффективности конструкционных применений и стали важным направлением выбора материалов для высокопрочных сталей [1]

**Ключевые слова:** аустенитная сталь с пластичностью, наведенной двойникованием; повышенные свойства, микроструктура.

Стали системы Fe-C-Mn были разработаны и внедрены в промышленное производство с высоким содержанием углерода и 11%Mn в 1882 г. английским металлургом Р. Гадфильдом. Он создал литую сталь, сочетающую высокую пластичность со средней прочностью. Литая сталь с классическим составом Fe-1,1%C-13%Mn применяется для износостойких деталей, не требующих размерной стабильности. Причины уникального механического поведения стали Гадфильда во время деформации обусловлено двойникованием, что обеспечивает сильное структурное упрочнение.

Уникальные деформируемые высокомарганцевые стали для автомобилестроения были созданы в начале 2000-х годов компанией Posco. Благодаря сочетанию высокой прочности с высокой пластичностью этих материалов они являются наиболее перспективными материалами для автомобильной промышленности.

Разработки TWIP стали направлены на их промышленное развитие для крупномасштабного использования в автомобильной промышленности, СПГ-судостроении, нефтегазовой промышленности и транспорта. TWIP сталь – это материал со сверхвысокой прочностью для армирования конструкций, превосходящий

ной пластичностью и большой способностью поглощения энергии для улучшения ударопрочности автомобиля. Кроме того, ожидается, что их широкомасштабное использование приведет к снижению массы транспортных средств, снижению выбросов парниковых газов, резкому увеличению пробега газа и повышению безопасности пассажиров.

Химический состав сталей существенно влияет на структуру и свойства сплавов. Данные стали являются аустенитными с большим содержанием марганца, кремния и алюминия. Легирование марганцем стали приводит к искривлению ее кристаллической решетки, что влияет на образование дефекта упаковки и на протекание двойникования. Полученные границы двойников действуют как границы зерен и тем самым упрочняют сталь, а само двойникование приводит к повышению пластичности. Также марганец стабилизирует аустенит. Углерод в ходе получения стали сохраняют на высоком уровне, с целью повышения механических характеристик высокомарганцевых сталей. Углерод улучшает стабильность аустенита и упрочняет сталь. Введение кремния приводит к повышению прочности, по механизму твердорастворного упрочнения, также кремний влияет на замедление роста  $\epsilon$  мартенситных пластин. Добавление небольших количеств бора, титана и циркония улучшает их пластичность при высокой температуре. Азот является эффективным элементом упрочнения и  $\gamma$ -стабилизатором. Добавление церия может улучшить вероятность дефектов упаковки и увеличить долю двойников в стали TWIP. [2]

Низколегированная сталь ( $Mn > 10\%$ ) можно использовать в качестве альтернативного материала для многих видов стали. Стали этого класса в зависимости от природы легирующих элементов и их количества, а также от характера термической обработки могут обладать самыми различными высокоценными свойствами: низким пределом текучести, умеренной прочностью, высокой пластичностью, высокой вязкостью, высоким сопротивлением истиранию, малым коэффициентом теплового расширения, немагнитностью, хорошей коррозионной стойкостью в окислительных средах и другими специальными свойствами.

Высокомарганцевые TWIP-стали с аустенитной матрицей демонстрируют оптимальную комбинацию прочности и пластичности, чрезвычайно высокую по сравнению со сталями, обладающими ферритной матрицей; низколегированными высокопрочными первого поколения (двухфазными, многофазными, мартенситостареющими сталями) и сталями для глубокой вытяжки [3].

Отличные механические свойства сталей TWIP обусловлены высокой способностью к деформационному упрочнению при деформировании, что тесно связано с двойниками деформации, играющими незаменимую роль при пластической деформации. [1]

Одним из главных минусов TWIP стали, ограничивающих применение в производстве, является низкий предел текучести, особенно в сравнении с существующими современными высокопрочными сталями. Методы интенсивной пластической деформации могут быть успешно применены для повышения предела текучести TWIP сталей и данное направление исследований является перспективным и вызывает бурный интерес у научного сообщества

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Cai / Microstructure evolution and fracture behaviour of TWIP steel under dynamic loading / Chunhui Wang, Chaoyang Sun, Lingyun Qian // *Materials Science and Engineering: A*. – 2022 – Vol.851 – 143657.
2. Lingqiang Zhong / Effects of cerium addition on the microstructure, mechanical properties and strain hardening behavior of TWIP steel Fe-18Mn-0.6C / Zhigang Wang, Quanshun Luo, Weizhen Liu // *Materials Characterization* – 2022 – Vol.183 – 111626.
3. T.W.J. Kwok / The relative contributions of TWIP and TRIP to strength in fine grained medium-Mn steels / P.Gong, R.Rose, D.Dye // *Materials Science and Engineering: A* – 2022 – Vol.855 – 143864.

УДК 621.74

Р. Р. СУНАРЧИНА

*reginasunarchina@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. тех. наук, доц. А.О. ДЕМЕНОК

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТЛИВОК ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**Аннотация.** В статье рассмотрен способ производства отливок из магниевых сплавов с помощью цифровых технологий, с использованием 3D-печати. Приведена оптимизация конструкции деталей из литейных магниевых сплавов. Описаны преимущества применения аддитивных технологий при изготовлении отливок из магниевых сплавов

**Ключевые слова:** Магниевые сплавы; 3D-модели; авиационные конструкции; отливка, деталь.

Современное развитие науки и техники позволяет получать детали новыми методами с помощью цифровых технологий (3D-печать форм) для изготовления отливок оптимальной конструкции с высокой точностью размеров и минимальными затратами на последующую механическую обработку, а также со значительным сокращением продолжительности их производства

Известно, что магниевые сплавы – наиболее легкие конструкционные материалы на металлической основе. Поэтому к ним проявляется повышенный интерес как в России, так и в других странах, таких как Германия, Япония, США, Англия, проводится много конференций и существует большое количество патентов. Объясняется это тем, что магний был и остается практически единственным конкурентом конструкционных пластмасс, а также алюминиевых среднепрочных сплавов, обладая перед ними определенными преимуществами (высокие удельные прочность и жесткость, хорошая долговечность, стабильность механических свойств и размеров при длительном хранении вследствие отсутствия склонности к естественному старению).

Оптимизация конструкции деталей из литейных магниевых сплавов включает в себя:

- создание 3D-моделей деталей и сборок;
- анализ прочности существующей конструкции в специализированных прочностных комплексах;

– перепроектирование деталей с учетом новых технологий, позволяющих усложнять конструкцию.

Применение 3D-технологий при проектировании авиационных конструкций и литейной оснастки в сочетании с использованием новых высокопрочных магниевых сплавов ВМЛ18 и ВМЛ20 (взамен применяемых в настоящее время серийных сплавов МЛ5п.ч., АК7п.ч., АК4) позволит:

– сократить сроки подготовки производства с нескольких месяцев до нескольких недель;

– снизить массу отливок более чем в 2 раза благодаря повышению точности литья (снижению шероховатости поверхности, уменьшению толщины стенки отливки вследствие повышения прочности формы);

– сократить объем механической обработки деталей в 1,5–2 раза.

Метод 3D-печати – самый «молодой» и перспективный. Благодаря высокой точности изготовления детали методом трехмерной печати уровень механической обработки снизится до 30% относительно серийной технологии изготовления детали.

Магниевые сплавы вызывают интерес у научного сообщества в связи с аддитивным производством деталей с помощью 3D-печати. Магниевый сплав вследствие его реактивной природы – сложный материал для 3D-печати. Магний окисляется в чистом виде и должен храниться таким образом, чтобы не было воздействия кислорода. В качестве сырья для аддитивного производства используют порошки, жидкие смолы или проволоки. В этом состоянии поверхностная энергия металла увеличивается и возникает более высокий риск взаимодействия с атмосферным кислородом, при котором возможно возгорание металла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаренко Е.С., Алябьев И.П., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Технология получения фасонных отливок из технологического герметичного сплава АЛ4МС //Литейщик России. 2014. №7. С. 12–14.
2. Фролов А.В., Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Влияние технологических параметров плавки на структуру и свойства новых магниевых сплавов //Металлургия машиностроения. 2014. №2. С. 26–29.

УДК 621.74

И. И. ТУЙМУХАМЕТОВ

*Brodaga256@gmail.com*

Науч. руковод. – И. И. ШАЙХУТДИНОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **БЕСФЛЮСОВАЯ ПЛАВКА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**Аннотация.** В статье рассматривается способ бесфлюсовой плавки магниевых сплавов. Описывается плавка сплавов на основе магния в защитных газах. Приведены преимущества бесфлюсовой плавки магниевых сплавов

**Ключевые слова:** Магниевые сплавы; бесфлюсовая плавка; способы литья; печи литейных цехов.

Магниевые сплавы активно взаимодействуют с кислородом, из-за чего на поверхности образуется «рыхлая» оксидная пленка. Она не защищает расплав от дальнейшего окисления. Поэтому обычно используют специальные флюсы, которые защищают расплав от окисления.

Технология бесфлюсовой плавки основана на повышении защитных свойств поверхностных пленок, образующихся на расплаве благодаря внедрению в состав атмосферы печи активных по отношению к магнию газов.

В атмосферу вводится газ, который в несколько раз тяжелее воздуха. Наилучшие результаты достигаются при использовании гексафторида серы ( $SF_6$ ), который представляет собой газ (в 5 раз тяжелее воздуха), без цвета и запаха. Он широко применяется в высоковольтной электротехнике. Используется для погашения дуги при высоковольтном разряде. Также он используется как диэлектрик в качестве основной изоляции для высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения и др. В связи с таким использованием он называется «элегаз»

Благодаря высокой плотности, даже небольшая концентрация осаждается на поверхности расплава, вытесняя воздух. Из-за этого образуется пленка, состоящая из сульфидов и фторидов магния, которая обладает хорошими защитными свойствами.



Для бесфлюсовой плавки магниевых сплавов разрабатывается специальное оборудование, которое представляет собой модифицирование печи путем добавления специального оборудования увеличивающее герметичность в печи и внедрения отверстий для подачи элегаза, а также для выпуска кислорода.

В качестве защитного газа используется смесь из элегаза и осушенного воздуха в соотношении 1:100 или углекислого газа в соотношении 1:15. Расход устанавливается в зависимости от герметичности и объема печи.

Бесфлюсовая плавка может применяться при плавке в тиглях, дуплекс-процессе и при бесфлюсовой разливке в литье под давлением.

Применение бесфлюсовой плавки обеспечивает следующие преимущества:

1. Повышается производительность труда и качество отливок.
2. Уменьшаются потери металла.
3. Исключается флюсовая коррозия отливок.
4. Уменьшается коррозия металлических корпусов печей.

Небольшая добавка флюса ухудшает санитарно-гигиеническую обстановку, а значит вышеописанная технология имеет свои преимущества и в этом.

