

# МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

## Том 2

---

Материалы  
XVII Всероссийской молодёжной научной конференции  
(г. Уфа, 21 – 23 ноября 2023 г.)



Том 2



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ**

# **МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

## **Том 2**

*Материалы  
XVII Всероссийской молодёжной научной конференции*

*(г. Уфа, 21 – 23 ноября 2023 г.)*

Научное электронное издание сетевого доступа

**Уфа  
РИЦ УУНиТ  
2024**

УДК 62  
ББК 32  
М12

*Печатается по решению Ученого совета  
института технологий и материалов УУНиТ.  
Протокол № 1 от 30.09.2024 г.*

***Редакционная коллегия:***

канд. хим. наук, доцент **А.В. Баннова** (*отв. редактор*);  
канд. техн. наук, доцент **Ю.М. Модина** (*секция 2.1*);  
инженер **А.И. Нигматуллина** (*секция 2.2*);  
канд. хим. наук, доцент **А.В. Баннова** (*секция 2.3*);  
старший преподаватель **И.И. Шайхутдинова** (*секция 2.4*);  
старший преподаватель **Г.М. Нурисламова** (*секция 2.5*);  
канд. физ.-мат. наук, доцент **М.М. Абрамова** (*секция 2.6*)

**Мавлютовские чтения:** материалы XVII Всероссийской молодёжной научной конференции (г. Уфа, 21–23 ноября 2023 г.) / отв. ред. А.В. Баннова / в 9 т. М12 Т.2. [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: РИЦ УУНиТ, 2024. – 295 с. – URL: <https://uust.ru/digital-publications/2024/180.pdf> – Загл. с титула экрана.

ISBN 978-5-7477-5945-9

Том 2: ISBN 978-5-7477-5952-7

Конференция проходила в рамках реализации проекта «Студенческая наука в сердце Евразии» по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта и форме субсидий в соответствии с п. 4 ст. 78. БК РФ от 15.06.2023 № 075-15-2023-545 (ЦФО 1.9). Во 2-й том сборника материалов конференции вошли статьи секций 2.1–2.6.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей.

Все материалы представлены в авторской редакции.

ББК 32

ISBN 978-5-7477-5952-7 (том 2)  
ISBN 978-5-7477-5945-9

© УУНиТ, 2024

## СЕКЦИЯ 2.1. НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.777

Р.Н. АСФАНДИЯРОВ, Д.А. АКСЕНОВ, М.А. ШИШКУНОВА

*a.r.n@list.ru*

*Уфимский университет науки и технологий*

*Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН*

### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Mg-Zn-Zr, ПОДВЕРГНУТОГО РКУП-К

*Аннотация:* В работе представлены результаты исследования деформационной обработки биорезорбируемого магниевого сплава МА14 методом РКУП-К, в том числе деформирование заготовки в оболочке. Установлено, что РКУП-К ведет к измельчению зеренной структуры с сохранением бимодального вида, а последующее старение приводит к повышению предела текучести и предела прочности образцов сплава МА14 до  $280\pm 15$  и  $325\pm 5$  МПа соответственно.

*Ключевые слова:* биорезорбируемые магниевые сплавы; МА14; РКУП-К; прочность; сопротивление коррозии.

На данный момент активно исследуются и разрабатываются методики остеосинтеза, привлекая повышенное внимание к использованию биорезорбируемых металлических материалов, включая магниевые сплавы [1-3].

Один из перспективных магниевых сплавов для создания имплантатов – сплав МА14 системы Mg-Zn-Zr. Известно, что метод равноканального углового прессования длинных заготовок по схеме Конформ (РКУП-К) способствует значительному увеличению прочности обработанных заготовок. Для магниевых сплавов, обычно требуется от 2 до 4 циклов деформирования для достижения прочности свыше 300 МПа [4-6]. Однако при этом могут возникнуть проблемы, такие как проскальзывание по основной базисной плоскости, что может негативно сказаться на эффективности обработки и привести к разупрочнению материала [6,7]. Данное исследование фокусируется на разработке специальных режимов термомеханической обработки, включая РКУП-К, с целью достижения необходимых свойств материала.

Отталкиваясь от литературных данных [8,9], исходным состоянием выбрано состояние, полученное после продолжительного отжига в течение 24 часов при температуре  $400\pm 10$  °С. В результате этой термообработки достигнуто крупнозернистое состояние с бимодальным распределением размеров зерен: присутствуют крупные зерна средним поперечным размером  $30\pm 10$  мкм и рекристаллизованные зерна средним поперечным размером  $4\pm 2$  мкм.

Далее была проведена деформационная обработка методом РКУП-К двух видов – с использованием объемной заготовки и заготовки в оболочке по схемам:

1. 1 цикл с углом пересечения каналов  $120^\circ$ , при начальной температуре заготовок  $200 \pm 10^\circ\text{C}$  и температуре оснастки  $150 \pm 10^\circ\text{C}$ ;

2. 1 цикл с углом пересечения каналов  $120^\circ$ , при начальной температуре заготовок  $250 \pm 10^\circ\text{C}$  и температуре оснастки  $200 \pm 10^\circ\text{C}$ .

После проведения деформационной обработки по обоим технологическим режимам наблюдается измельчение зерен в структуре с сохранением бимодального характера. Обнаружены мелкие зерна средним размером  $3,2 \pm 2,5$  мкм и  $4,7 \pm 2,3$  мкм для 1 и 2 режима соответственно, а также присутствуют крупные зерна. Важно отметить, что в обоих случаях температура деформации превышала температуру рекристаллизации магния. Форма зерен и результаты других исследований с этим материалом [10,11] указывают на прохождение динамической рекристаллизации.

Электрохимические испытания на коррозионную стойкость показали, что наилучшая коррозионная стойкость наблюдается в исходном отожженном состоянии. Это объясняется тем, что отожженная структура имеет меньше дефектов и микронапряжений, а также границы зерен находятся в релаксированном состоянии, что в совокупности положительно влияет на коррозионную стойкость. Деформирование методом РКУП-К приводит к заметному снижению коррозионной стойкости образцов. Ток коррозии для деформированных образцов может увеличиться в 1,5 раза по сравнению с отожженным состоянием.

Результаты механических испытаний на растяжение (рис. 1) показывают увеличение прочностных характеристик обработанного материала до 10%. В обоих случаях предел прочности увеличивается до значений  $305 \pm 5$  и  $300 \pm 5$  МПа для 1 и 2 режима соответственно.

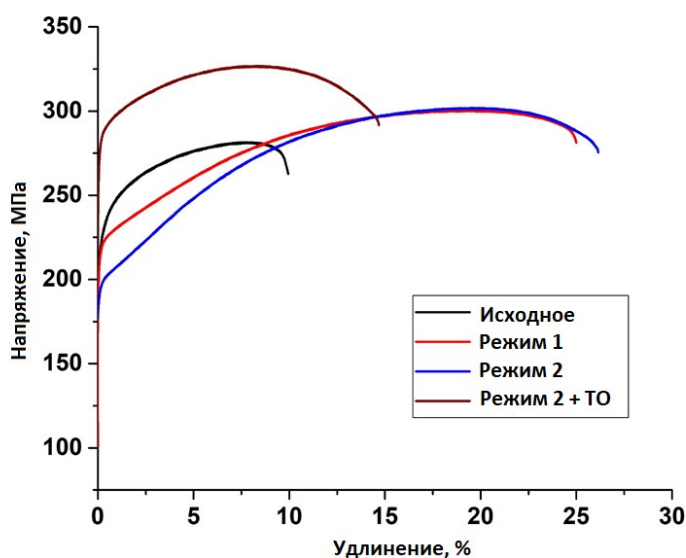


Рис. 1. Кривые механических испытаний на растяжение

Однако предел текучести для образца, обработанного по 1 режиму выше, и составляет  $220 \pm 5$  МПа, в то время как для образца, обработанного по 2 режиму РКУП-К предел текучести равен  $185 \pm 5$  МПа. Вероятно, данное различие можно объяснить более низкой температурой деформации и наличием зерен полосового типа в случае первого режима. Образцы, подвергнутые воздействию второго режима РКУП-К, были дополнительно обработаны старением, выдерживая их при температуре  $150$  °С в течение 16 часов. Механические испытания на растяжение проведенных образцов после старения свидетельствуют о дополнительном повышении предела текучести и предела прочности до  $280 \pm 15$  и  $325 \pm 5$  МПа соответственно. Таким образом, предложенная термомеханическая обработка сплава МА14, включая РКУП-К и последующее последеформационное старение, приводит, с одной стороны, к существенному повышению предела прочности до  $325 \pm 5$  МПа, что составляет увеличение на примерно 15 % по сравнению с исходным отожженным состоянием. С другой стороны, она снижает коррозионную стойкость материала.

#### *Благодарность*

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № 075-15-2022-549.

#### **Библиографический список**

1. Li N., Zheng Y. // Journal of Materials Science and Technology. 2013. Vol. 29. P. 489–502. DOI: 10.1016/j.jmst.2013.02.005.
2. Chen Y., Xu Z., Smith C., Sankar J. // Acta Biomaterialia. 2014. Vol. 10. P. 4561–4573. DOI: 10.1016/j.actbio.2014.07.005.
3. Gu X.-N., Zheng Y.-F. // Frontiers of Materials Science in China. 2010. Vol. 4. P. 111–115. DOI: 10.1016/S0009-8981(99)00258-2.
4. Merson D., Brilevsky A., Myagkikh P., Tarkova A., Prokhorikhin A., Kretov E., Frolova T., Vinogradov A. // Materials. 2020. Vol. 13. №. 3. 544. DOI: 10.3390/ma13030544.
5. Vinogradov A., Vasilev E., Kopylov V.I., Linderov M., Brilevesky A., Merson D. // Metals. 2019. Vol. 9. 186. DOI: 10.3390/met9020186.
6. Straumal B., Martynenko N., Temralieva D., Serebryany V., Tabachkova N., Shchetinin I., Anisimova N., Kiselevskiy M., Kolyanova A., Raab G., Willumeit-Römer R., Dobatkin S., Estrin Y. // Crystals. 2020. vol. 10. 918. DOI: 10.3390/cryst10100918.
7. Jahadi R., Sedighi M., Jahed H. // Materials Science and Engineering: A, 2014, vol. 593, pp. 178–184. DOI: 10.1016/j.msea.2013.11.042.
8. Chen M., Ma C., Liu Q., Cheng M., Wang H., Hu X. // Materials, 2023, vol. 16, 1320. DOI: 10.3390/ma16031320.
9. Alawad M.O., Alateyah A.I., El-Garaihy W.H., BaQais A., Elkatatny S., Kouta H., Kamel M., El-Sanabary S. // Materials, 2022, vol. 15, 7719. DOI: 10.3390/ma15217719.

10. Yin D. L., Cui H. L., Qiao J., Zhang J. F. // Materials Research Innovations, 2015, 19(sup9), S9–28–S9–31. doi:10.1179/1432891715z.0000000001912.

11. Jung K. H., Kim Y. B., Lee G. A., Lee S., Kim E. Z. & Choi D. S. // Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(2), 115–120. doi:10.1080/10426914.2013.811744.

© Асфандияров Р.Н., Аксенов Д.А., Шишкунова М.А., 2023

УДК 669:621.785

М.А. БЕЛЯНСКАЯ

*belianskaya.m@yandex.ru*

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

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ КРУЧЕНИЕМ СТАЛИ 316**

*Аннотация:* Сталь 316 принадлежит к классу аустенитных нержавеющей сталей, которые обладают высокой коррозионной стойкостью и механическими свойствами, делающими их идеальными для использования в условиях, где требуется высокая прочность и устойчивость к агрессивным средам. Этот материал обладает низкой чувствительностью к зернистой коррозии и высокой устойчивостью к атмосферной коррозии, хлоридной коррозии и межкристаллической коррозии при повышенных температурах [1] В работе приведены результаты исследований структуры и свойств стали 316 подвергнутой интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК).