В газовой среде над расплавом появляется угарный газ и пары фтористого водорода (HF). Его концентрация при бесфлюсовой плавке гораздо ниже чем при плавке под защитными флюсами. Но даже в таком случае это содержание во много раз превышает ПДК, поэтому должно быть хорошее вентилирование околочного пространства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеметев Г.Ф. Производство отливок из сплавов цветных металлов СПбПУ, 2017. с. 106.
2. Туркин В. И., Борисов В. Г., Соколов Е. Г. Некоторые вопросы техники безопасности при работе с новыми магниевыми сплавами. // Сб. Магниевого сплавы. – М.: Наука, 1978. – с. 208-212.

УДК 53.023

Д. А. УРМАНШИНА

31\_24@list.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, проф. М. Т. ХАТМУЛЛИНА

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## ХАОТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Аннотация.** В данной статье предлагается подход к математическому моделированию сложной динамической системы с переменной структурой и размерностью на примере изменения популяции кроликов. Исследуется зависимость количества животных от коэффициента роста. Найден значения коэффициента роста, при которых количество стабилизируются и становятся равным предельному значению. Получены значения, при которых происходит удвоение периода и численность популяции колеблется между двумя значениями. При дальнейшем увеличении коэффициента роста возникают циклы с периодом 8, 16, 32 и т/д. Найден значения коэффициента роста при которых система входит в хаотическое состояние.

**Ключевые слова:** коэффициент роста, период, количество животных, динамическая система, динамический хаос, бифуркация.

Одним из главных и парадоксальных проявлений нелинейности является хаотичность или динамический хаос. Исследование динамического хаоса привело к пересмотру наших взглядов на моделирование явлений природы и на наши возможности давать прогноз. Поведение хаотической динамической системы во времени оказывается, довольно сложным. В некоторых аспектах оно может быть неотличимо от чисто случайного процесса, например, такого как подбрасывание монеты. Получается, что динамическая система объединяет в себе «глобальную устойчивость» с локальной неустойчивостью – малые погрешности начальных данных нарастают, близкие траектории расходятся. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений имеет дело с поведением на конечном временном интервале. Конечность временного интервала позволяет доказывать многие теоремы и строить вычислительные алгоритмы. Нелинейная динамика интересуется асимптотическим поведением системы, когда время стремится к бесконечности. После того, как возможность подобной ситуации была осознана, началась тихая революция во взглядах на «случайное» и «детерминированное», возникли термины «динамический хаос», «странный аттрактор».

Оказалось, что хаотическое поведение может наблюдаться в весьма простых системах, таких как система трех обыкновенных дифференциальных уравнений [1, 2].

Допустим, нам нужно смоделировать некоторую динамическую систему, например, изменения популяции кроликов. В этом году  $X$  - количество животных, сколько будет в следующем? Чтобы это узнать мы должны:  $r * X$ , где  $r$  - коэффициент роста. Но такое уравнение не соответствует реальности, потому что тогда популяция будет только расти, поэтому добавим сомножитель  $(1 - X)$  который отразит ограничения окружающей среды, получим следующее уравнение:

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n) \quad (1)$$

Если составим график зависимости количества животных в следующем году от количества животных в этом году, то получим обычную перевернутую параболу.

1. Будем исследовать, как зависит количество животных  $X$  от коэффициента роста  $r$ . Пусть начальная популяция 50% от максимума или  $X = 0,5$ . Вычислим результаты для  $r=1,5; 2,0; 2,5$  при  $n=0, 1, 2, 3 \dots 199, 200$  (Рис.1)

n	r=1,5	r=2,0	r=2,5
0	0.5000	0.5000	0.5000
1	0.3750	0.5000	0.6250
2	0.3516	0.5000	0.5859
...			
197	0.3333	0.5000	0.6000
198	0.3333	0.5000	0.6000
199	0.3333	0.5000	0.6000
200	0.3333	0.5000	0.6000

Рис. 1. Зависимость  $X$  от  $r$  для  $r=1,5; 2,0; 2,5$

Анализ модели (Рис.1) показывает, что для  $r=1,5; 2,0; 2,5$  с ростом  $n$  (т.е. с годами) значения  $X$  стабилизируются и становятся практически равным предельному значению. Причем для приведенных значений  $r$  величина  $X$  соответственно равна  $X=0,3333; 0,5000; 0,6000$ . Популяция остается неизменной благодаря балансу рождаемости и смертности. В итоге результат сходится к одной и

той же точке равновесия. При этом начальное количество животных  $X$  не играет роли [3].

2. Увеличим коэффициент роста  $r=3,1; 3,25; 3,5$  и число  $n=1008$ :

n	r=3,1	r=3,25	r=3,5
0	0.5000	0.5000	0.5000
1	0.7750	0.8125	0.8750
2	0.5406	0.4951	0.3828
3	0.7699	0.8124	0.8269
1000	0.5580	0.4953	0.5009
1001	0.7646	0.8124	0.8750
1002	0.5580	0.4953	0.3828
1003	0.7646	0.8124	0.8269
1004	0.5580	0.4953	0.5009
1005	0.7646	0.8124	0.8750
1006	0.5580	0.4953	0.3828
1007	0.7646	0.8124	0.8269

Рис. 2. Зависимость  $X$  от  $n$  для  $r= 3,1;3,25;3,5$

Как следует из приведенных данных (Рис.2) вместо того, чтобы стабилизироваться возле предельной численности популяции, дробная часть численности колеблется между двумя дробями по мере изменения времени. По сравнению с  $r=3,1$ , период цикла для  $r=3,25$  увеличивается в 2 раза, а для  $r=3,5$  в 4 раза. Полученный результат – удвоение периода представим для наглядности на графике (Рис.3):

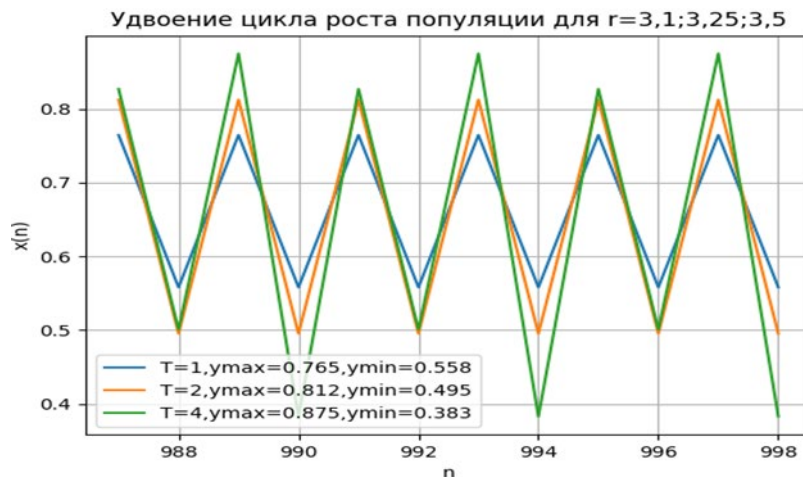


Рис. 3. Удвоение роста цикла популяции для  $r=3,1; 3,25 ;3,5$

3. Благодаря удвоению периода уравнение (1) стало широко известным. Когда значение скорости роста превосходит  $r=3,56$ , удвоение периода ускоряется и уже в точке  $r=3,57$  возникает чрезвычайный хаос (Рис. 4):

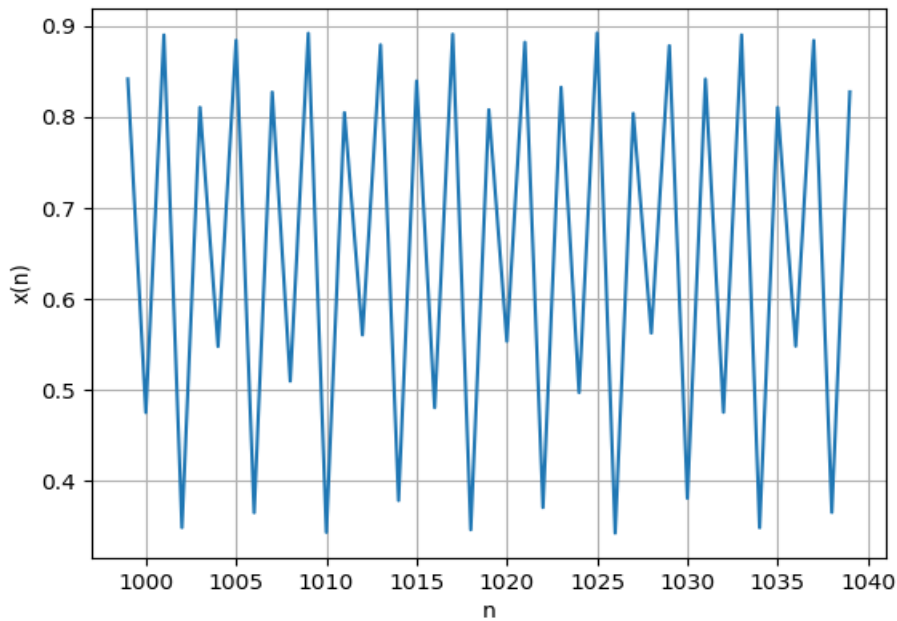


Рис. 4. Не детерминированный хаос для  $r=3,57$

4. Рассмотрим график визуализации зависимости поведения  $n$  от параметра роста  $r$  (Рис.3). Для каждого значения  $r$  в интервале  $\alpha \leq r \leq \beta$  выполняется 1000 итераций  $n$  для достижения устойчивости. Затем, каждые 250 значений, полученных в результате итераций, наносятся на график по вертикальной оси, образуя точки  $(r, x)$  (Рис.5):

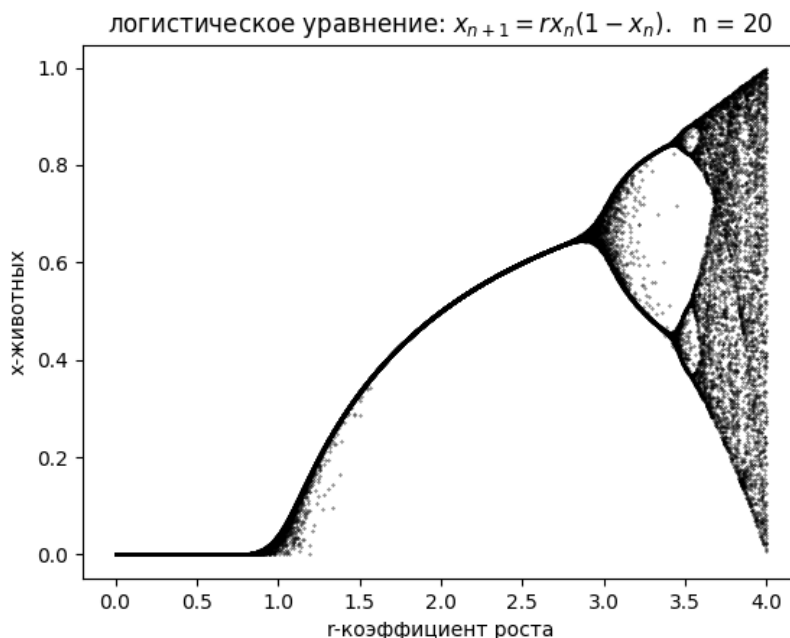


Рис. 5. Диаграмма ветвления

Полученный график (Рис.5) называется “диаграммой ветвления”, которая позволяет определить, чему соответствует данное значение коэффициент роста  $r$  – циклу или хаосу.

Для  $r$  меньше единицы, любая популяция вымирает в стационарное значение ноль. Стоит коэффициенту пересечь единицу, популяция растет, пока не достигнет равновесного значения и чем выше, тем оно будет больше. Какое-то время все стабильно, а потом начинается кое-что любопытное: при  $r$  больше трех график делится на два. Почему? Что происходит? Сколько бы мы не прогоняли это уравнение, мы никогда не вернемся к одному стабильному ответу. Численность популяции продолжит колебаться между двумя значениями. Такая цикличность в количестве особей наблюдается и в дикой природе [4]. Амплитуда и период этих колебаний зависят от вида и от условий среды обитания. Различают непериодические (нерегулярные, хаотические) и периодические (регулярные, циклические) колебания численности популяций. К непериодическим колебаниям численности, а соответственно и плотности популяции, относятся вспышки массового размножения непарного шелкопряда (*Operia dispar*) в южной и юго-восточной частях России в 1879 году, рыжего соснового пилильщика (*Neodiprion sertifer*) в Ленинградской и Смоленской областях, в Белоруссии с 1958 по 1962 годы. Резкий подъем численности наблюдается у популяций, оказавшихся на новом местообитании. Например, массовое размножение кроликов и разрастание зарослей кактуса опунции в Австралии, колорадского картофельного жука (*Leptinotarsa decemlineata*) и чайки обыкновенной (*Larus ridibundus*) в последние годы в Смоленской области [5].

С увеличением коэффициент роста  $r$  стационарные значения будут расходиться все дальше, а затем снова разделяться. Теперь цикл состоит уже не из 2-х чередующихся значений, а из 4-х. Длина цикла или период удваивается - это называется бифуркацией удвоения периода.  $r$  продолжает расти, и подобные бифуркации происходят снова и снова, все быстрее и быстрее, создавая циклы с

периодом 8, 16, 32 и т/д, а когда  $r$  доходит до 3.57 – хаос. Стационарного состояния как будто не существует. Логично было бы предположить, что случайными будут и все последующие значения. Но если  $r$  продолжит расти, периодически посреди хаоса возникают небольшие периоды стабильности.

Таким образом, это несложное уравнение внезапно находит применение во многих несвязанных друг с другом областях науки. Например, ученые, которые исследовали реакцию глаз человека на мерцающий свет также столкнулись феноменом удвоения периода, начиная с определенной частоты мелькания, наш глаз начинает реагировать только на каждую вторую вспышку. (т.е. мы наблюдаем удвоение периода). Еще в одном исследовании, ученые специально вызывали у кроликов в фибрилляцию сердца. Результаты показали, что перед началом фибрилляции сердечный ритм проходит через уже знакомые нам стадии удвоения, а потом становится хаотичным. Сначала пульс был ровным, потом начинался цикл с периодом 2, затем с периодом 4, четыре ритмичных удара, потом повтор, а затем наступала полная аритмия. В этом случае исследователи следили за сердцебиением в реальном времени, а с помощью теории хаоса пытались рассчитать, когда именно стоит применять электрические разряды, чтобы вернуть пульс в прежний ритм. И им это удалось. Так, сначала они сбивали сердечный ритм с помощью хаоса, а затем искали способ наиболее эффективно использовать дефибриллятор, чтобы привести пульс в норму [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мун Ф. Хаотические колебания // М.: Мир, 1990. - 312 с.
2. <https://www.nkj.ru/archive/articles/5901/> (Наука и жизнь, ХАОС, ФРАКТАЛЫ И ИНФОРМАЦИЯ) // Дата обращения 18.06. 2022 г.
3. Гулд Х., Табачник Я. Компьютерное моделирование в физике часть 1// Издательство «Мир». 1990. С, 350- 400
4. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории// М., 2000. 352 с.
5. [https://studopedia.ru/17\\_131990\\_dinamika-populyatsii.html](https://studopedia.ru/17_131990_dinamika-populyatsii.html)// Дата обращения 11.06. 2022 г.
6. Одум Ю. П. 'Экология: В 2-х томах. Том 2'/Пер. с англ. - Москва: Мир, 1986 - с.376

Ю. А. ХАРЛАМОВА

*harlaaamovau@gmail.com*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. С. А. МОИСЕЕВ

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева–КАИ*

## **НЕАДИАБАТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ НА ОДИНОЧНОМ АТОМЕ В РЕЗОНАТОРЕ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

*Аннотация.* Теоретически разработан протокол быстрой квантовой памяти в резонаторе, содержащем одиночный атом. Найден диапазон параметров для реализации данного протокола квантовой памяти экспериментально с высокой эффективностью.

*Ключевые слова:* квантовая память; одиночный атом; резонатор.

Квантовая память (КП) является одним из важнейших элементов создаваемых устройств, необходимых для выполнения ряда базовых операций квантовой информатики [1, 2]. Одной из перспективных схем КП является система, включающая трехуровневый атом, помещенный в высокодобротный резонатор, соединенный с внешним волноводом [3-5]. Такая квантовая система обеспечивает высокоточный контроль и динамическое управление квантовым состоянием отдельного атома и его взаимодействия с сигнальным излучением - одиночным фотоном. В случае сопоставимых по величине постоянных взаимодействия атома с фотоном в резонаторе и моды резонатора с внешним волноводом можно достичь максимально возможной скорости выполнения операций с однофотонными полями в такой схеме КП. Преимущество быстрой КП проявляется в более сильном подавлении нежелательных эффектов декогеренции в атоме и резонаторе. В настоящее время достигнутая эффективность быстрой КП на атоме в резонаторе не превышает 63% при слабой атомной релаксации и минимальных потерях в резонаторе [6]. Достижение более высокой эффективности в работе быстрой КП остается актуальной проблемой. В настоящей работе показывается возможность достижения эффективности быстрой КП 99,8% при выборе определенных оптимальных параметров взаимодействия.

### ***Принципиальная схема и основные уравнения***

Интегрально-волноводная схема предлагаемой КП изображена на рис.1. Однофотонный волновой пакет, имеющий амплитуду  $a_{in}(t)$  передается через волновод в высокодобротный резонатор, который настроен на частоту оптиче-



ского перехода  $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$  атома  $\omega_{31}$ , данная частота совпадает с несущей частотой фотонного волнового пакета. Трехуровневый атом также связан с долгоживущим метастабильным уровнем  $|2\rangle$  посредством взаимодействия с контролирующим лазерным полем, частота которого совпадает с частотой  $\omega_{32}$  резонансного атомного перехода  $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$  и отстроена от частоты резонатора. В таком случае контролирующее поле может проходить из волновода через резонатор, не испытывая отражения [7].

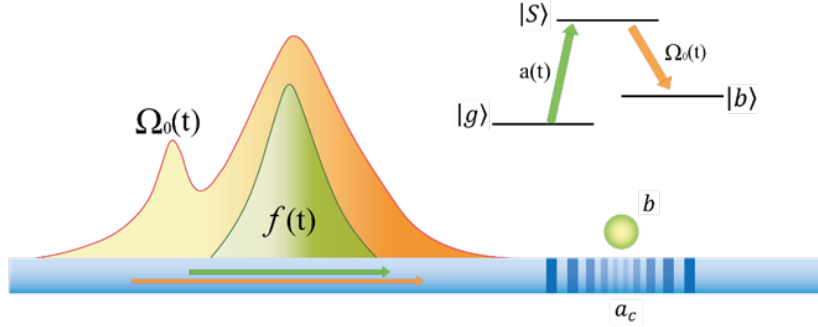


Рис. 1. Принципиальная схема протокола быстрой квантовой памяти: управляющее поле  $\Omega_0(t)$  и фотонный волновой пакет  $f(t)$  распространяются по волноводу и взаимодействуют с атомом и модой резонатора  $a_c$ . Управляющее поле  $\Omega_0$  обеспечивает перевод оптического возбуждения атома на его долгоживущее состояние  $|b\rangle \equiv |2\rangle$ . На вставке показаны атомные состояния и квантовые переходы

Неадиабатическое взаимодействие фотона с атомом в высокочастотном резонаторе описывается Гамильтонианом:

$$H = H_a + H_c + H_f + V_{a\Omega} + V_{ac} + V_{fc}, \quad (1)$$

где  $H_a = \sum_{m=2}^3 \hbar \omega_{m1} \hat{P}_{mm}$  – Гамильтониан трехуровневого атома ( $\omega_{m1}$  – частота атомного перехода  $|1\rangle \leftrightarrow |m\rangle$ ),  $H_c = \hbar \omega_c \hat{a}_c^\dagger \hat{a}_c$  – Гамильтониан моды резонатора ( $\omega_c$  – частота резонатора),  $H_f = \int_0^\infty df \hbar \omega \hat{a}_f^\dagger \hat{a}_f$  – Гамильтониан мод волновода,  $V_{a\Omega} = \hbar \{ \Omega_0(t) \hat{P}_{32} e^{i[\omega_\Omega t + \varphi(t)]} + h.c. \}$  – Гамильтониан взаимодействия атома с контролирующим лазерным полем, характеризующимся частотой Раби  $\Omega_0(t)$  и фазой  $\varphi(t)$  поля, связывающего атомные состояния  $|2\rangle$  и  $|3\rangle$ ,  $V_{ac} = \hbar g (\hat{a}_c \hat{P}_{31} + \hat{a}_c^\dagger \hat{P}_{13})$  – Гамильтониан взаимодействия атома и резонатора ( $g$  – константа связи взаимодействий атом-мода резонатора) и  $V_{fc} = \hbar \int_0^\infty df (g_{cf} \hat{a}_f^\dagger \hat{a}_c + h.c.)$  – Гамильтониан связи между модой резонатора и волноводными модами, где  $g_{cf}$  – константа взаимодействия моды резонатора и волноводной моды. Поведение исследуемой квантовой системы описывается волновой функцией:

$$|\psi(t)\rangle = \left\{ a_c(t)\hat{a}_c^+ + b(t)\hat{P}_{21} + S(t)\hat{P}_{31} + \int d\omega f_\omega(t)\hat{a}_\omega^+ \right\} |1\rangle \otimes |\emptyset\rangle \quad (2)$$

Учитывая, что однофотонный волновой пакет передается через волновод в высокодобротный резонатор, содержащий трехуровневый атом, который первоначально находится в основном состоянии  $|1\rangle$  (рис.1) так, что  $\int d\omega |f_\omega(t \rightarrow -\infty)|^2 = 1$  с начальными амплитудами  $a_c(t \rightarrow -\infty) = S(t \rightarrow -\infty) = b(t \rightarrow -\infty) = 0$ . Используя волновую функцию (2) в уравнении Шредингера с Гамильтонианом (1), получаем уравнения, переходя к медленно меняющимся амплитудам:

$$\frac{d}{dt}S = -(i\Delta_s + \gamma_s)S - i\Omega_0(t)e^{-i\varphi(t)}b - ig a_c, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}b = -(i\Delta_b + \gamma_b)b - i\Omega_0(t)e^{i\varphi(t)}S, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}a_c = -\left(i\Delta_c + \frac{\kappa}{2}\right)a_c - igS + \sqrt{\kappa}a_{in}, \quad (5)$$

где:  $a_c = a_c(t)e^{i\omega_l t}$ ,  $S = S(t)e^{i\omega_l t}$ ,  $b = b(t)e^{i(\omega_\Omega - \omega_l)t}$ ,  $a_{in} = a_{in}(t)e^{i\omega_l t} = -i\frac{g_{cw}}{\sqrt{\kappa}}e^{i\omega_l t} \int d\omega f_\omega(t_0) e^{i\omega(t-t_0)}$ ,  $\int dt a_{in}(t)a_{in}^*(t) = 1$ ,  $\kappa = 2\pi|g_{cw}|^2$ ,  $\Delta_s = \omega_{31} - \omega_l$ ,  $\Delta_b = (\omega_{21} + \omega_\Omega - \omega_l)$ ,  $\Delta_c = \omega_c - \omega_l$ ,  $\Omega_0(t)$  – частота Раби,  $\varphi(t)$  – фаза управления лазерным полем, связывающим атомные состояния  $|2\rangle$  и  $|3\rangle$ , для более общего анализа также вводятся феноменологические константы затухания атомных состояний  $\gamma_s, \gamma_b$  и затухание моды резонатора  $\kappa_{loss}$ .