*Ключевые слова:* аустенитная сталь; механические свойства; прочность; устойчивость

### **Введение**

Сталь 316 является одним из наиболее популярных и широко используемых сплавов в современной промышленности. У данного материала имеется несколько уникальных свойств, что делает его привлекательным для применения в различных отраслях, таких как химическая промышленность, нефтегазовая сфера, пищевая промышленность, медицинская техника и другие.

Одной из основных особенностей стали 316 является наличие добавки молибдена в ее составе. Молибден придает стали улучшенную коррозионную стойкость в хлоридных средах, что делает ее особенно подходящей для использования в морской среде и в условиях с высоким содержанием хлорида в воде или растворах. Кроме того, сталь 316 обладает хорошей

обрабатываемостью, свариваемостью и формовочными свойствами, что позволяет использовать ее для создания сложных конструкций и изделий.

Благодаря комбинации механических свойств и высокой стойкости к воздействию окружающей среды, коррозионностойкие аустенитные стали являются одним из самых широко используемых конструкционных материалов в различных отраслях промышленности. [1-2]. Коррозионностойкие аустенитные стали обладают высокой прочностью и механическими свойствами, что делает их широко используемыми конструкционными материалами в различных отраслях промышленности. Однако для перспективных применений требуется повышение прочности этих сталей, поскольку их предел текучести обычно является низким по сравнению с мартенситными и ферритными сталями. В то же время, мартенситные и ферритные стали обладают низкой коррозионной стойкостью и склонны к охрупчиванию в низких температурах, а сложнолегированные стали требуют использования дорогостоящих и редких легирующих химических элементов. В связи с этим, разработка способов повышения прочностных свойств коррозионностойких аустенитных сталей без изменения их химического состава представляет собой актуальную и важную задачу в области физики прочности и пластичности.

В связи с вышесказанным, была сформулирована цель работы: исследование структуры и свойств аустенитной стали после ИПДК. Исследование свойств на примере изменения микротвердости.

### **Материал и методики**

В работе применялась нержавеющая сталь 316 стандартного химического состава. Химический состав стали приведен в табл. 1.

*Таблица 1*

Химический состав стали 316

Марка	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Ti
AISI-316	0,03	2,0	1,0	17,0-19,0	10,0-14,0	2,0-3,0	

Для металлографического анализа изготавливались шлифы. Подготовка образцов включала в себя: шлифование, полировку и травление.

Механическое шлифование производили на абразивной шкурке разной зернистости по мере ее уменьшения. В процессе шлифования важно достичь минимальной толщины деформированного металлического слоя, чтобы в дальнейшем при полировке можно было удалить его следы. После каждого этапа шлифования поверхность должна быть покрыта однородными и четко видимыми рисками, не должно быть видно следов от предыдущего шлифования. Контроль качества шлифования после каждой ступени проводили на металлографическом оптическом микроскопе.

После проделанной работы шлифы подвергли химическому травлению для выявления структуры. Травление происходило в несколько этапов в растворе



(реактив Марбле): 20 г сернокислой меди, 100 мл соляной кислоты, 100 мл дистиллированной воды. Время травления выбирали экспериментально до выявления структуры. Изучение и фотографирование микроstructures образцов осуществлялось на оптическом микроскопе «Olympus GX 51».

### Результаты исследования и их обсуждение

В исходном состоянии микроstructure стали 316 представляет собой равноосную зёрненную структуру, хорошо различимы между собой границы зерен. Исходная микроstructure стали продемонстрирована на рис. 1.

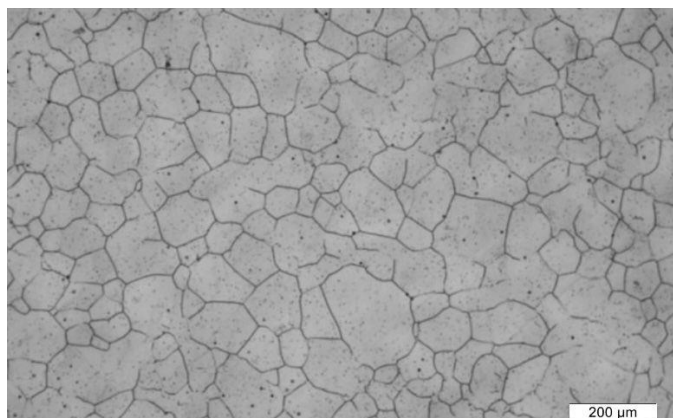


Рис. 1. Изображение исходной микроstructure стали 316

Средний размер зерна стали 316 находится в пределах  $36 \pm 11$  нм.

В результате применения ИПДК микроstructure претерпела значительные изменения.

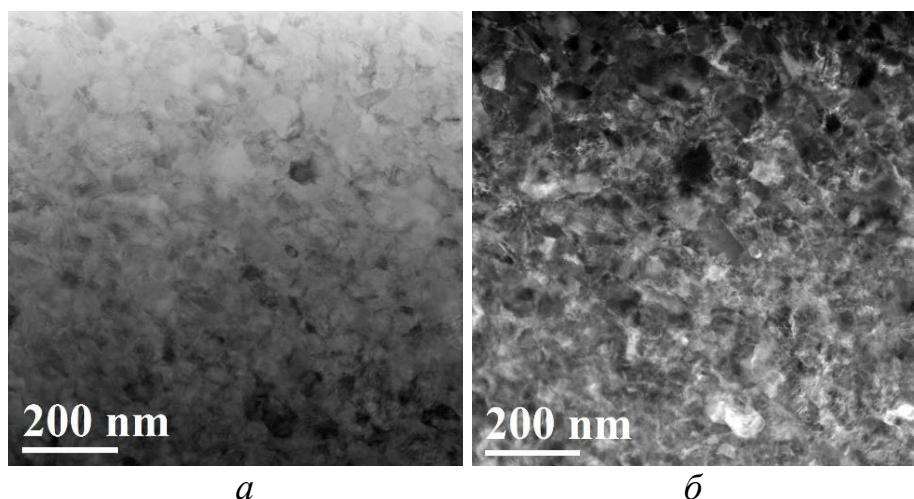


Рис. 2. Изображение УМЗ микроstructure стали 316, полученной ИПДК при комнатной температуре:

*a* – светлопольное;

*б* – темнопольное

Вследствие применения ИПДК получили мелкозернистую структуру стали 316. Границы зерен плохо различимы ввиду высоких напряжений в материале. Средний размер зерна находится в пределах  $51 \pm 21$  нм. Полученные экспериментальные данные распределения зерен и микротвердости образцов отображены в графиках.



Рис. 3. График распределения зерен

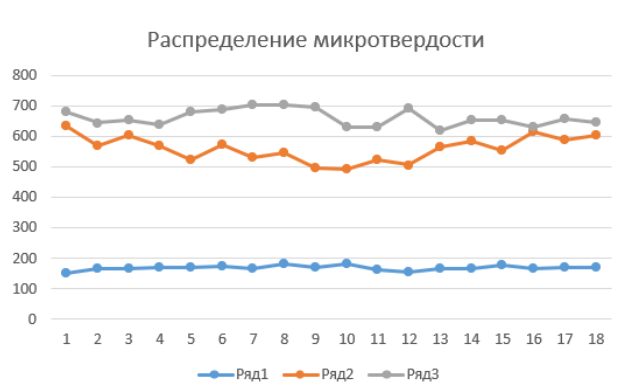


Рис. 4. График распределения микротвердости стали 316.

Измерение микротвердости показало, что в исходном состоянии микротвердость стали 316, подвергнутой закалке, однородна по диаметру образца и составляет  $168 \pm 6$  Нв. В результате, после ИПДК твердость значительно возрастает до  $559 \pm 34$  Нв. Последующий отжиг приводит к дальнейшему увеличению значений микротвердости до  $660 \pm 24$  Нв.

### Выводы

1. При комнатной температуре ИПДК привело к формированию нанокристаллического состояния в аустенитной коррозионностойкой стали, средний размер зерен составил  $51 \pm 21$  нм.

2. Микротвердость в исходном состоянии составила  $168 \pm 6$  Нв. Применение ИПДК привело к значительному росту значений микротвердости:  $660 \pm 24$  Нв (в 3 раза).

## Библиографический список

1. Lo, K.H. Recent developments in stainless steels [Текст] / K.H. Lo, C.H. Shek, J.K.L. Lai // Mat. Sci. and Eng. R. – 2009. – V. 65. – P. 39-104.

2. Mannan, S.L. Austenitic Stainless Steels for In-Core Applications of Fast Breeder Reactors [Текст] / S.L. Mannan, P.V. Sivaprasad. – Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2016.

© Белянская М.А., 2023

УДК 620.18

А.Р. БОГДАНОВ, А.Е. МЕДВЕДЕВ

*bogdanov-alb02@mail.ru, medvedevandreyrf@gmail.com*

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

*Уфимский университет науки и технологий*

### **РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ОБРАБОТКИ ТРЕНИЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ (ОТП) НА ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ШИНЕ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**

*Аннотация:* В данной работе было изучено влияние пяти различных схем реализации ОТП на формирование структуры и объемных дефектов в объеме обрабатываемой зоны. Показано, что проведение ОТП при скорости вращения инструмента 1120 об/мин и линейной скорости перемещения инструмента 200 мм/мин обеспечивает отсутствие макроскопических дефектов в объеме обрабатываемой зоны. Реализация определенных схем ОТП позволила добиться формирования мелкозернистой структуры как в приповерхностном слое, так и в объеме исследуемого материала. Данный вид обработки может быть рекомендован как способ повышения прочности алюминиевых материалов без существенной потери их электрической проводимости.

*Ключевые слова:* обработка трением перемешиванием; алюминиевый сплав; мелкозернистая структура; микротвердость

#### **Введение**

Алюминий и алюминиевые сплавы занимают значительную долю в современной металлургической промышленности. 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 [1]. Основным недостатком алюминия является его относительно низкая прочность, недостаточная для широкого применения в

промышленности. Для повышения его прочности одним из способов упрочнения является создание сплавов на его основе [2]. Общая закономерность легирования алюминия заключается в том, что рост прочности алюминиевого сплава ведет к снижению его электропроводности [3]. Другим подходом к повышению прочности алюминиевых сплавов является применение деформационных методов [2]. К недостаткам таких методов можно отнести объемный характер воздействия – деформация распространяется на весь объем обрабатываемого материала, что влечет за собой увеличение плотности дефектов и падение электрической проводимости [4]. Уменьшить влияние деформации можно за счет применения методов локального упрочнения. К наиболее популярным и применимым в промышленности обычно относят обработку трением перемешиванием (ОТП). Обработка трением перемешиванием – это технология, направленная на изменение структуры и свойств поверхности и приповерхностном слое материалов в твердой фазе [5]. Отличительной особенностью данного метода является локальное перемешивание металла в обрабатываемой зоне без образования жидкой фазы. Данный метод способен модифицировать поверхностный слой обрабатываемого материала, обеспечивая структуру и свойства, отличные от обрабатываемого материала [6]. Исследования, направленные на ОТП алюминиевых сплавов, своей целью ставят создание неразъемных соединений там, где сварка неприменима или нецелесообразна. Так, было показано, что ОТП с наложением треков на поверхность алюминия позволяет добиться уменьшения среднего размера зерна до 100–200 нм на относительно большой площади, достигая ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния [7]. Данное исследование является продолжением работ, посвященных ОТП токопроводящих шин из алюминиевого сплава АД31 [8]. В предыдущей работе был установлен рациональный режим ОТП, позволяющий при заданной геометрии обрабатывающего инструмента получить обрабатываемую зону без объемных дефектов. В данной работе рассмотрены пять различных схем реализации ОТП, их влияние на структуру и свойства шин из алюминиевого сплава АД31Т.

### **Материал исследования**

В качестве исследуемого материала использовались горячекатаные шины из алюминиевого сплава АД31Т (аналог АА6063) толщиной 10 мм и размером 200x200 мм.