Временную форму входного волнового пакета фотона зададим в виде гауссового пакета:  $a_{in}(t) = \sqrt{\frac{\Delta_f}{\sqrt{\pi}}} e^{-\frac{(\Delta_f t)^2}{2}}$ , где  $\Delta_f$  – спектральная ширина). При решении дифференциального уравнения первого порядка для частоты Раби  $\Omega_0(t)$ , полученного из системы уравнений (3)-(5) для случая пренебрежимо слабой релаксации  $\gamma_{s,b}t \ll 1$  и точных резонансов  $\Delta_{s,b,c} = 0$  находим решения для частоты Раби и населенности долгоживущего уровня в условия отсутствия отражения фотона от резонатора:

$$\Omega_0(t) = \frac{2g^2 + \Delta_f^2(-2 + \kappa t + 2\Delta_f^2 t^2)}{\sqrt{c(1 + \text{Erf}(\Delta_f t))e^{\Delta_f^2 t^2} - 4g^2 - (\kappa + 2\Delta_f^2 t)^2}}, \quad (6)$$

$$|b(t)|^2 = \frac{(2g^2 a_c(t) + \kappa a_c'(t) - 2\sqrt{\kappa} a_{in}'(t) + 2a_c''(t))^2}{4g^2 \Omega_0^2(t)}, \quad (7)$$

где  $c = 2\sqrt{\pi}g^2\kappa/\Delta_f$  определяется из начального условия  $|b(-\infty)|^2 = 0$ .

Решение (7) с учетом  $|S(t \rightarrow \infty)|^2 \rightarrow 0, |a_c(t \rightarrow \infty)|^2 \rightarrow 0$  дает следующее выражение для вероятности сохранения фотонного пакета в резонаторе с атомом:

$$P_{a+c}(\Delta_f, t) = |b(t)|^2 + |S(t)|^2 + |a_c(t)|^2 = \frac{1}{2} \left( 1 + \text{Erf}(\Delta_f t) \right) \quad (8)$$

Также находим, что  $|S(t \rightarrow \infty)|^2 + |a_c(t \rightarrow \infty)|^2 \rightarrow 0$ , в результате чего получаем  $|b(t \rightarrow \infty)|^2 \rightarrow 1$ , что означает эффективный перенос фотона на долгоживущее атомное состояние  $|2\rangle$  по окончании взаимодействия.

### **Оптимальные параметры**

Решения (6) и (7) остаются пока формальными, поскольку получены при наложении дополнительного условия - отсутствия отражения фотона от резонатора. Это условие справедливо лишь при определенном выборе параметров взаимодействия  $\kappa, g, \Delta_f$ . Рассмотрим область оптимальных параметров для экспериментально реализованных значений постоянных  $g, \kappa = 2\pi \times (4.9, 2.42)$  МГц [6, 8]. Согласно работе [6] можно ввести условие неадиабатичности в сохранении сигнального импульса с Гауссова спектра шириной:  $\Delta_f = \frac{g^2}{\kappa} X$ , где  $X \ll 1$ . На рис. 2а представлена карта возможных значений для  $\Delta_f$  при  $g, \kappa = 2\pi \times (4.9, 2.42)$  МГц. Из численного анализа значений  $\Delta_f$ , представленного на рис. 2а, можно увидеть, что возможность реализации эффективного переноса сигнального фотона на атомные состояния возможна при условии  $\Delta_f \approx 0.1g$  (в ед.  $g = 1$ ). При этом условии  $X = 14.4$ , что соответствует возможности высокоэффективной КП лишь в адиабатическом режиме взаимодействия с Гауссовым однофотонным волновым пакетом.

Поскольку нас интересует неадиабатический режим сохранения импульса, мы находим параметры, при которых такой режим также может быть реализован. На рис. 2б представлена карта возможных значений параметров  $\kappa, \Delta_f$  для неадиабатического режима при  $X = 0.57g$ . Оптимальным для неадиабатического сохранения в данном случае является  $\kappa > 2\pi \times 2.42$  МГц ( $0.49g$ ).

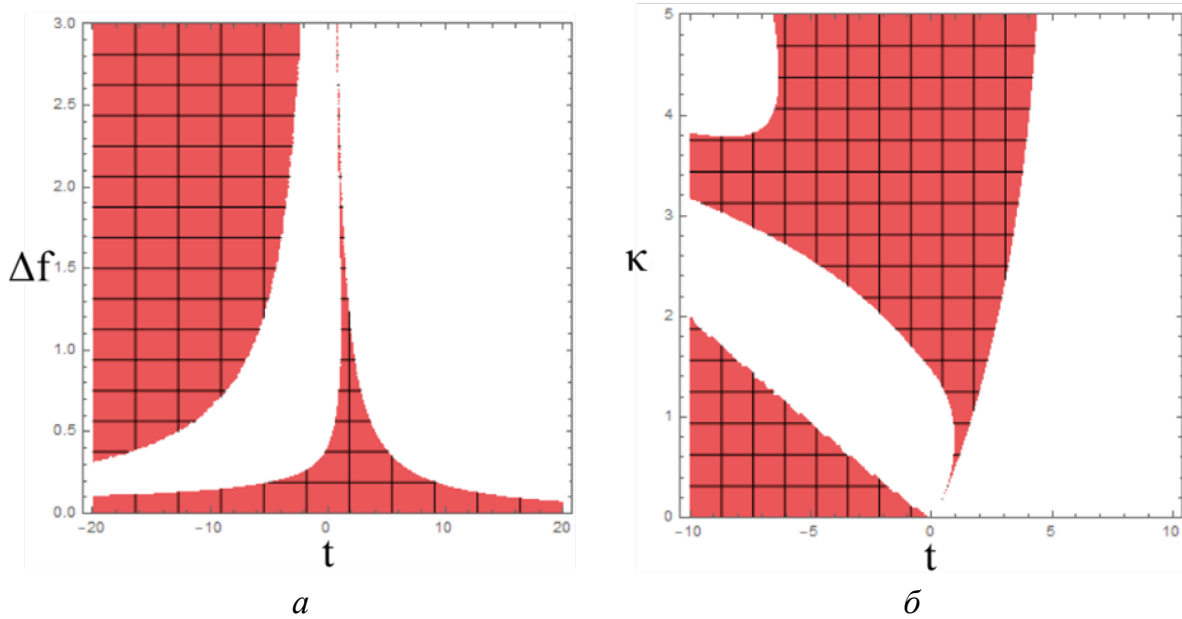


Рис. 2. *a* – Возможная область значений  $\Delta_f$  для  $\kappa = 0.49g$  обозначена красным цветом; *б* – Область параметров  $\kappa$  для неадиабатического режима при  $X = 0.57g$

Мы ограничиваем рассмотрение значениями  $\kappa \sim 2.4g - 2.6g$  ( $g = 1$ ), поскольку чем больше  $\kappa$ , тем режим ближе к адиабатическому. Исходя из  $X = 0.57g$  при  $\kappa = 2.5g$  ширина  $\Delta_f = 0.49g$ . На рис.3 представлены результаты расчета временного поведения вероятностей нахождения атомами на различных состояниях и возбуждение моды резонатора при этих параметрах. Как видно из рис. 3, эффективность сохранения фотона на долгоживущем состоянии составляет 99.8%.

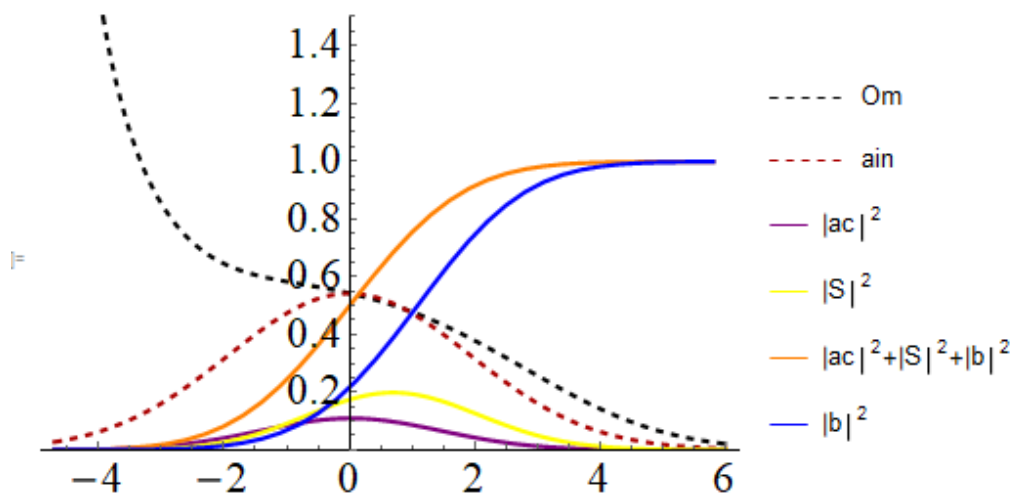


Рис. 3. Поведение системы. Черная пунктирная линия – контролирующее лазерное поле  $\Omega_0(t)$ , красная пунктирная линия – входной импульс  $a_{in}(t)$ , фиолетовая линия –  $|a_c(t)|^2$ , желтая линия –  $|S(t)|^2$ , синяя линия –  $|b(t)|^2$ , оранжевая линия –  $|a_c(t)|^2 + |S(t)|^2 + |b(t)|^2$ . Эффективность сохранения импульса составляет 99.8%. Параметры  $\kappa = 2.5g, \Delta_f = 0.49g, X = 0.57g$ . Временной интервал  $t \in [-4.7, 6]$

## *Заключение*

Для предложенного протокола быстрой квантовой памяти, работающей в неадиабатическом режиме показана возможность выбора оптимальных параметров, позволяющих достижения высокой эффективности сохранения фотона на долгоживущий атомный уровень. При выборе оптимальных параметров эффективность сохранения составляет 99.8%, что превышает теоретически достигнутой на данный момент эффективности сохранения импульса в неадиабатическом режиме 63%[6].

*Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России Рег. номер НИОКТР 121020400113-1.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Reiserer and G. Rempe / Cavity-based quantum networks with single atoms and optical photons // *Rev. Mod. Phys.* 2015. V. 87. P.1379.
2. D. E. Chang, J. S. Douglas, A. González-Tudela, et al. / Colloquium: Quantum matter built from nanoscopic lattices of atoms and photons // *Rev. Mod. Phys.* 2018. V.90. P.031002.
3. M. K. Bhaskar, R. Riedinger, B. Machielse, et al. / Experimental demonstration of memory-enhanced quantum communication // *Nature*. 2020. V.580. P.60.
4. S. Langenfeld, O. Morin, M. Körber, et al. / A network-ready random-access qubits memory // *NPJ Quantum Inf.* 2020. V.6. P.86.
5. J. D. Thompson, G. Tiecken, et al. / Coupling a Single Trapped Atom to a Nanoscale Optical Cavity // *Science*. 2013. V.340. P.1202-1205.
6. L. Giannelli, T. Schmit, T. Calarco et al. / Optimal storage of a single photon by a single intracavity atom // *New J. Phys.* 2018. V. 20. P.105009.
7. M. Li, H. Liang, R. Luo, et al. / Photon-level tuning of photonic nanocavities // *Optica* 2019. V. 6. P.860.
8. Körber M., Morin O., Langenfeld S., et al. / Decoherence-protected memory for a single-photon qubit // *Nat. Photon.* 2018. V.12. P.18–21.

УДК 669.35; 539.25

Э. И. ЭМИРАЛИЕВА, Е. А. САРКЕЕВА

*emiraliyeva31@mail.ru*

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук, проф. И. В. АЛЕКСАНДРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ПОВЫШЕННЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА CU-0,5CR, ПОДВЕРГНУТОГО РКУП, ПРОКАТКЕ И СТАРЕНИЮ**

**Аннотация.** Изделия из хромовых бронз получили широкое распространение благодаря оптимальному сочетанию физических, механических и эксплуатационных свойств после термической и термомеханической обработки. Данная работа посвящена исследованию свойств сплава Cu-0,5Cr (вес.%) подвергнутого равноканальному угловому прессованию и последующей плоской прокатке. Показано, что в результате комплексной обработки предел прочности увеличился в 3,3 раза по сравнению с исходным состоянием. Последующая термообработка привела к восстановлению электропроводности до 70%IACS.

**Ключевые слова:** хромовые бронзы; прочность; электропроводность; интенсивная пластическая деформация.

Хромовые бронзы обладают высокой прочностью, электро- и теплопроводностью, что делает их востребованными во многих сферах промышленности. Данные бронзы являются дисперсионно–твердеющими сплавами и характеризуются сочетанием более высоких физических, механических и эксплуатационных свойств после термической и термомеханической обработки по сравнению с чистой медью. Термическая обработка (ТО) включает закалку, фиксирующую пересыщенный твердый раствор, и старение, в результате которого происходит распад с выделением частиц фаз упрочнителя. Термомеханическая (ТМО) обработка включает холодную пластическую деформацию (между закалкой и старением), которая влияет на формирование структуры при старении, изменяя кинетику распада твердого раствора. Следует отметить, что прочностные свойства у бронз, подвергшихся ТМО, существенно выше, нежели у бронз, подвергавшихся старению без предшествующей деформации [1-3].

Таким образом роль пластической деформации в формировании свойств медных бронз велика.

В последние три десятилетия внимание ученых привлекли ультрамелкозернистые (УМЗ) и наноструктурные (НС) материалы, получаемые методами интенсивной пластической деформации (ИПД) и характеризующиеся повышенными многофункциональными свойствами [4-7]. В частности, в работах [5, 7-9], посвященных ИПД хромовых бронз показано, что формирование УМЗ состояний приводит к существенному повышению прочностных свойств. При этом последующее старение позволяет достичь высокой электропроводности и при сохранении прочности.

Установлено, что в сплаве Cu-0,7Cr (вес.%) применение ИПД кручением позволяет достичь микротвердости в 2 раза большей по сравнению с микротвердостью исходного закаленного состояния [8]. В работе [9] авторы сообщили о достижении прочности 460 МПа и 484 МПа в сплаве Cu-0,5Cr после 4 и 8 проходов ИПД равноканальным угловым прессованием (РКУП), соответственно.

В целях дальнейшего коммерческого использования УМЗ материалов, например, для производства коллекторных пластин, необходимо дальнейшее формообразование прутков, полученных при РКУП, для придания им формы листов и лент. Плоская прокатка является одним из основных промышленных методов формирования листовых заготовок.

В связи с вышесказанным целью данной работы являлось исследовать влияние плоской прокатки на эволюцию микроструктуры и прочности в сплаве Cu-0,5Cr (вес.%) с УМЗ структурой, сформированной в результате РКУП.

С целью формирования пресыщенного твердого раствора заготовки сплава были подвергнуты высокотемпературной обработке при 1000°C в течение 30 мин с последующей закалкой в 5% -ном растворе NaCl. Данное состояние было принято за исходное состояние (ИС). ИС (рисунок 1) характеризуется крупнозернистой, равноосной микроструктурой со средним размером зерна  $260 \pm 25$  мкм. В микроструктуре наблюдается большое количество двойников отжига и частиц второй фазы, которые располагаются не однородно, как в теле, так и по границам зерен. Размер крупных частиц составляет  $5 \pm 1$  мкм.

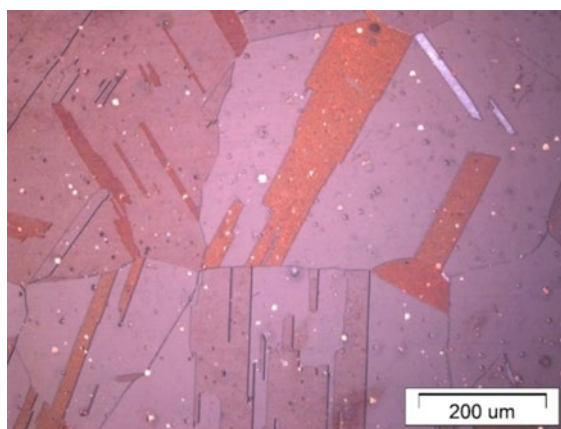


Рис. 1. Микроструктура сплава в исходном состоянии. Оптическая микроскопия.

Согласно диаграмме состояния, растворимость хрома в меди при  $1000^{\circ}\text{C}$  составляет 0,4 вес. % [1], поэтому наблюдаемые частицы – это практически чистый хром, не растворившийся в процессе закалки. Данные результаты подтверждаются информацией, приведенной в работах [10, 11].

РКУП проводили по стандартной методике [10, 12] при комнатной температуре по маршруту  $V_c$  (после каждого прохода заготовка поворачивалась вокруг своей продольной оси на угол  $90^{\circ}$ ) со скоростью 0,2 мм/с, с внутренним углом пересечения каналов  $90^{\circ}$ . Число циклов РКУП равнялось четырем, что соответствовало степени истинной деформации  $\epsilon_N = 4,6$ . Прокатка проводилась при комнатной температуре со степенями обжатия от 40 до 90%. За один проход уменьшение толщины составляло не более 10%.

Старение проводили на воздухе в печи СУОЛ 45 при температуре  $425^{\circ}\text{C}$  в течение 40 минут.

Для исследования микроструктуры использовали оптический микроскоп (ОМ) OLIMPUS GX51.

Испытания на одноосное растяжение проводили на установке для растяжения малых образцов Instron 8801 при комнатной температуре со скоростью  $10^{-3} \text{ c}^{-1}$ . Исследования электропроводности проводили при температуре  $T=23^{\circ}\text{C}$  вихретоковым методом с погрешностью измерений  $\pm 2\%$ .

В исходном состоянии предел прочности составил 160 МПа, относительное удлинение 42%, что характерно для крупнозернистого состояния [13]. В результате проведения РКУП предел прочности резко возрастает до  $420 \pm 5$  МПа. Последующая плоская прокатка со степенью обжатия 40% не приводит к изменению



предела прочности и составила  $425 \pm 5$  МПа. Последующее увеличение степени обжатия при плоской прокатке приводит к небольшому росту прочности и после РКУП4+ХП90% составила  $510 \pm 8$  МПа (рис. 2). Увеличение предела прочности связано с ростом зернограницного и дислокационного вкладов [7-9, 13]

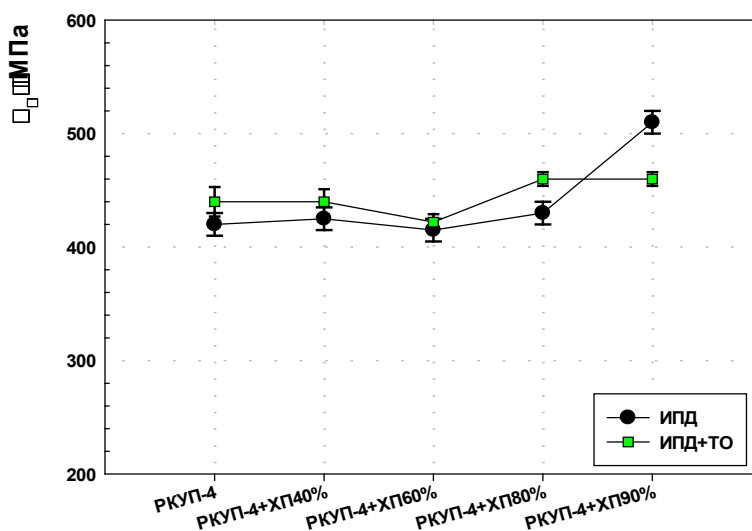


Рис. 2. График зависимости предела прочности в различных состояниях

РКУП приводит к значительному снижению пластичности с 42% до 16%. При смене режима деформации с РКУП на прокатку пластичность уменьшается до 12% при РКУП4+ХП60%, однако после РКУП4+ХП90% восстанавливается до 17% (рис. 3), что может быть связано с формированием текстуры в процессе прокатки [14].

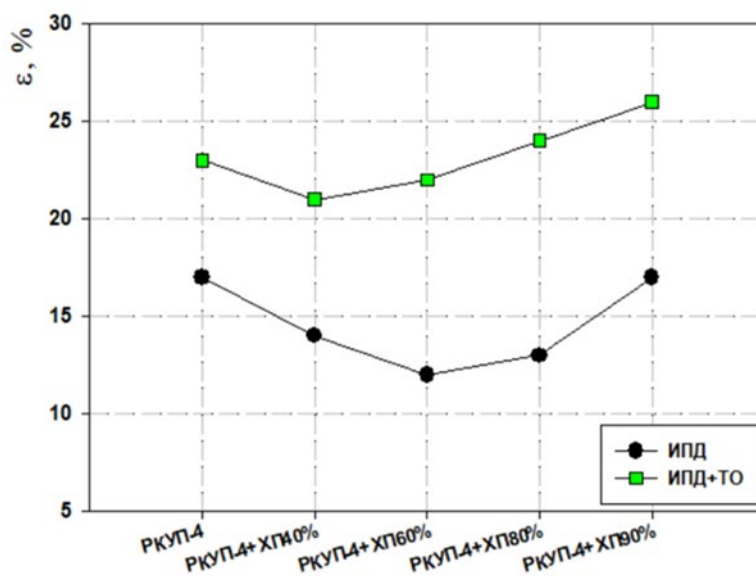


Рис. 3. График зависимости относительного удлинения в различных состояниях

В процессе старения как правило параллельно протекают два конкурирующих процесса. С одной стороны это процессы возврата структуры, приводящие к уменьшению прочностных характеристик. С другой стороны – распад пересыщенного твердого раствора, приводящий к дисперсионному упрочнению и росту прочностных характеристик [13]. Как видно из рисунка 6 старение не приводит к значительному увеличению предела прочности, а в случае после РКУП4+ХП90% предел прочности уменьшается до  $460 \pm 5$  МПа. Однако старение благоприятно влияет на относительное удлинение образцов, которое увеличивается с 21-26%.

В исходном состоянии электропроводность достаточно низкая 35% IACS, что связано с рассеянием электронов на атомах легирующих элементов в медной матрице. Последующее увеличение степени деформации не приводит к заметному изменению электропроводности и остается  $\approx 35\%$  IACS, следовательно дислокационный и зернограничные вклады оказывают слабое влияние на электропроводность.

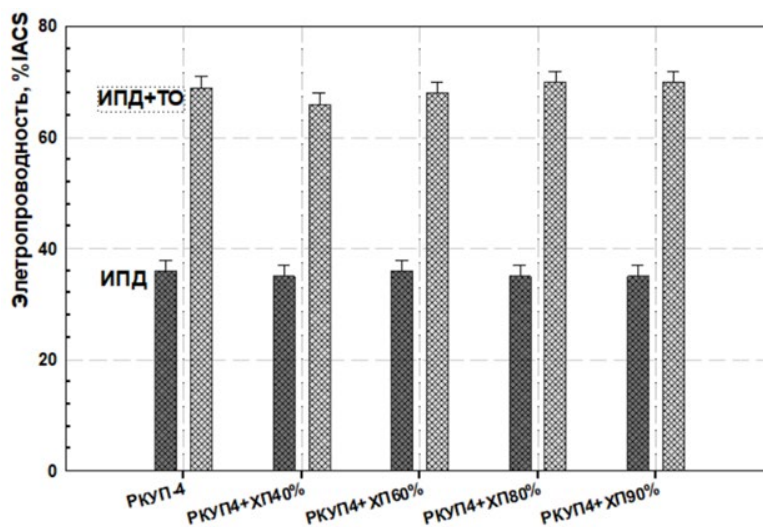


Рис. 4. График зависимости электропроводности в различных состояниях

Пост-деформационное старение приводит к восстановлению электропроводности в 2 раза для всех состояний до 70% IACS (рис. 4) в результате распада исходного пересыщенного ТР и выделения частиц второй фазы.

1. После РКУП и последующей прокатки предел прочности возрастает до 510 МПа, что в 3,3 раза выше по сравнению с исходным состоянием. Последующее старение приводит к незначительному разупрочнению до 460 МПа, но при этом улучшается пластичность до 26%.

2. Степень деформации не сильно повлияла на электропроводность она составила  $\approx 35\%$ . Последующая пост-деформационная термообработка приводит к восстановлению электропроводности до  $70\%$  за счет распада твердого раствора и очищение матрицы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта 0838-2020-0006 «Фундаментальные исследование новых принципов создания перспективных электромеханических преобразователей энергии с характеристиками выше мирового уровня, с повышенной эффективностью и минимальными удельными показателями, с использованием новых высокоэффективных электротехнических материалов».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАУРЫ

1. Осинцев О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. (2004) стр. 336.
2. Николаев, А.К. Сплавы для электродов контактной сварки / А.К. Николаев, В.М. Розенберг. – М.: Металлургия, 1978. – 96 с.
3. Николаев А.К. Медь и жаропрочные медные сплавы: энцикл. терминолог. слов.: фундаментальный справ. / А.К. Николаев, С.А. Костин. М.ДПК Пресс, 2012. – 715 с.
4. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией М. Логос, 2000. – 272 с.
5. Морозова А.И. Эволюция структуры и физико-механических свойств низколегированных сплавов системы Cu-Cr-Zr в процессе деформационно-термической обработки-Белгород, 2018. С. 144
6. Shanmugasundaram T. High strength bulk nanostructured 2219 Al alloy produced by high energy ball milling and hot pressing / Shanmugasundaram T, Subramanya Sarma V., Murty B.S., Heilmaier M. // Materials Science Forum. 2008. V. 584–586, p. 97.
7. Purcek G., Yanar H., Demirtas M., Alemdag Y., Shangina D.V., Dobatkin S.V. Optimization of strength, ductility and electrical conductivity of CU-Cr-Zr alloy by combining multi-route ECAP and aging // Materials Science & Engineering A, 2016. V. 649, p. 114-122.
8. Dobatkin S.V., Gubicza J., Shangina D.V., Bochvar N.R., Tabachkova N.Y. High strength and good electrical conductivity in Cu–Cr alloys processed by severe plastic deformation // Materials Letters 2015. V. 153, p. 5–9.
9. Wei K. X., Wei W., Wang F., Qing Bo Du, Alexandrov I.V., Hu J. Microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of industrial Cu–0.5%Cr alloy processed by severe plastic deformation // Acta Materialia 2005. V. 53, p. 2181–2192
10. Rabkin, I. Correlation between the nanomechanical properties and microstructure of ultrafine-grained copper produced by equal channel angular pressing / I. Rabkin, M.K. Gutman // Materials Science and Engineering A. – 2005. V. 396. p. 11–21.
11. Шаньгиной Д.В., Диссертация 2018, стр.127.
12. Suzuki H., Kanno M. J Jpn Inst Met (Jpn). Effect of Chemical Composition on Structure and Properties of Ultrafine Grained Cu-Cr-Zr Alloys Produced by Equal-Channel Angular Pressing 1972. V. 36, p. 363.
13. Purcek G., Yanar H. Demirtas M, Alemdag Y., Shangina D.V., Dobatkin S.V. Optimization of strength, ductility and electrical conductivity of CU-Cr-Zr alloy by combining multi-route ECAP and aging // Materials Science & Engineering A, 2016. V. 649, p. 114-122.
14. DallaTorre F., Lapovok R., Sandlin J., Thomson P.F., Davies C.H., Pereloma J, E. // Acta Mater. 2004. V. 52, p. 4819-4832.

УДК 621.74

А. Р. ЮСУПБАЕВ, И. И. ШАЙХУТДИНОВА

*ainur20012711@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О. Б. ДЕМЕНОК

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ВЛИЯНИЕ ЗАПОЛНЕНИЯ И ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ МММ МОДЕЛЕЙ ПРИ МЕТОДЕ ЛИТЬЯ QUICK-CAST НА ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ ТОЧНОСТЬ ОТЛИВОК**

*Аннотация.* В работе представлено многоструйное моделирование, проведен анализ преимуществ и недостатков представленного метода. Рассматриваются полые quick-cast модели с 3 формами ячеек и определяется при какой форме ячеек деформация модели после отверждения минимальна.

*Ключевые слова:* quick-cast; деформация; МММ (MultiJet Modeling); многоструйное моделирование; 3D- печать.

### ***Введение***

Метод многоструйного моделирования – это профессиональная технология 3D печати, запатентованная компанией 3D Systems. В техническом плане эта методика напоминает одновременно и SLA, и FDM 3D печать, а также технологию струйной трехмерной печати (3DP). МММ в основном применяется в промышленных целях. Бытовое применение технологии ограничено в связи со стоимостью и габаритами 3D принтеров.

В контексте данной работы отметим первые два направления, которые важны для непосредственного получения литейных деталей. Для целей литейного производства применяют так называемые Quick-Cast-модели, т. е. модели для «быстрого литья». Так называют модели, по которым по аналогии с восковыми моделями могут быть быстро получены металлические отливки. Иными словами, это модели для литья по тем же технологиям, что и восковые и полистирольные модели. Но есть важный нюанс. Модели Quick-Cast имеют сотовую структуру массива стенок: внешние и внутренние поверхности стенок выполняются сплошными, а само тело стенки формируют в виде набора сот. Такая структура дает большие преимущества:

Во-первых, примерно на 70% снижается общая масса модели, а, следовательно, процесс наращивания ускоряется, к тому же меньше материала нужно будет выжигать при подготовке формы к заливке металлом.

Во-вторых, в процессе выжигания любой модельный материал расширяется и оказывает давление на стенки формы, которая керамическая, а значит довольно хрупкая. Сотовая же структура позволяет модели при расширении «скапливаться» внутрь, не напрягая и не деформируя стенки формы. Это важнейшее преимущество Quick-Cast-технологии.

Но есть и недостатки, важнейший из которых: дополимеризация фотополимера (окончательное отверждение) сопровождается усадкой материала и возникновением разных по значению напряжений в изготавливаемой модели, что ведет к отклонению фактических размеров изделия, от теоретических.

### Методика исследований

Ученые из Технологического Университета Малайзии провели исследование, они создали несколько образцов лестничных конструкций, с разной ячеистой структурой (рис.1).