Обработка материала проводилась на вертикальном консольном фрезерном станке FSS-400, адаптированном для СТП, по 6 различным схемам обработки (табл. 1). Основываясь на результатах предыдущих исследований, параметры СТП были установлены следующим образом: скорость вращения инструмента 1120 об/мин, линейная скорость инструмента 200 мм/мин.

## Реализуемые схемы СТП

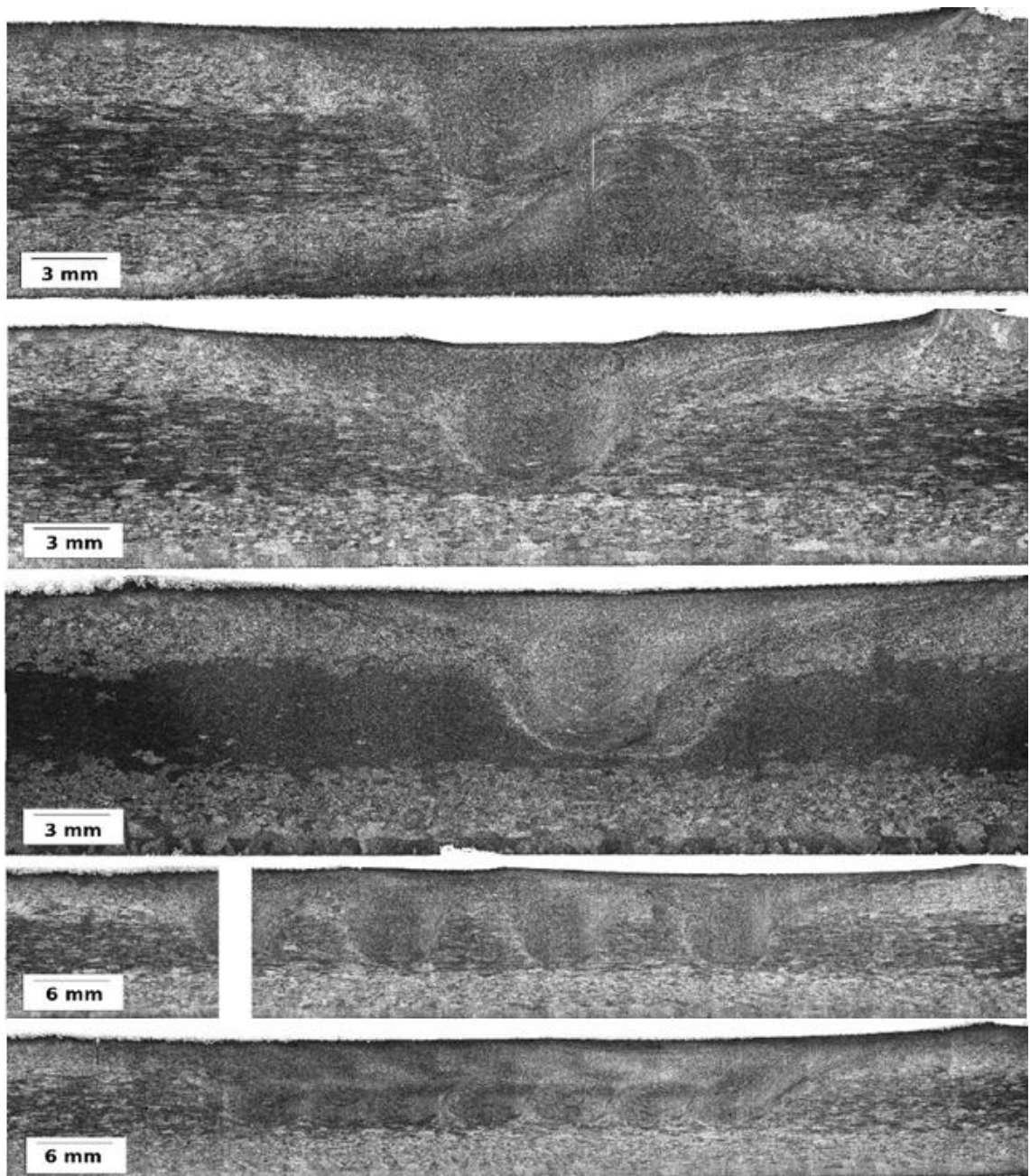
Маркировка образца	Схема СТП
225	Одиночный трек
226	Два однонаправленных трека, расположенные на одной линии, по одной от каждой поверхности (верхней и нижней) пластины
227	Два однонаправленных трека, расположенные на одной линии, друг над другом, на одной поверхности пластины
228	Два встречно направленных трека, расположенные на одной линии, друг над другом, на одной и той же поверхности пластины
229	Несколько однонаправленных пересекающихся треков на одной поверхности, перекрытие 10 мм
233	Несколько однонаправленных пересекающихся треков на одной поверхности, перекрытие 5 мм

**Результаты исследования и их обсуждение**

На рис. 1 представлены снимки металлографического анализа поперечных срезов образцов 226–233 после ОТП. Согласно данным макроскопии, шина из исследуемого сплава в исходном состоянии характеризуется тремя зонами – центральной, промежуточной и периферийной. Центральная зона характеризуется относительно мелкими, вытянутыми зернами. В промежуточной зоне зерна характеризуются большим размером и формой, близкой к равноосной. Периферийная зона состоит из крупных равноосных кристаллов, расположенных в 1-2 ряда. В результате ОТП произошло формирование мелкодисперсной структуры в обрабатываемой зоне (ОЗ) и зоне термического воздействия (ЗТВ). Форма и размер ЗТВ аналогична для образцов 227–229 – она сужается к основанию образца вследствие более значительного рассеяния тепла в объеме образца. ЗТВ образцов 229 и 233 более широкая, чем в образцах 226–228 вследствие перекрытия ЗТВ каждого индивидуального трека.

Анализ кривых распределения твердости (рис. 2) показывает, что поперечное сечение образца 226 характеризуется двумя существенно отличающимися участками: основным металлом, твердость которого составляет 50-55 HV (в зависимости от глубины замеров относительно поверхности), и металлом обрабатываемой зоны, твердость которого в среднем на 10–15% выше. Также заметно снижение твердости на границе обрабатываемой зоны, между ЗТМВ и ЗТВ, вызванное процессами возврата в результате теплового воздействия. Значения микротвердости увеличиваются в центре обрабатываемой зоны, так как из-за большей степени деформации металла увеличивается вклад зернограницного и дислокационного упрочнения.

Профили микротвердости образцов 226–228 во многом схожи, однако, есть определенные различия. В образце 226 не произошло точного перекрытия ОЗ, вследствие чего ЗТВ второго трека частично наложилась на ОЗ первого трека, приведя к разупрочнению – максимальная микротвердость в образце 226 не достигает 60HV, что является минимальным значением для образцов 226–228 (см. рис. 2 а).



*Рис. 1.* Результаты металлографического анализа поперечных сечений образцов 226–233 (сверху вниз)

Значения микротвердости для верхней, средней и нижней зон образца практически полностью совпадают, что говорит об отсутствии упрочнения в поверхностной зоне. Также значения микротвердости полностью совпадают в центре образца – между центрами ОЗ.

В образце 227 наблюдается рост микротвердости во всей ОЗ и ЗТМВ, причем значения твердости для верхнего и среднего слоев образца оказались выше, чем для нижнего слоя (см. рис. 2 б). Разнонаправленность треков в образце 228 обусловила, помимо роста микротвердости в верхнем и среднем слоях образца, также упрочнение и нижнего слоя (см. рис. 2 в).

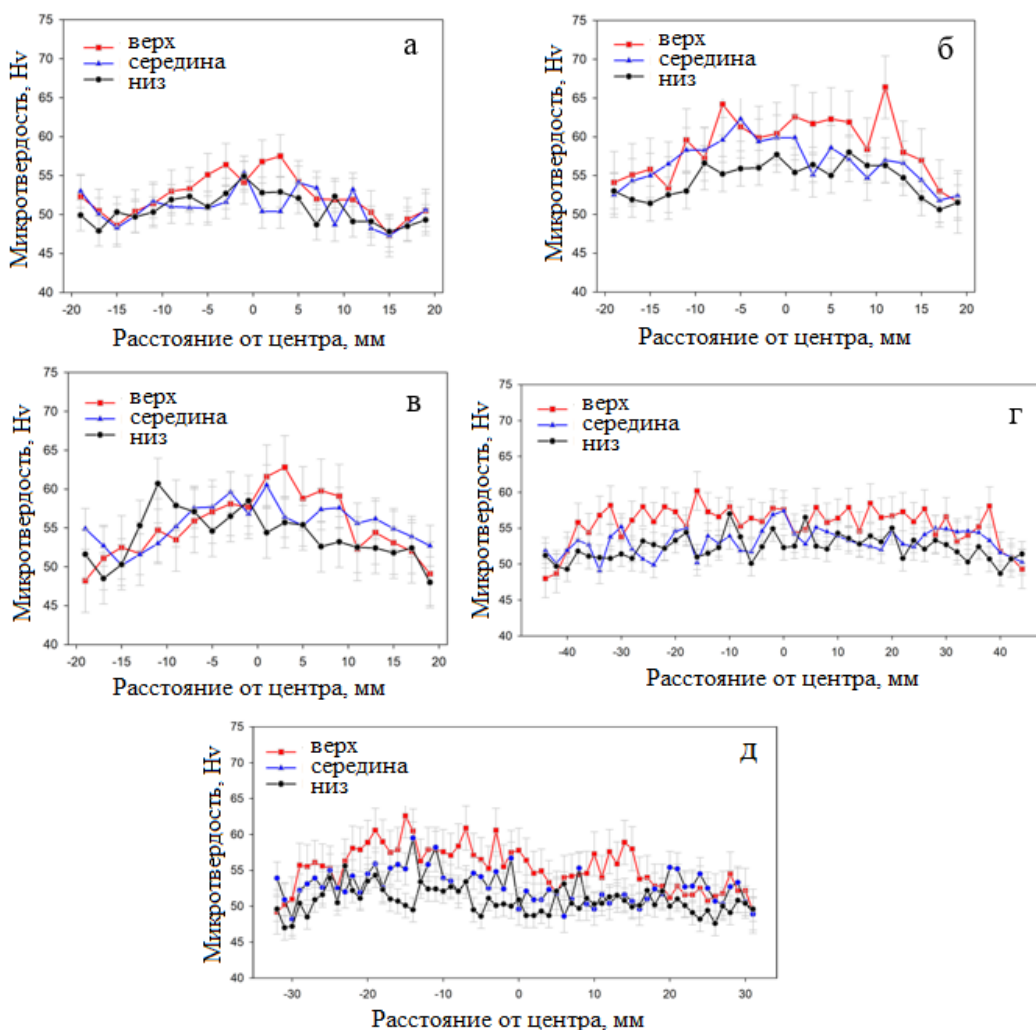


Рис. 2. Профили микротвердости для образцов:  
 а – 226; б – 227; в – 228; г – 229; д – 233

Характер профилей микротвердости для образцов 229 (см. рис. 2 г) и 233 (см. рис. 2 д) носит отличный характер от предыдущих образцов. В образце 229 микротвердость поверхностного слоя растет и оказывается выше, чем в основном материале вследствие того, что перекрытие ОЗ находится как раз около поверхности. Микротвердость нижнего слоя незначительно растет, но изменение в целом имеет незначительный характер. Профиль микротвердости среднего слоя имеет пилообразный характер, соответствующий чередующимся ОЗ.

Рост микротвердости в верхней и средней зонах образца 233 носит более выраженный характер, нежели в 229. Характерным отличием образца 233 является резкое снижение микротвердости на границе ОЗ, причем это снижение наиболее заметно в верхнем и среднем слоях образца.

## Выводы

1. В данной работе были реализованы 5 новых схем ОТП, из них три – по линии, две – по плоскости, по одинаковому режиму: линейная скорость перемещения инструмента – 200 мм/мин, скорость вращения инструмента –

1120 об/мин. Схемы ОТП, реализованные на токопроводящей шине толщиной 10 мм из коммерческого алюминиевого сплава АД31Т (система Al-Mg-Si, аналог АА6063), обеспечили бездефектную структуру.