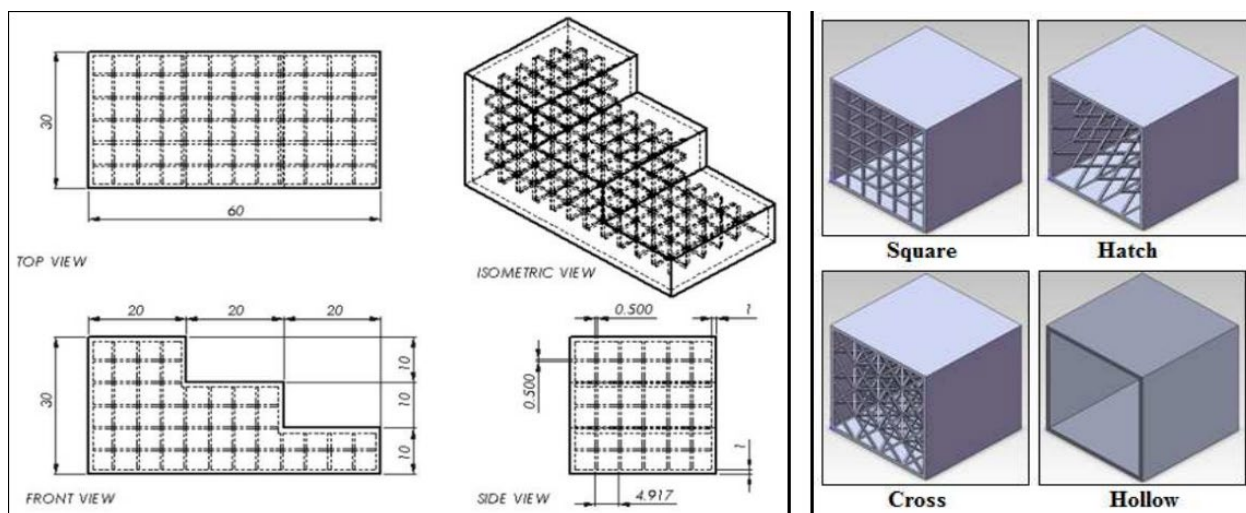


Рис. 1. Образцы лестничных конструкций с разной ячеистой структурой

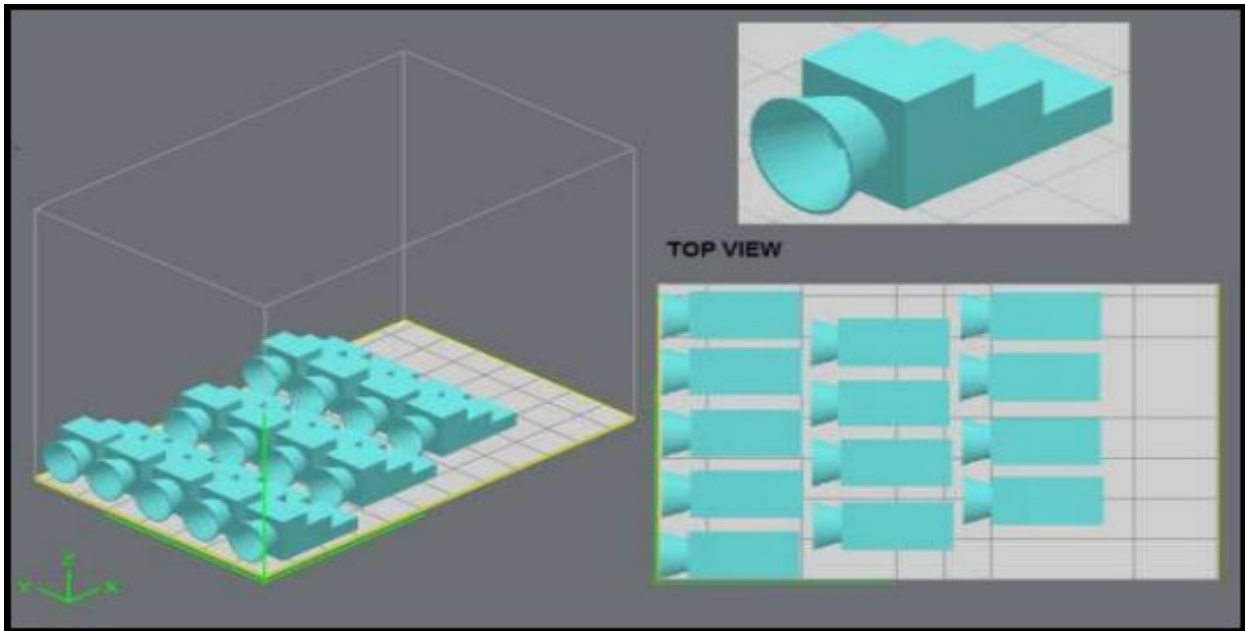


Рис. 2. Модель в распечатанном виде

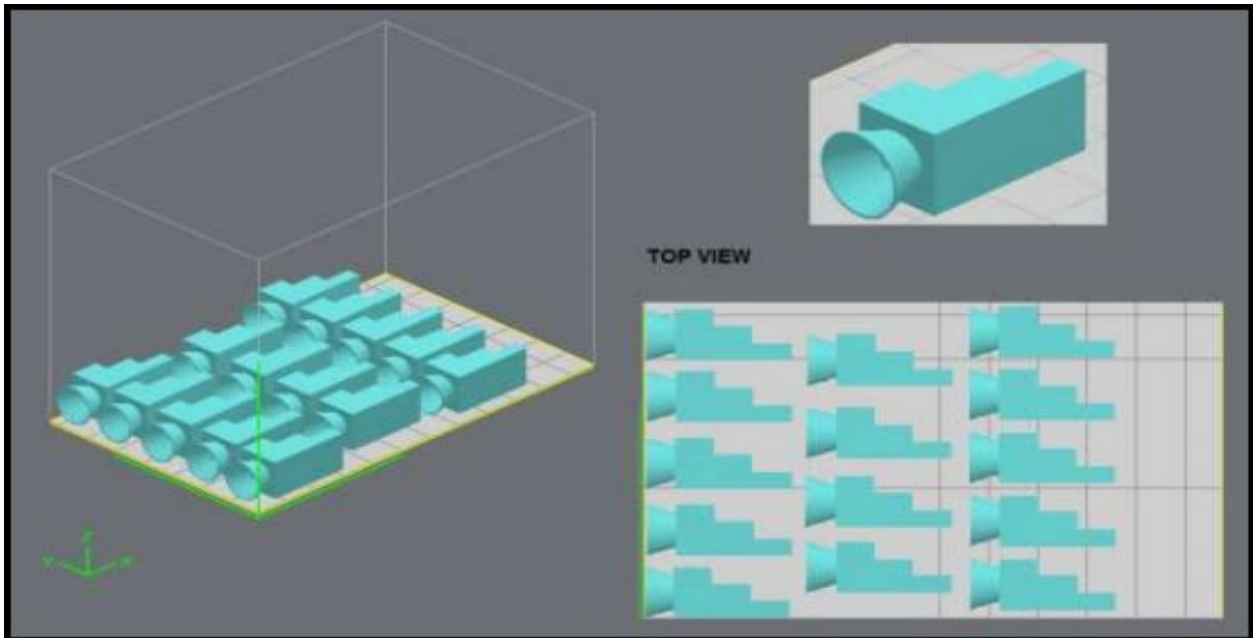


Рис. 3. Модель, распечатанная повернутой на 90 градусов

Анализ точности размеров измеряется путем сравнения между всеми точками (А-Е, рис.4) и между различными внутренними структурами (рис.1), наблюдая за их расширением и усадкой.

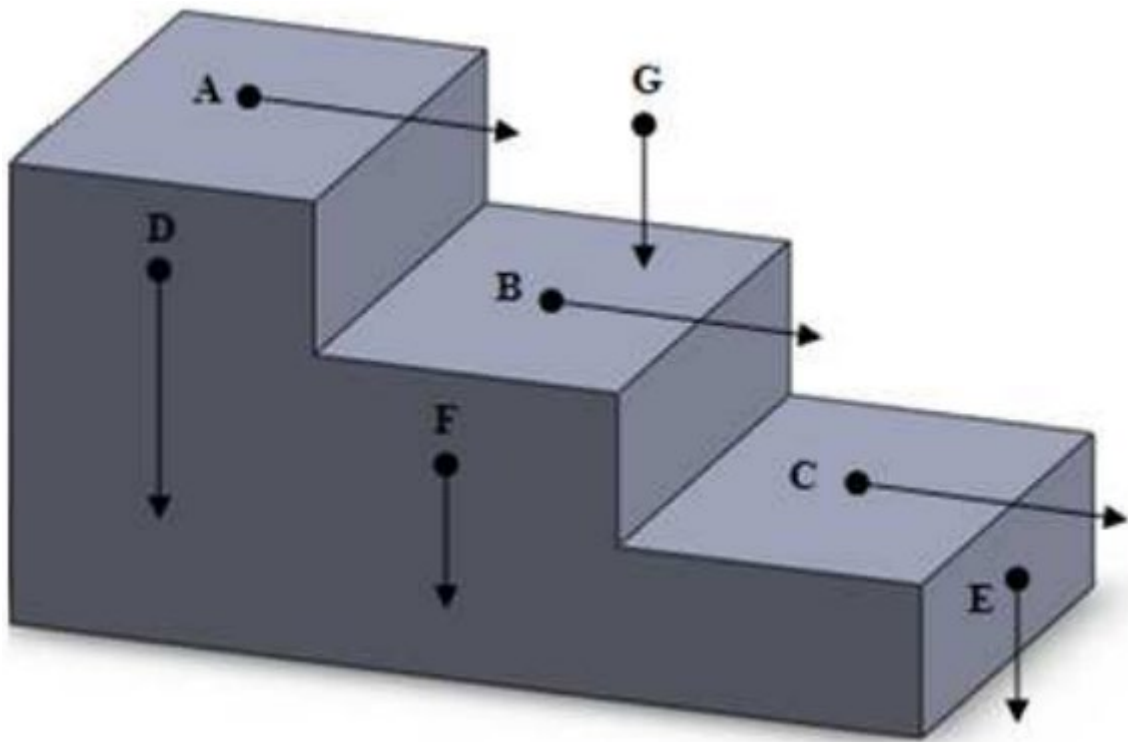


Рис. 4. Расположение точек сравнения геометрии

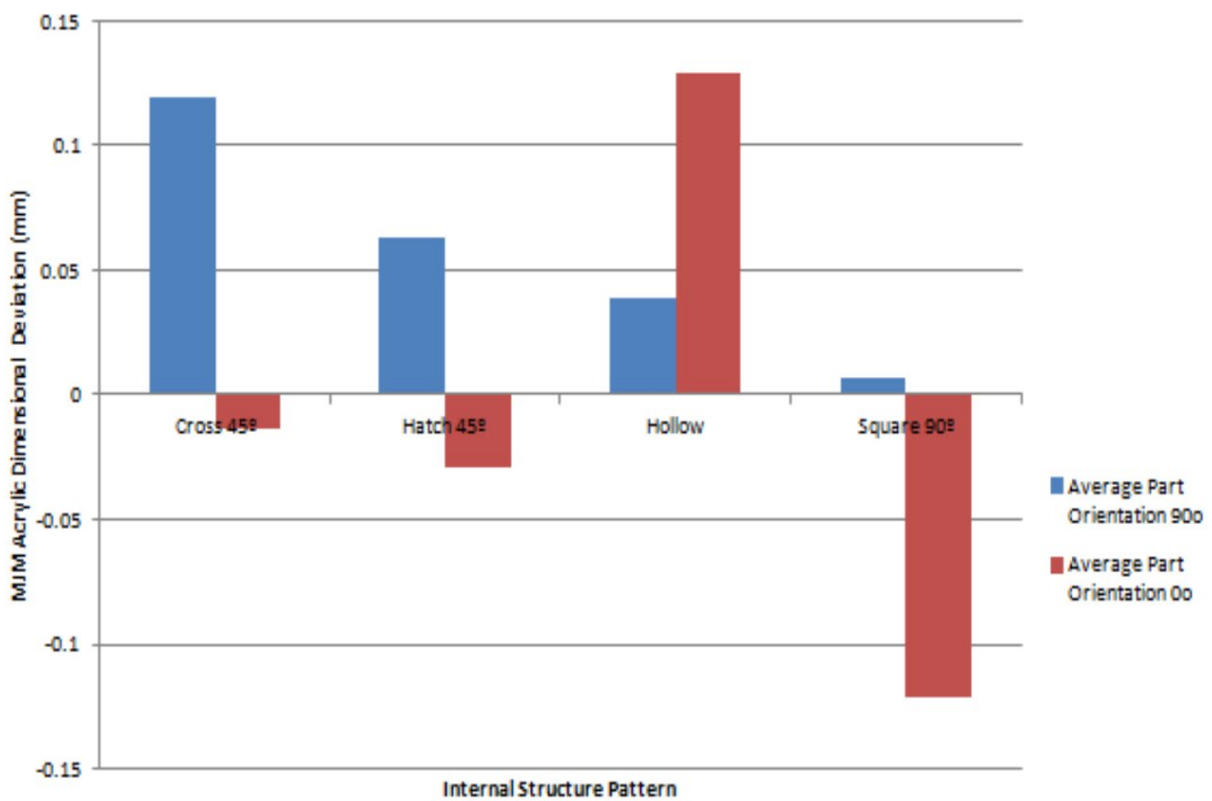


Рис. 5. Результаты сравнения

Результаты (рис.5 красные столбцы) показывают, что в целом наименьшая точность наблюдается у изделий, напечатанных в вертикальном положении

(рис.2). Это связано с тем, что у этих моделей нагрузка распределена неравномерно, чем выше ступенька, тем больше масса у поддерживающих его стенок. Однако при использовании ячеистой структуры, расположенной под углом к стенкам (рис.1 hatch, cross), ребра ячеек не дают стенкам изделия расходиться, удерживая их одновременно по оси X и Y, поэтому точность у таких моделей высока. Так же, результаты (рис.5 синие столбцы) показывают, что в целом наибольшая точность достигается у изделий, напечатанных в горизонтальном положении (рис.3). При таком расположении нагрузка на стенки изделия и ребра ячеек распределяется равномерно, а в случае с квадратной структурой ячеек, сила тяжести направлена по ребрам ячеек, то есть момент сил равен 0.