2. При реализации каждой схемы в объеме обрабатываемой зоны вследствие пластической деформации происходило уменьшение среднего размера зерна, сопровождавшееся упрочнением. В областях термического воздействия на периферии обрабатываемой зоны происходили обратные процессы.

3. На основании проведённых исследований для создания неразъемных соединений токопроводящих алюминиевых шин рекомендуется использовать схему 227 (параллельными однонаправленными проходами с полным наложением второго прохода на первый), для упрочняющей обработки поверхности и приповерхностного слоя – 233 (параллельными однонаправленными проходами инструмента, с перекрытием треков в 5 мм).

*Авторы выражают особую благодарность Центру коллективного пользования «Нанотех» ФГБОУ ВО «УУНиТ».*

### **Библиографический список**

1. Ian Polmear, David StJohn, Jian-Feng Nie, Ma Qian (2017) Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals, 5th ed. Butterworth-Heinemann
2. Verma RP, Kumar Lila M (2021) A short review on aluminium alloys and welding in structural applications. Mater Today Proc 46:10687-10691
3. Valiev RZ, Murashkin M, Sabirov I (2014) A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity. Scr Mater 76:13-16
4. Murashkin MY, Sabirov I, Sauvage X, Valiev RZ (2016) Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity. J Mater Sci 51:33-49
5. Nicholas ED (2003) Friction Processing Technologies. Welding in the World 47:2-9
6. Kurt A, Uygur I, Cete E (2011) Surface modification of aluminium by friction stir processing. J Mater Process Technol 211:313-317
7. Su JQ, Nelson TW, Sterling CJ (2005) Microstructure evolution during FSW/FSP of high strength aluminum alloys. Materials Science and Engineering A 405:277-286
8. Medvedev A, Atroshchenko V, Selivanov A, Bogdanov A, Gorbatkov M, Logachev Y, Lobachev V, Sadrislamov A (2023) The influence of friction stir processing on the microstructure and properties of the AD31T alloy. Materials Physics and Mechanics. [https://doi.org/10.18149/MPM.51x2023\\_xx](https://doi.org/10.18149/MPM.51x2023_xx)

© Богданов А.Р., Медведев А.Е., 2023



Ф.Ф. ГУМЕРОВА

fanilagumerova@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук В.В. ПОЛЯКОВА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПСЕВДО- $\beta$ СПЛАВА Ti-10V-2Fe-3Al**

*Аннотация:* Сплав Ti-10V-2Fe-3Al был разработан в 1950-х годах американской компанией Titanium Metals Corporation (ТИМЕТ), а использовать его начали в 1960-х годах. Этот сплав изначально был разработан для применения в авиапромышленности, в частности для изготовления деталей двигателей самолётов. На сегодняшний день он также широко используется в других отраслях, таких как медицина, нефтегазовая промышленность, судостроение и т.д. [1]

*Ключевые слова:* титановые сплавы; термическая обработка; закалка; влияние ИПДК на микроструктуру и микротвёрдость; титан.

### **Введение**

Титан – химический элемент 4-й группы, четвёртого периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, с атомным номером 22, температура плавления 1 943 °С, 1 670 °С, плотность 4,51 г/см<sup>3</sup>. Он находится на 10-м месте по распространённости в природе. [3]

Титановые сплавы – сплавы титана с другими химическими элементами: Al, V, Mo, Mn, Si и др. Несмотря на столь большое распространение, титан стал использоваться в промышленности лишь в 20 веке. Титановые сплавы во многом повлияли на развитие ракетостроения и авиации, что связано с сочетанием малой плотности с высокой удельной прочностью, пластичностью, лёгкостью алюминия, стоимостью, а также коррозионной стойкостью углепластика. [4]

Несмотря на заполненность международного рынка сплавами, такими как Ti-5553(1), Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr, сплав Ti-10V-2Fe-3Al до сих пор является ценным конструкционным сплавом, который в большой степени применяют в авиационной промышленности для изготовления деталей шасси. Более того, сплав Ti-10V-2Fe-3Al обладает большей технологической пластичностью и лучшей прокаливаемостью, чем его аналоги. [1]

Титановый сплав Ti-10V-2Fe-3Al – это высокопрочный псевдо  $\beta$ -титановый сплав Он был разработан для изготовления высокопрочных элементов на замену стальным, что даёт существенный выигрыш в весе конструкции. Благодаря высокому содержанию  $\beta$ -стабилизаторов в составе сплав Ti-10V-2Fe-3Al имеет температуру полиморфного превращения существенно ниже в сравнении с таким широко используемым конструкционным сплавом, что

позволяет деформировать его при меньших температурах и с меньшими усилиями [2].

Работа со сплавом Ti-10V-2Fe-3Al является актуальной, так как этот сплав обладает высокой прочностью, стойкостью к коррозии и жаростойкостью, что делает его одним из наиболее используемых сплавов в авиационной и космической промышленности.

В связи с вышесказанным, была сформулирована цель работы – изучить влияние структурно-фазового состояния на механические свойства псевдо-β сплава Ti-10V-2Fe-3Al.

### **Материал и методики**

В качестве материала исследования был выбран β-титановый сплав Ti-10V-2Fe-3Al в виде выточенных из горячекатаных прутков круглого сечения размером 12×12 мм. Химический состав сплава приведён в табл. 1.

*Таблица 1*

Химический состав Ti-10V-2Fe-3Al

Химический элемент	%
Ванадий (V)	9,0 - 11,0
Алюминий (Al)	2,6 - 3,4
Железо (Fe)	1,6 - 2,2
Титан (Ti)	Остаток

Закалка титановых сплавов заключается в их нагреве до определённой температуры и быстром охлаждении до низкой температуры. Закалка сплава Ti-10V-2Fe-2Al проводилась при температуре 850 °С в течение 30 минут с охлаждением в воде.

Для формирования ультрамелкозернистой структуры, образец подвергали ИДПК при удельном сжимающем давлении 6 ГПа при комнатной температуре. Скорость вращения составляла 5 об/мин.

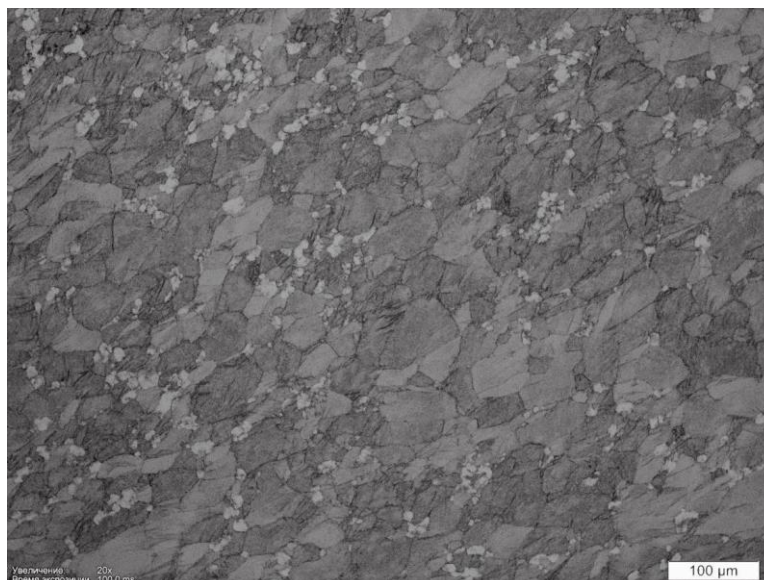
При помощи металлографического анализа были получены изображения микроструктуры образцов в микроскопе Olympus.

Микротвёрдость измерялась по методу Виккерса (Hv) на микротвёрдомере. Количество отпечатков на каждом образце было не менее десяти.

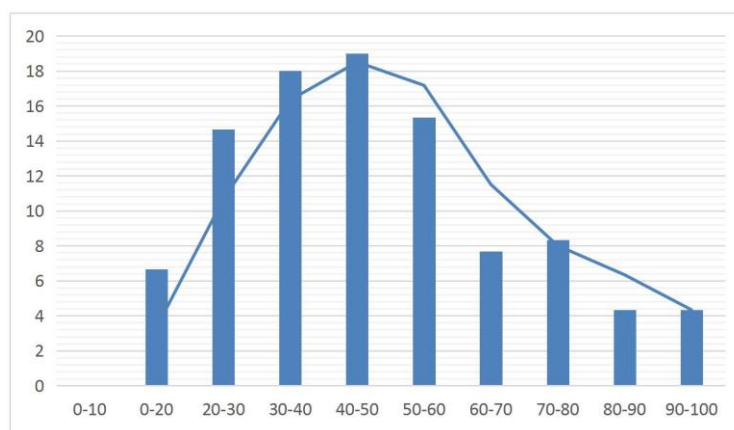
### **Результаты исследования и их обсуждение**

#### *Исследование исходной микроструктуры сплава Ti-10V-2Fe-3Al*

Микроструктура исследуемого материала характеризуется слегка ориентированными вдоль направления деформации полигональными зёрнами со средним размером 50±4 мкм (рис. 1).



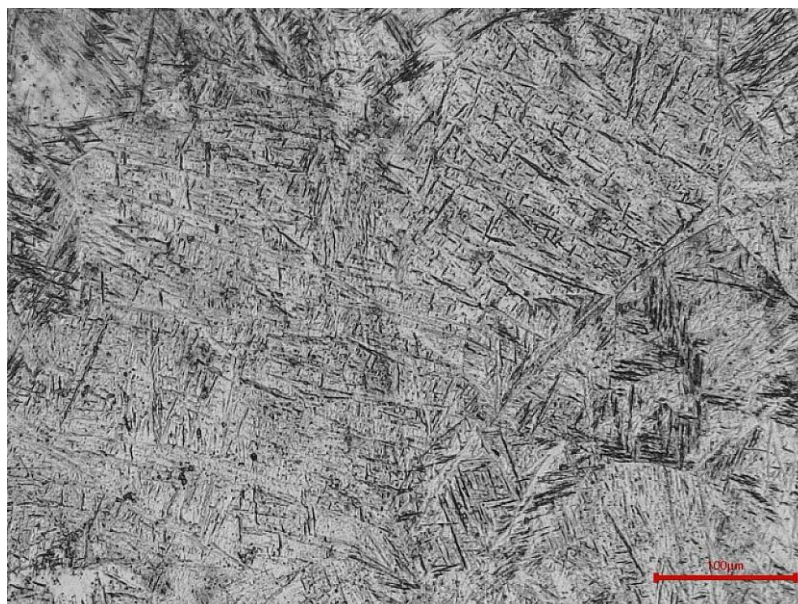
*Рис. 1.* Микроструктура сплава Ti-10V-2Fe-3Al при увеличении 100 мкм



*Рис. 2.* Распределение зёрен

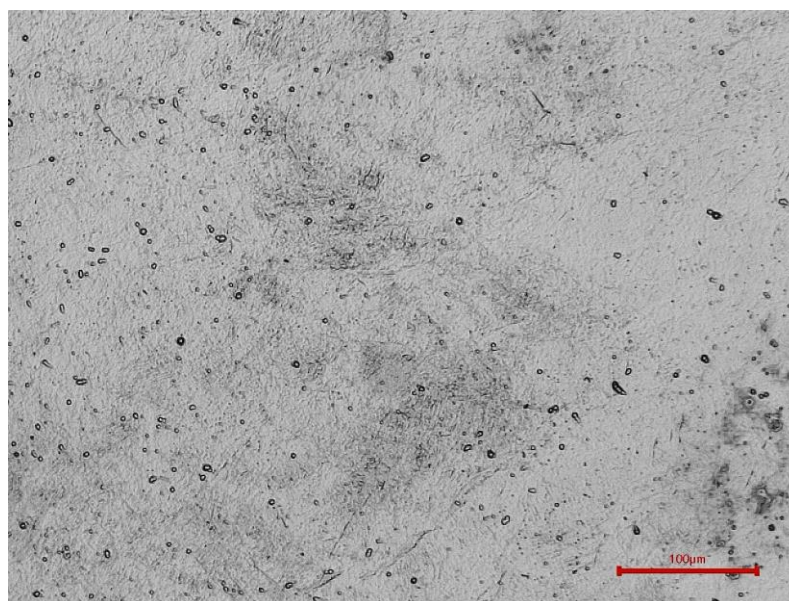
Гистограмма распределения зёрен имеет логнормальное распределение, что свидетельствует об однородности структуры.