Вывод: стоит выбирать ячеистую структуру для 3D-модели и располагать ее таким образом, чтобы она поддерживала форму изделия и не деформировала ее собственным весом, другими словами, чтобы векторная сумма сил реакций опор ребер ячеек была больше векторной суммы сил веса ячеек.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние параметров ячеистой структуры на точность высокопористых моделей отливок / А. А. Шумков, Е. В. Матыгулина, Н. В. Трапезников, А. А. Мальцев // Теория и технология металлургического производства. - 2019. - № 1(28). - С. 24-29.
2. Evaluation of different internal structure and build orientation for multijet modeling process / MN Hafsa, M Ibrahim, S Sharif, MFM Omar, MA Zainol // Applied Mechanics and Materials 315, 587-591.
3. Влияние ориентации модели в процессе построения на точность формы прототипа / А. А. Шумков, Т. Р. Абляз // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2016. - Т. 18, № 3. - С. 198-207.



УДК 616.1

С. Р. ЯГАФАРОВ, Г. Р. НИГМАТУЛЛИНА

*salavat.yagafaroff@gmail.com*

Науч.руковод. – канд. физ.-мат. наук, доц. З. А. ЯГАФАРОВА

*Уфимский государственный авиационный технический университет  
Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЛИТЕРАЦИИ ПРИ ЛЕЧЕНИИ ВАРИКОЗНОЙ БОЛЕЗНИ**

**Аннотация.** В статье рассматривается механизм облитерации вен при лечении варикоза. На основе численного эксперимента определена зависимость зарастания адсорбционного слоя от времени и зависимости величины скорости облитерации от времени при разных диаметрах трубок.

**Ключевые слова:** моделирование, кровеносная система, облитерация, адсорбционный слой.

Организм человека является очень сложной целостной системой, для эффективной работы которой необходимо осуществление множества процессов. Функционирование организма возможно благодаря тесному взаимодействию органов, происходящему в результате кровообращения. Функция кровообращения состоит в доставке крови ко всем органам и тканям. С током крови происходит транспорт кислорода, углекислого газа, гормонов, ферментов, питательных веществ по всему организму.

Кровеносная система человека представляет собой замкнутую систему из двух кругов кровообращения и включает в себя сосуды (артерии, вены, капилляры), сердце и кровь. Кровеносные сосуды имеют форму длинных полых трубок, которые начинаются из сердца и разветвляются по всему организму. Сосуды разделяют на несколько типов, каждый из которых играет свою роль в системе кровообращения. К примеру, артерии отвечают за движение крови от сердца к органам, ответственны за доставку питательных веществ и насыщение кислородом всех органов и тканей. А капилляры, являющиеся самыми тонкими сосудами, участвуют в обмене газами, нутриентами и другими веществами. Вены отвечают за возвращение крови обратно к сердцу. Они перемещают отработанные вещества и имеют более уязвимые стенки, поэтому чаще всего в организме

страдают вены. Варикоз является крайне распространенным заболеванием, которое характеризуется расширением сосудов и ослаблением их стенок. Этим заболеванием страдает до 60% трудоспособного населения экономически развитых стран. На сегодняшний день существуют различные современные малоинвазивные методы лечения варикоза. Например, метод радиочастотной облитерации заключается в воздействии токов высокой частоты (радиочастотного излучения) на внутреннюю поверхность сосудов, в результате чего происходит закрытие просвета вен и последующее его полное рассасывание (абляция), при флебосклерооблитерации лечение происходит в результате введения в просвет сосуда склерозирующих агентов в пенной или жидкой форме. При эндовенозной лазерной облитерации используется специальный световод, который действует лазерным излучением на варикозную стенку вены. Облитерация вен это современный метод лечения варикозной болезни позволяющий провести процедуру наиболее безопасно. Математическое моделирование механизма облитерации вен может помочь развитию методов лечения данной болезни.

Облитерация или абляция в медицине – процесс уничтожения тканей малоинвазивными методами. Целью облитерации является заращение или закрытие полостного, трубчатого органа, канала, сосуда вследствие разрастания в его просвете ткани с дальнейшим восстановлением нормального функционирования органа, а не частичного или полного его удаления.

Возникновение явления облитерации в узких щелях и капиллярах в физике объясняется тем, что при движении жидкости в узких зазорах происходит ее электризация. Поверхностный слой жидкости может приобретать положительную или отрицательную полярность. В результате электрического и молекулярного взаимодействия происходит адсорбция этого слоя на поверхность [3].

В работе [2] показано, что толщина адсорбционного слоя на поверхностях щелевых уплотнений при облитерации определяется следующей зависимостью:

$$d = d_{max} - \exp(-\alpha t),$$

где  $d_{max}$  – максимальная толщина адсорбционного слоя;  $t$ – время после начала течения жидкости;  $\alpha$ – коэффициент пропорциональности.

Проведен численный эксперимент по изучению явления абляции при лечении варикозной болезни нижних конечностей, а также моделирование гемодинамики вены при наличии варикоза. Целью эксперимента являлось изучение физических основ облитерации. Для проведения численного эксперимента из источника [4] была заимствована модель исследуемого сосуда. Использовались числовые данные давления в сосудах, диаметра вен.

Построен график зависимости абляции вены от времени при различных значениях максимальной толщины адсорбционного слоя, равных диаметрам вен (рис.1). Время облитерации:  $t = 0 - 20$  мин.

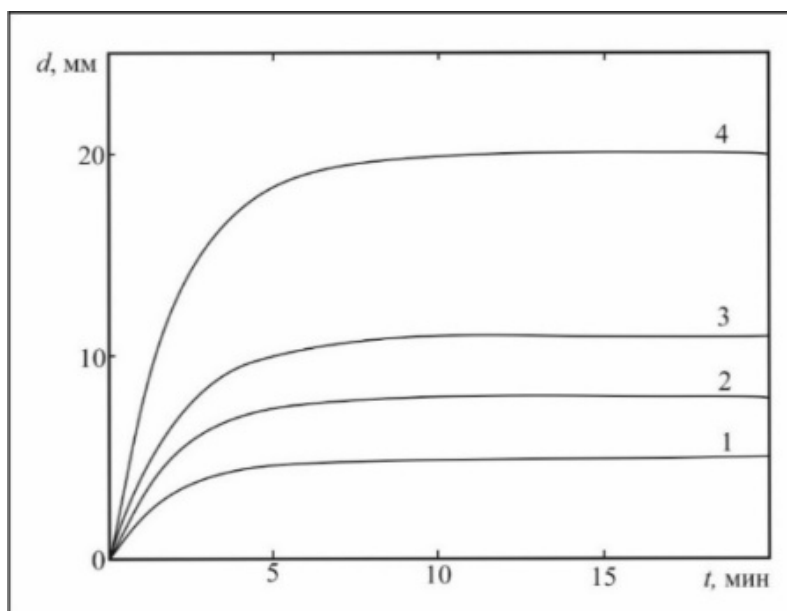


Рис. 1. Зависимость зарастания адсорбционного слоя от времени при различных степенях заболевания

На следующем этапе численно были определены зависимости величины скорости облитерации от времени при разных диаметрах трубок (рис.2).

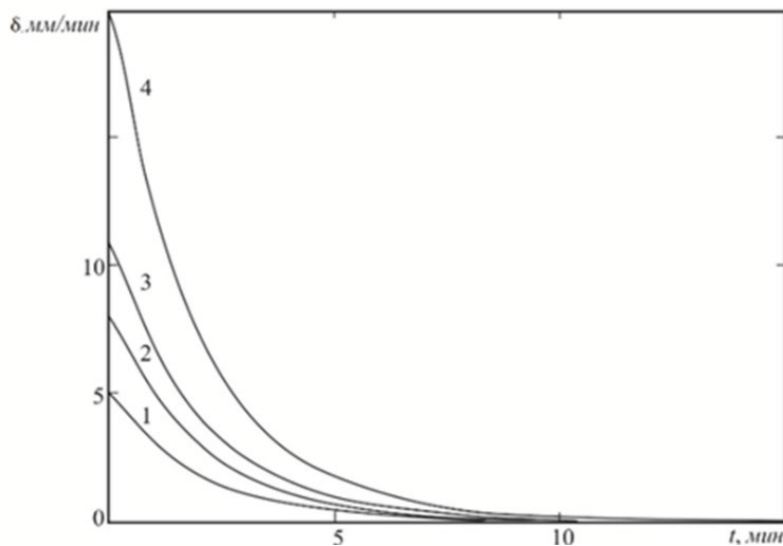


Рис. 2. Зависимость величины скорости облитерации от времени при различных диаметрах сосудов

При построении графических зависимостей использовали программу для решения математических задач – Mathcad, обработка получившегося графика проводилась в графическом редакторе CorelDraw. Согласно расчетам, среднее значение времени облучения лазером вены 9,25 мин. Полученный результат сопоставим с экспериментальными данными врачей-флебологов. Это означает, что данное уравнение можно применять для изучения процесса облитерации вен при лечении варикозной болезни. Уравнение Пуазейля справедливо для жестких неветвящихся трубок с круглым поперечным сечением, одно-направленного потока, гомогенных жидкостей, ламинарного течения. В системе кровообращения человека ни одно из этих требований строго не выполняется. Описание кровотока требует учета всех вышеперечисленных факторов, однако, это не возможно осуществить на практике. Таким образом, при моделировании нами была использована одномерная модель, ламинарный ход течения жидкости. Несмотря на погрешности эта модель позволяет оценивать и сравнивать объемные кровотоки в сосудах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берган Дж. Лечение наружного кровотечения при варикозно-расширенных венах // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2000. – Т.6, №2. – С. 53-60.
2. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Учебник по медицинской и биологической физике. – М.: Дрофа, 2003. – 45 с.
3. Никитин Г.А. Щелевые и лабиринтные уплотнения гидроагрегатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 135 с.
4. Ягафарова З.А., Зеленова М.А., Нигматуллина Г.Р. Исследование гемодинамических характеристик системы кровообращения // Инженерная физика. – 2020. – № 10. – С.23-29.