*Исследование микроструктуры сплава после термической обработки*



*Рис. 3. Микроструктура сплава после закалки на 850 °С при увеличении ×100 мкм*

*Исследования микроструктуры сплава после ИПДК*



*Рис. 4. Изображение микроструктуры Ti-10V-2Fe-3Al после ИПДК при увеличении ×100 мкм*

После ИПДК происходит значительное измельчение структуры, границы зёрен неразличимы.

*Исследование микротвердости сплава Ti-10V-2Fe-3Al в исходном состоянии, после закалки и ИПДК*

Полученные экспериментальные данные микротвердости образцов отображены в гистограмме:

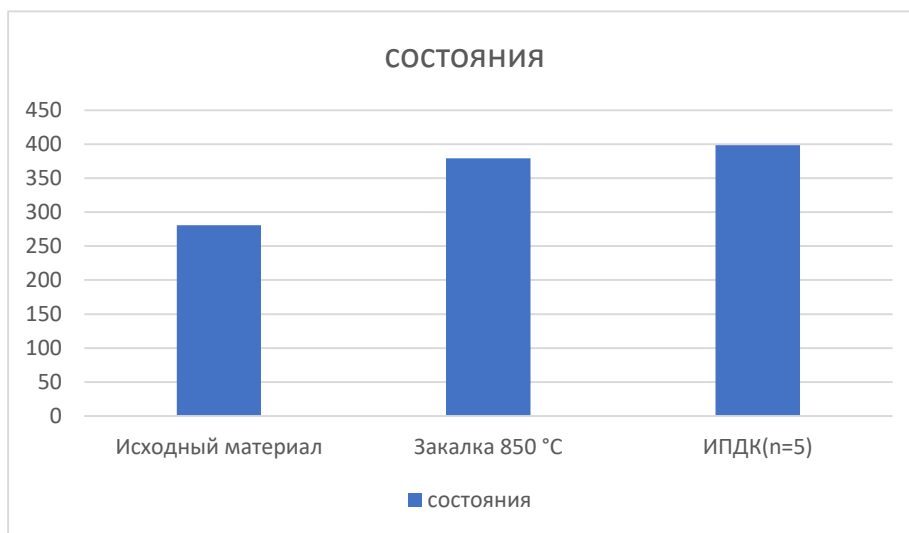


Рис. 5. Гистограмма распределения значений микротвердости

Исследование микротвердости показало, что в исходном состоянии микротвердость составляет  $281 \pm 13$  Нв, закалка при температуре  $850$  °С приводит к увеличению значения микротвердости до  $379 \pm 13$  Нв, после ИПДК при  $n=5$  значение микротвердости увеличивается до  $399 \pm 18$  Нв.

### Выводы

1. Были исследованы микроструктуры исходного состояния, после закалки и ИПДК. Средний размер зерна в исходном состоянии составляет  $50 \pm 4$  мкм, в результате закалки и ИПДК микроструктуру привело к значительному измельчению.

2. Микротвердость в исходном состоянии составила  $281 \pm 13$  НВ, после закалки при  $850$  °С составила  $379 \pm 13$  НВ, а при ИПДК при  $n=5$   $399 \pm 185$  НВ. Применение ИПДК привело к значительному росту микротвердости.

### Библиографический список

1. Е.Н. Кондрашов, К.А. Русаков, М.О. Ледер, Д.С. Куликов. Определение теплофизических свойств сплава Ti-10V-2Fe-3Al при ВДП. Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. – 50 с.
2. А.В. Желнина, А.Г. Илларионов, М.С. Калиенко, А.А. Попов, Н.В. Щетников. Влияние содержания углерода на структуру и механические свойства сплава Ti-10V-2Fe-3Al. Научно-исследовательская работа. 2018. – 232 с.
3. Цвиккер У. Титан и его сплавы. 1979. – 510 с.
4. Гаврилов Д.И., Карягин М.О., Нуяндин В.Д. Титан: свойства, получение, применение. Научная статья. 2017.

© Гумерова Ф.Ф., 2023

А.Р. ДАЛИМОВА

*dalimovaalina8@gmail.com*

Науч. руковод. – доктор физ.-мат. наук, проф. И.В. АЛЕКСАНДРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВА CU-2%BE В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ**

*Аннотация:* В данной статье представлен обзор научной литературы и результаты исследования, которые показывают, что процесс старения сплавов ведет к образованию твердых растворов и отдельных фаз, которые способствуют увеличению микротвердости материала. При повышении температуры до 300 градусов происходит образование дополнительных равновесных фаз, которые улучшают механические свойства сплава. При нагревании сплава до высокой температуры происходит перемещение дислокаций в кристаллической структуре, что может приводить к росту зерна. Кроме того, старение сплавов может вызывать объемный рост зерен путем образования новых зерен или слияния уже существующих зерен. Это происходит за счет изменения состава сплава и диффузии атомов внутри зерен. В результате увеличивается размер зерна сплава и изменяются его механические свойства.

*Ключевые слова:* процесс старения сплавов; механические свойства; рост зерен

Бериллиевые бронзы – это сплавы меди с добавлением бериллия. Они обладают высокой стойкостью, жаростойкостью и случаями возникновения. Бериллиевые бронзы широко применяются в производстве высокотехнологичной электроники, литейных форм, инструментов, пружин и других изделий, которые работают в условиях высокого охвата и температуры. Тем не менее, бериллий - чувствительный элемент, поэтому при работе с бериллиевыми бронзами необходимо соблюдать осторожность и соблюдать меры безопасности. Свойства сплавов Cu-Be действительно тесно связаны между собой, к осаждению наноразмерных частиц, богатых бериллием, при старении. Так же есть большой размер несоответствие между атомами Be и Cu, что может привести к сильным взаимодействиям между атомами бериллия и кристаллическими дефектами, такие как дислокации и границы зерен [2].

Бериллиевые бронзы – пример сплава, в котором растворимость компонентов друг в друге зависит от температуры. При закалке твёрдый раствор бериллия и меди становится пересыщенным, в нём появляется избыточное число атомов легирующего элемента. Такой твёрдый раствор неустойчив и при повышении температуры легко распадается.

Чаще всего в промышленных условиях получают сплав Cu-Be, в котором содержится 2% Be. В закалённом состоянии этот сплав отличается высокими показателями технологичности и пластичности, в условиях термической обработки механические свойства сплава (например, прочность, предел текучести) возрастают

На рис. 1 представлена диаграмма состояния сплавов системы Cu-Be. Медь образует с бериллием твердые растворы замещения с решеткой ГЦК, причем с понижением температуры растворимость бериллия в меди падает с 2,7% при 886 °С до 0,2% при 300 °С. Использование переменной растворимости позволяет достичь значительного упрочнения при термической обработке [3].

При нагреве бериллиевой бронзы, содержащей 2,0–2,5% Be, до 760-780 °С образуется однородный  $\alpha$ -твердый раствор. После быстрого охлаждения эта структура сохраняется при комнатной температуре.

Для сплава с 2 % Be видны три критические точки. До температуры первой точки жидкий расплав охлаждается. Число степеней свободы будет равно  $s=2-1+1=2$ . В интервале температур точек 1-2 из жидкого расплава кристаллизуется твердая  $\alpha$ -фаза ( $\alpha$ -Cu).

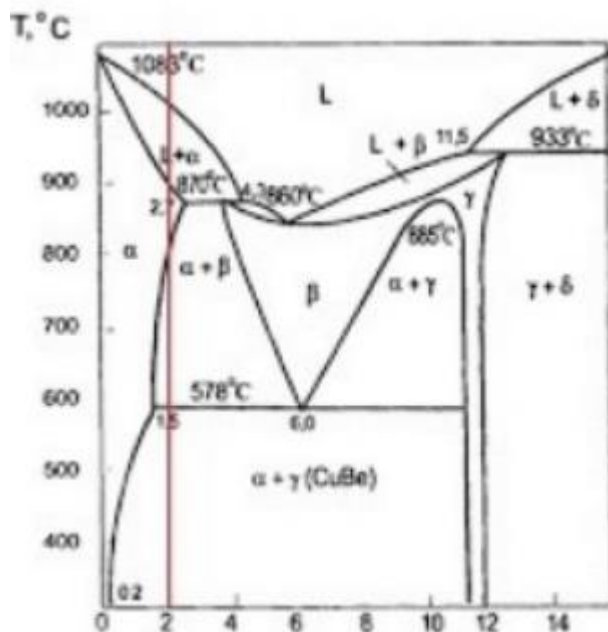


Рис. 1. Диаграмма состояния структуры CuBe [3].

В равновесии с  $\alpha$ -твердым раствором бериллия в меди в твердом состоянии могут находиться фазы  $\beta$  и  $\gamma$ . Равновесная  $\gamma$ (CuBe) фаза - твердый раствор на основе соединения CuBe - имеет упорядоченную ОЦК решетку. Такую же решетку, но неупорядоченную имеет  $\beta$ -фаза. Фаза  $\beta$  устойчива только до температур 578 °С, при которой она претерпевает эвтектоидный распад  $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$  (CuBe) [3].

При термической обработке бериллиевых бронз существенным является выбор температуры нагрева под закалку ( $T_{\text{зак}}$ ). Ее значение определяет полноту перевода легирующих элементов в твердый раствор и возможность гомогенизации. С точки зрения указанных факторов, предпочтительно

повышение температуры закалки. Диапазон температур нагрева под закалку бериллиевых бронз составляет 760...800 °С. Выше указанных температур бронзы нагревать не следует из-за опасности роста зерен и ухудшения служебных характеристик сплава. Нагрев под закалку ниже оптимальной температуры уменьшает пересыщение  $\alpha$ -твердого раствора бериллием в закаленном сплаве и интенсифицирует прерывистый распад при старении с образованием грубой двухфазной структуры с некогерентным выделением  $\gamma$ -частиц в приграничных участках [1].

В систему сплава Cu–Be добавляется небольшое количество Be для повышения прочности за счет старения твердеющих осадков. Такие сплавы на основе меди обладают наибольшей прочностью всех медных сплавов, а также сохраняют свои полезные электрические и тепловые свойства в различных условиях эксплуатации [4]. Результаты показывают, что формирование мелкозернистой структуры и частицы фаз –  $\gamma$  улучшают механические свойства сплава. Тем не менее они не снижают скорость износа. Это объясняется способностью образцов сохранять соединения, богатые кислородом во время испытания на сухое скольжение [5].

Для исследований был выбран медный сплав с содержанием 2% масс Be. В дальнейшем будем использовать маркировку Cu-2%Be. Образцы сплава Cu-2%Be исследовали в нескольких структурных состояниях: исходном и после закалки и старения. За исходное принято состояние, полученное после термической обработки прутков по режиму: отжиг при 780 °С в течение 30 минут, затем закалка быстрым погружением в воду.

Микроструктуру образцов изучали с помощью оптического микроскопа OLYMPUS QX 51 при увеличениях 50, 100, 200. Для получения четкого изображения шлифа фокусировку проводили при помощи макрометрического винта.

Подготовка образцов к съемке на оптическом микроскопе включала шлифовку, полировку и травление.

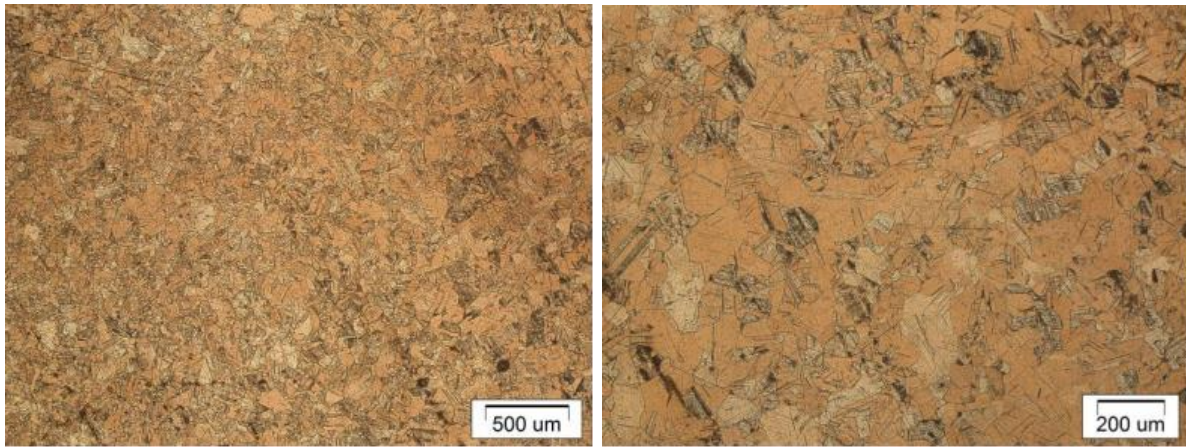
При шлифовке исследуемый материал обрабатывался на абразивной бумаге различной зернистости с постепенным переходом от более грубого (P1000) к более тонкому (P4000) абразиву.

Полировку осуществляли на алмазных пастах с постепенным переходом от более крупных зерен пасты (3/2) к более мелким (1/0). Для удаления остатков пасты образцы промывались в ацетоне.

Химическое травление осуществляли реактивом состава 50% аммиака, 50% водорода пероксида с погружением на 5-10 секунд и дальнейшей промывкой в водном растворе FeCl<sub>3</sub>. После травления образцы тщательно промывались в дистиллированной воде и высушивались на фильтровальной бумаге [8].

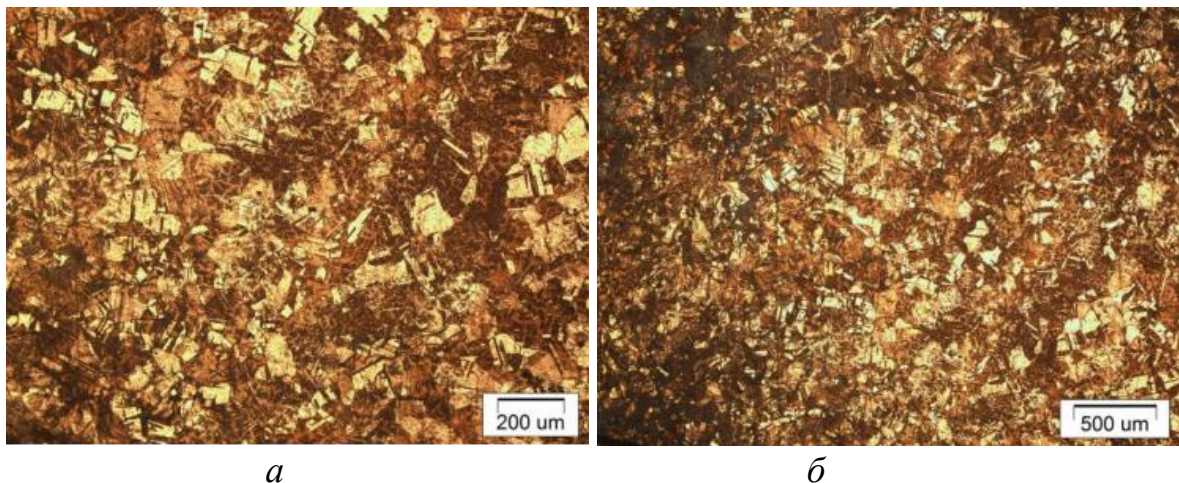
В исходном состоянии после закалки (рис. 2) наблюдаются четкие границы зерен, зерна имеют равноосную форму и наблюдаются двойники отжига.





*Рис. 2.* Исходное состояние Cu-2%Be при увеличении:  
*a* – x50;  
*б* – x100

Размер зерен исходного состояния сплава Cu-2%Be находится в интервале 0 – 330 мкм (рис. 2), средний размер зерен с учетом двойников составляет:  $68 \pm 6$  мкм.



*Рис. 3.* Микроструктура сплава Cu-2%Be после старения при увеличении:  
*a* – x100;  
*б* – x50

Средний размер зерен после старения сплава Cu-2%Be составляет  $74 \pm 27$  мкм (рис. 3)

В исходном состоянии после закалки микротвердость сплава Cu-2%Be составляет  $144 \pm 16$  HV. После старения значение микротвердости значительно увеличивается, примерно в 2 раза, и составляет  $299 \pm 25$  HV (рис. 4).

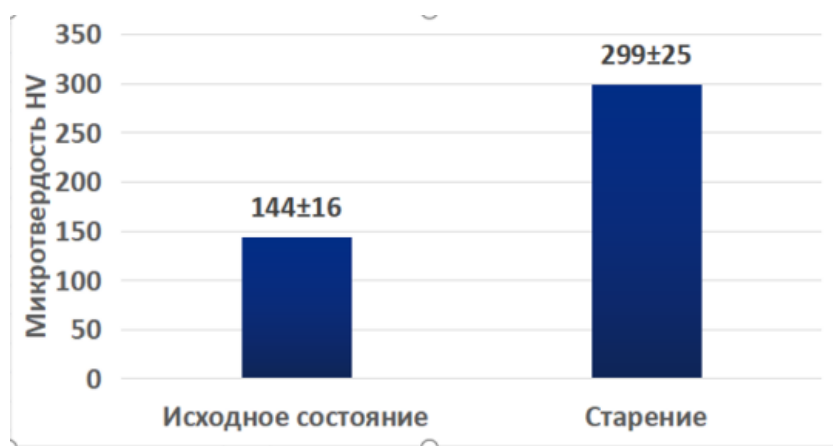


Рис. 4. График изменения микротвердости исходного состояния и состояния после старения

Таким образом, проведение закалки и последующего старения при температуре 300 °С позволяет повысить микротвердость в три раза по сравнению с исходным состоянием с  $144 \pm 16$  HV до  $299 \pm 25$  HV.

В данной работе было продемонстрировано, что микротвердость сплава увеличилась с  $144 \pm 16$  HV в состоянии после закалки до  $299 \pm 25$  HV в состоянии после старения. Процесс старения сплавов ведет к образованию твердых растворов и отдельных фаз, которые способствуют увеличению микротвердости материала. При повышении температуры до 300 градусов происходит образование дополнительных равновесных фаз, которые улучшают механические свойства сплава. Также старение сплава может влиять на микроструктуру материала, что также может привести к увеличению микротвердости. Размер зерна сплава немного увеличился с  $68 \pm 27$  мкм в состоянии после закалки до  $74 \pm 27$  мкм. Увеличение размера зерна сплава после старения до 300 градусов связано с процессом рекристаллизации, который происходит в металлической структуре сплава.

### Библиографический список

1. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. «Медь и медные сплавы отечественные и зарубежные марки»: учебное пособие // Москва, 2004. – 50 с.
2. Информация с сайта GPT [Электронный ресурс] / Бериллиевые бронзы. // Режим доступа: <https://gpt-chatbot.ru>
3. Информация с учебника «Материаловедение» / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин // 2004. – 734 с.
4. Effects of cold working and heat treatment on microstructure and wear behaviour of Cu–Be alloy C17200 A. Khodabakhshi\*1 / V. Abouei 2, N. Mortazavi 3, S. H. Razavi 4, H. Hooshyar5 and M. Esmaily5.
5. Effects of cold working and heat treatment on microstructure and wear behaviour of Cu–Be alloy C17200 / A. Khodabakhshi, V. Abouei, N. Mortazavi, S.H. Razavi, H. Hooshyar & M. Esmaily.

6. Investigation of metastable precipitate using HRTEM in aged Cu–Be alloy  
Levent Yagmur a, \*/ Ozgur Duygulub, 1, Bulent Aydemir // a, 2

7. Effect of Heat Treatment on the Mechanical properties of /CopperBeryllium alloy (C17200) Alisha S1, a, Venkateswaran T2, b\*, Amruth M3, c, Chakravarthy P4, d, Sivakumar // D2, e.

8. Лахтин Ю.М. Леонтьева В.П. Машиностроение. // 3-е издание, 1990. – 88 с.

9. Информация с сайта / «Википедия» [Электронный ресурс] – метод виккерса // . Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>

10. Takatoshi Morimitsu, Naoki Takata, Daisuke Terada Analysis // of deformation behaviors of ultrafine grained Cu-2%Be with bimodal grain-size distribution/ Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – P. 240.

© Далимова А.Р., 2023

УДК 669.715

А.Р. ЗАЙНУЛЛИНА

*adelina27032003@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук Л.И. ЗАЙНУЛЛИНА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЛ30**

*Аннотация:* В данной работе изучалось влияние термообработки на микроструктуру и механические свойства сплава АЛ30 сплава. Режимы термообработок определялись в соответствии ГОСТ. Показано, что термообработка приводит к изменению микроструктуры по сравнению с исходным литым состоянием. После гомогенизации происходит уменьшение микротвердости в целом по сравнению с исходным состоянием, последующая закалка приводит к повышению значения микротвердости.

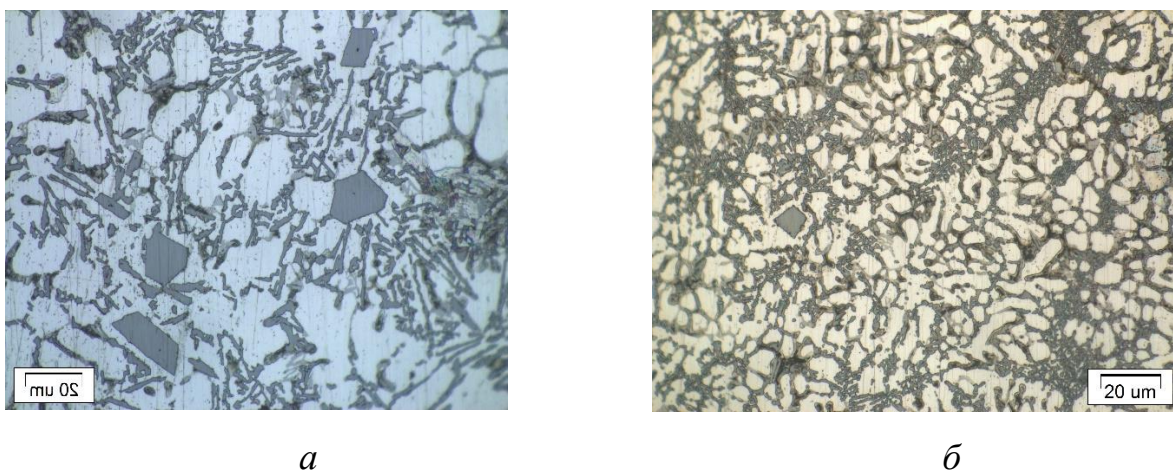
*Ключевые слова:* закалка; гомогенизация; силумины; микроструктура

К литейным поршневым сплавам относят силумины, в основе легирующего компонента которых находится кремний с содержанием до 23% [1]. В силуминах сочетаются механические свойства такие, как твердость, коррозионная стойкость. Обладая наилучшим сочетанием свойств, сплав широко применяется для изготовления поршней двигателей. Как известно, поршни имеют заданные механические характеристики, но в ходе эксплуатации структура сплава претерпевает изменения и качество поршня меняется. Изменения приводят к снижению уровня свойств по всему сечению детали, что

свидетельствует о недостаточной термической стабильности структуры сплава в его первоначальном состоянии [2]. Целью данной работы является изучение влияния термообработки на структуру и свойства сплава АЛ30.

В качестве материала для исследования был выбран алюминиевый сплав АЛ30 с содержанием 14,9 вес. % Si. В работе рассматривается образец в исходном состоянии с центральной части и периферии, а также после гомогенизации и последующей закалки. Сплав в исходном состоянии получен методом литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). Литье ЭМК отличается от разновидностей литья слитков за счет отсутствия контакта расплавленного металла со стенками формы, что приводит к повышению качества поверхности слитка [3]. Помимо бесконтактного формообразования при литье в ЭМК обеспечивается повышение скорости охлаждения слитков. Это происходит вследствие того, что охлаждение осуществляется струйной подачей воды непосредственно на поверхность слитка возле фронта кристаллизации. Гомогенизации сплав подвергали при температуре 470 °С в течение 7 часов. Последующую закалку осуществляли с выдержкой при температуре 515 °С в течение 1 часа и охлаждением в воде. Микроструктуру образцов изучали с помощью оптического микроскопа OLYMPUS QX 51. Микротвердость сплава АЛ30 по Виккерсу определяли путем вдавливания алмазного наконечника с нагрузкой 100 г в течение 10 секунд.

Микроструктура сплава в исходном состоянии представляет собой дендритную структуру (рис. 1 а, б). По сечению образца наблюдаются отличия в размерах дендритов.



*Рис. 1.* Микроструктура сплава АЛ30 в исходном состоянии:

*а* – центральная часть;

*б* – периферия

В центральной части образца размер дендритов составляет: длина  $L_{cp} = 23,4 \pm 0,6$  мкм и толщина  $l_{cp} = 9,8 \pm 0,4$  мкм (рис. 1 а). На периферии размер дендритов составляет: длина  $L_{cp} = 11,3 \pm 0,4$  мкм, толщина  $l_{cp} = 4,0 \pm 0,1$  мкм (рис. 1 б). Стоит отметить, что в литой микроструктуре наблюдаются первичные частицы кремния. Объемная доля кремниевых частиц на периферии образца

составляет меньше 1% ( $V_{\text{частиц}} = 0,24 \pm 0,04\%$ ), в центральной части значение объемной доли выше и составляет  $V_{\text{частиц}} = 1,25 \pm 0,04\%$ . Это можно объяснить различием скоростей охлаждения в зонах слитка.

После проведения гомогенизации при температуре  $470\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 7 часов в микроструктуре происходит сфероидизация частиц (рис. 2 а, б). Первичные частицы кремния также присутствуют в структуре. Дендритная структура сохраняется по зонам слитка. Размер дендритных ячеек практически не изменяется по сравнению с исходным состоянием. В центральной части размер ячеек составляет: длина  $L_{\text{ср}} = 23,0 \pm 0,5\text{ мкм}$  и толщина  $l_{\text{ср}} = 10,0 \pm 0,4\text{ мкм}$  (рис. 2 а). Также имеются различия в центральной зоне и на периферии сплава. На периферии размер ячеек составляет: длина  $L_{\text{ср}} = 17,7 \pm 0,5\text{ мкм}$  и толщина  $l_{\text{ср}} = 7,0 \pm 0,2\text{ мкм}$  (рис. 2 б).

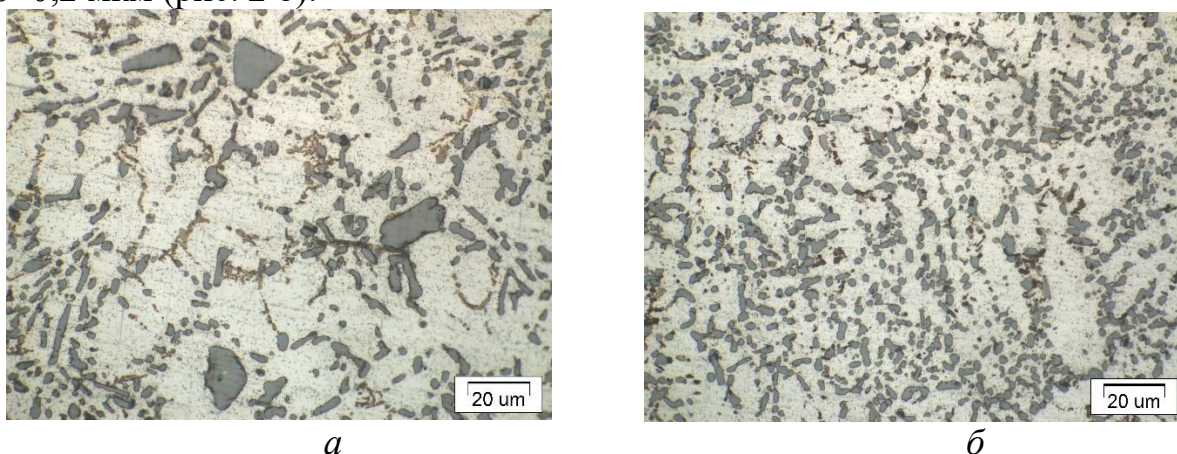


Рис. 2. Микроструктура сплава АЛ30 после гомогенизации:  
а – центральная часть;  
б – периферия

Микроструктура сплава после гомогенизации и последующей закалки представлена на рис. 3 а, б. Стоит отметить, что дендритная структура исчезает как в центральной части слитка, так и на периферии (рис. 3 а, б).

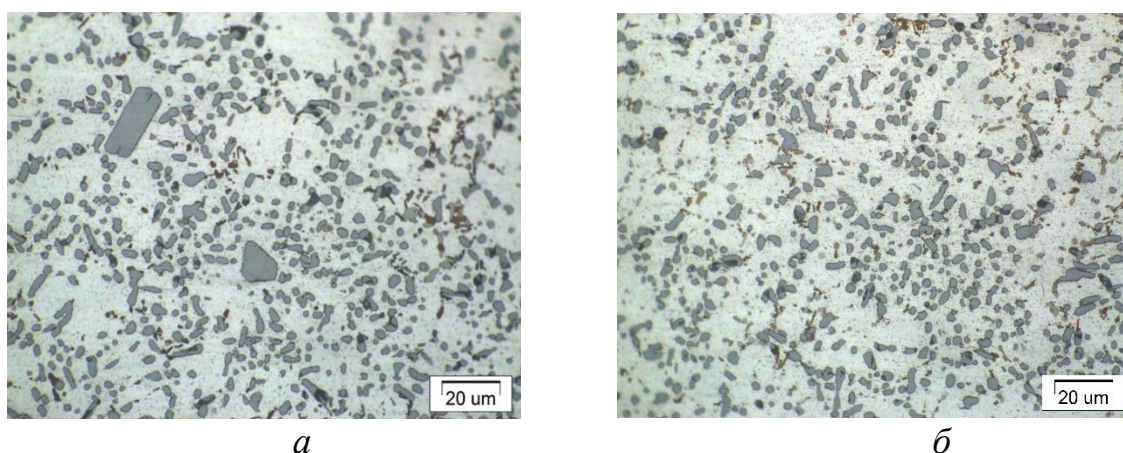


Рис. 3. Микроструктура сплава АЛ30 после гомогенизации и последующей закалки:  
а – центральная часть; б – периферия

В структуре также присутствуют первичные частицы кремния. Сфероидизированные частицы располагаются равномерно по матрице сплава АЛ30 (рис. 3).

В табл. 1 приведены значения микротвердости сплава АЛ30 в исходном состоянии и после термообработок. В исходном литом состоянии значительной разницы в микротвердости по зонам слитка не наблюдается. В центральной части образца значение микротвердости составляет  $139\pm 7$  НВ, а на периферии -  $134\pm 7$  НВ. После проведения гомогенизации в целом происходит уменьшение микротвердости по сравнению с исходным состоянием (табл. 1). На периферии образца происходит уменьшение микротвердости с  $134\pm 7$  НВ в исходном состоянии до  $88\pm 5$  НВ. В центральной части образца наблюдается снижение микротвердости с  $139\pm 7$  НВ в исходном состоянии до  $84\pm 5$  НВ.

*Таблица 1*

Микротвердость сплава АЛ30

	Исходное состояние	ГО	ГО + закалка
Периферия	$134\pm 7$ НВ	$88\pm 5$ НВ	$124\pm 4$ НВ
Центральная часть	$139\pm 7$ НВ	$84\pm 5$ НВ	$124\pm 4$ НВ

Последующая закалка привела к повышению значений микротвердости сплава АЛ30 по сравнению с гомогенизацией. На периферии микротвердость увеличилась с  $88\pm 5$  НВ после гомогенизации до  $124\pm 4$  НВ. В центральной части образца микротвердость увеличилась с  $84\pm 5$  НВ после гомогенизации до  $124\pm 4$  НВ. Это может быть связано с образованием пересыщенного твердого раствора с растворенными легирующими элементами.

Таким образом, по полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Проведение гомогенизации привело к сфероидизации частиц с сохранением дендритной структуры.

2. Микротвердость сплава после гомогенизации уменьшилась с  $139\pm 7$  НВ и  $134\pm 7$  НВ на периферии и в центре образца в исходном состоянии до  $88\pm 5$  НВ и  $84\pm 5$  НВ, соответственно.

3. Последующая закалка привела к равномерному расположению частиц в матрице. Значения микротвердости увеличились по сравнению с гомогенизацией до  $124\pm 4$  НВ на периферии и  $120\pm 4$  НВ в центре образца.

### Библиографический список

1. Белов, Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов: монография / Н.А. Белов. – М.: Изд. дом МИСиС, 2010. – 511 с.

2. Лоза, К.Н. Повышение жаропрочности поршневого сплава АЛ25 / К.Н. Лоза, А.А. Митяев, И.П. Волчок // Литье и металлургия. – 2010. – № 3 (57). – С. 73-77.

3. Авдулова, А.А. Технология литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор для производства длинномерных заготовок малого диаметра / А.А. Авдулова, Г.П. Усынина, Н.В. Сергеева, И.С. Гудкова // Журнал Сибирского Федерального Университета. Химия. – 2017. – № 10 (1). – С. 82-89.

© Зайнуллина А.Р., 2023

УДК 669.018.8

Э.И. ИСХАКОВА

*elmira.iskhakova.74@mail.ru*

Науч. руковод. – доцент А.А. ЧУРАКОВА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ В КРУПНОЗЕРНИСТОМ СОСТОЯНИИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ СТАРЕНИЕМ**

*Аннотация:* Проведена закалка и старение образцов сплава  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ . Анализ микроструктуры сплава в исходном закаленном состоянии, после старения в диапазоне температур 350–600 °С методами оптической металлографии, растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Была измерена микротвердость в различных состояниях.

*Ключевые слова:* никелид титана; закалка; старение

### **Введение**

Сплавы на основе никелида титана ( $TiNi$ ) принадлежат к классу функциональных материалов с эффектами памяти формы (ЭПФ) и сверхупругости (СУ), обусловленными термоупругими мартенситными превращениями «В2-В19'», протекающими в диапазоне температур, близких к комнатным [1-4].

Сплав с памятью формы – это материал, претерпевающий фазовое превращение при механическом воздействии или при изменении температуры. Сплав «вспоминает» свою исходную форму и возвращается к ней, когда условия снова становятся нормальными.

Самыми распространенными из сплавов с памятью формы являются сплавы на основе  $TiNi$  (никелид титана). Эти сплавы широко применяются в медицине для изготовления инструментов и имплантатов, а также во многих

отраслях промышленности, благодаря их уникальным набором свойств - высокими значениями восстанавливаемой деформации и развиваемых усилий, высокой коррозионной стойкостью. Для многих применений часто необходимо, чтобы температуры мартенситных превращений сплава были выше комнатных, такими температурами перехода обладают сплавы TiNi состава близкого к эквиаtomному. Вместе с тем, эквиатомный сплав TiNi хорошей стабильности функциональных свойств не проявляет[1-2].

### Материал и методика исследования

Высокотемпературная фаза никелида титана представляет собой атомно-упорядоченное интерметаллидное соединение с B2 (ОЦК) решеткой типа и является твердым раствором замещения. К настоящему времени известно, что в сплавах TiNi при охлаждении происходят термоупругие обратимые МП двух типов в зависимости от химического состава сплава: B2→B19', B2→R.

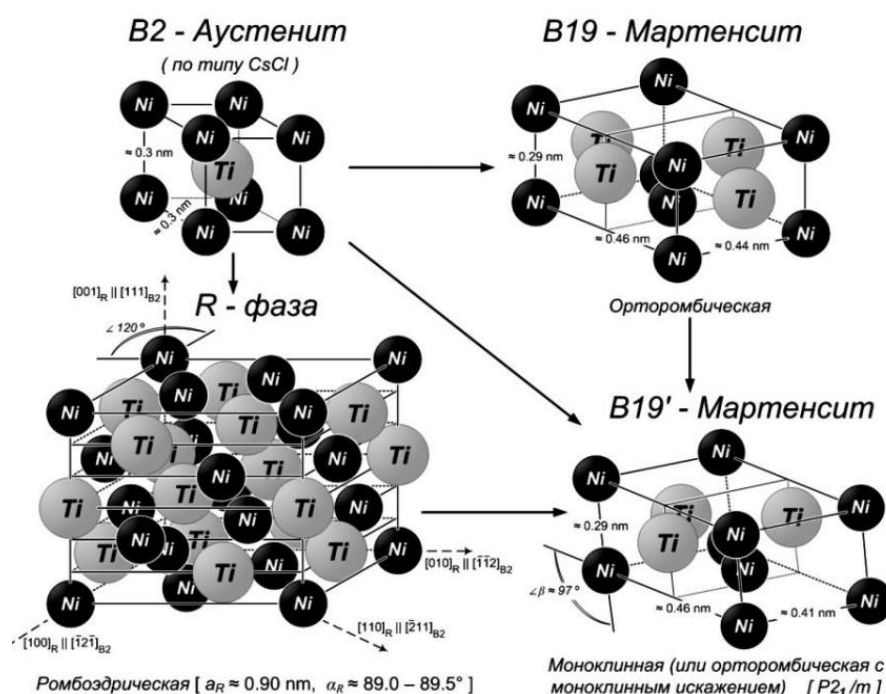


Рис. 1. Кристаллические решетки характерных фаз в сплавах TiNi [5]

Для появления промежуточной R-фазы необходимо наличие некоторых условий:

- 1) Сплав системы TiNi легирован несколькими процентами Fe или Al.
- 2) Сплав TiNi, обогащенный Ni относительно стехиометрии, выдержан при температуре, соответствующей выделению преципитатов фазы  $Ti_3Ni_4$ .

Аустенитная фаза B2 характеризуется стабильностью структуры, высокими прочностными свойствами, высоким электрическим сопротивлением. Данному состоянию присуща объёмно-центрированная кубическая кристаллическая решётка. Полностью в фазе B2 сплав находится при значениях температуры выше 100°C.



Мартенситная фаза В19 и В19' характеризуется нестабильной структурой, сравнительно низкими прочностными характеристиками и низким электрическим сопротивлением.

Старение материала – процесс термообработки, который заключается в выдержке закаленного материала при некоторой температуре (ниже температуры закалки) в течение определенного времени. В процессе старения материала протекают процессы перехода фазового состава и структурного состояния материала в сторону их равновесных значений при температуре старения, которая ниже температуры рекристаллизации материала. Это дает возможность управлять процессами выделения новых фаз в материале и структурой материала.

В двойных сплавах TiNi, обогащенных никелем (содержание Ni > 50,5 ат. %) присутствует сильная зависимость температур МП, прочностных свойств В2-фазы и функциональных свойств от предварительной обработки – термомеханической или термической. Это связано с выделением новых фаз, частицы, которые имеют отличную от матрицы кристаллическую структуру и не испытывают МП в ходе предварительной обработки [6].

Старение вызывает снижение мартенситного превращения и изменение микроструктуры сплава. Эти эффекты приводят к снижению механической прочности и деформационной способности сплава.

### **Экспериментальная часть**

Материалом исследования служил сплав  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ , имеющий аустенитную решетку (В2). Аустенитная фаза В2 переходит в новую мартенситную фазу В19', происходит прямое В2-В19' превращение. После закалки образцы подвергли отжигу в диапазоне температур 350-600 °С. Исследование микроструктуры проводилось при помощи оптической металлографии, растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа. Также была измерена микротвердость.

В исходном состоянии средний размер зерна был  $34 \pm 7$  мкм, далее с увеличением температуры отжига наблюдается рост зерна и в конечном итоге средний размер достиг  $57,1 \pm 9$  мкм (при температуре 600 °С).

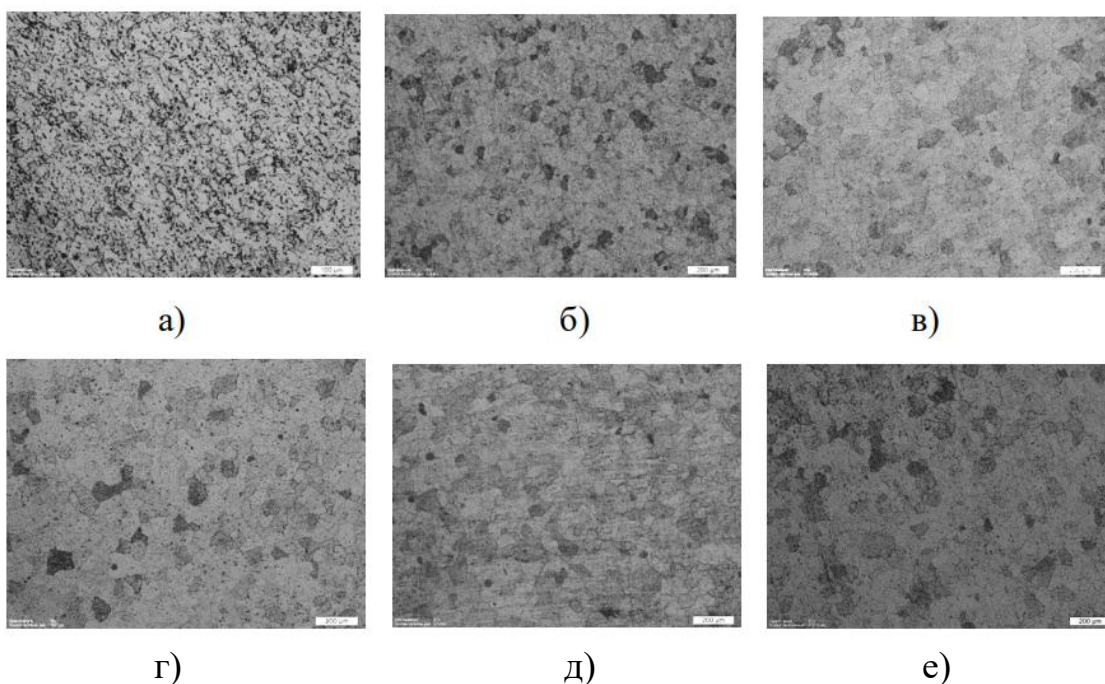


Рис. 2. Микроструктура крупнозернистого сплава  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$  с последующими отжигами при температурах:  
*a* – закалка; *б* – 350 °С; *в* – 400 °С; *г* – 450 °С; *д* – 500 °С; *е* – 600 °С

Рентгеноструктурный анализ позволил нам узнать, что структура сохраняет аустенитный характер (пики B2 фазы), однако после отжига также наблюдается небольшой по интенсивности пик мартенситной фазы B19'. Его небольшая интенсивность говорит о малой доле данной фазы.

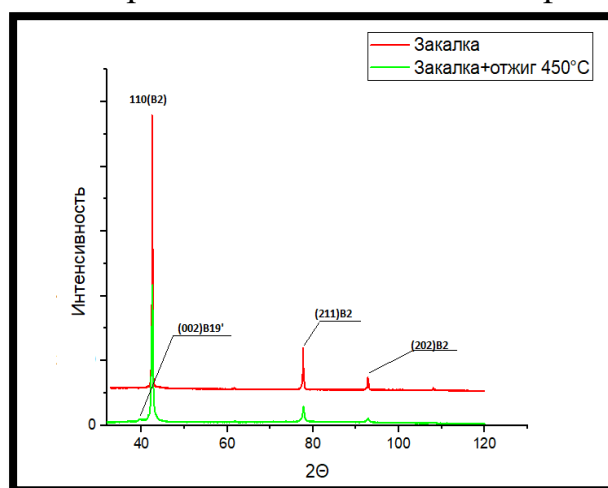
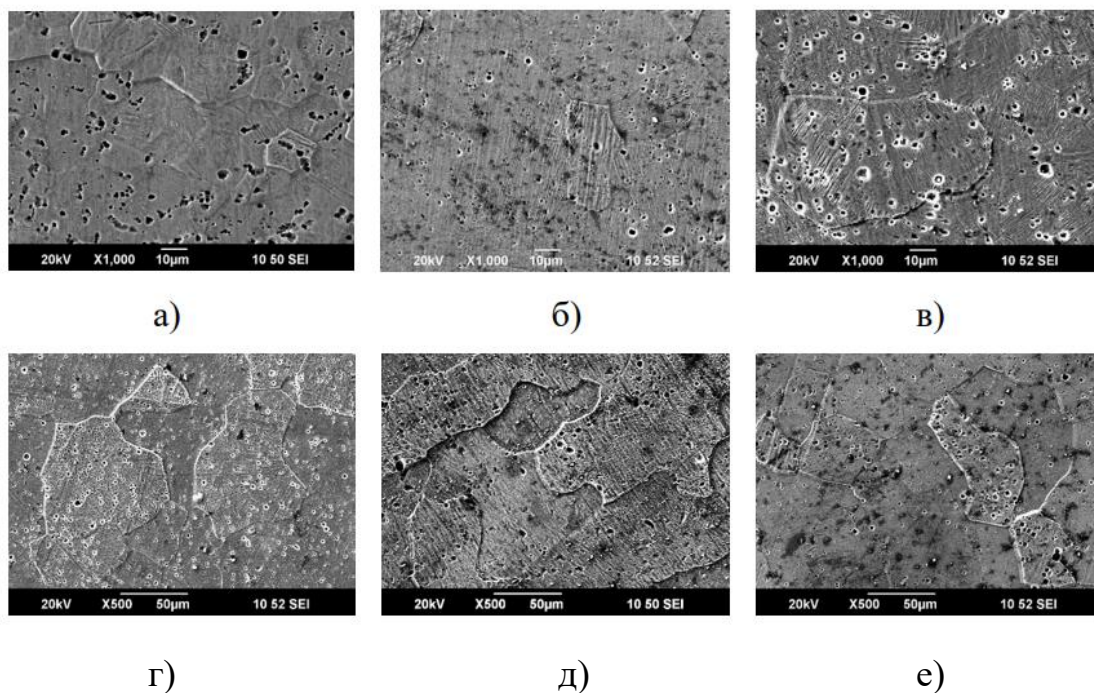


Рис. 3. Рентгенограмма крупнозернистого сплава  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$

По данным РЭМ, мы видим, что микроструктура после отжига, проведенного при температуре 350 °С представляет собой аустенитную структуру с небольшой долей выделившихся частиц старения. Увеличение температуры отжига до 450 °С приводит к тому, что увеличивается доля частиц старения, и внутри зерен наблюдается мартенситный рельеф, свидетельствующий об окончании процесса старения. Старение при 500 °С

способствует росту зерен и более равномерному распределению частиц. Хорошо видны небольшие образовавшиеся частицы старения при температуре 600 °С.



*Рис. 4.* Микроструктура КЗ сплава Ti<sub>49,2</sub>Ni<sub>50,8</sub> с последующим отжигом при:  
*a* – закалка; *б* – 350 °С; *в* – 400 °С; *г* – 450 °С; *д* – 500 °С; *е* – 600 °С

### Испытания на микротвердость

Исходя из данных (табл. 1), мы видим, что микротвердость уменьшается при увеличении температуры отжига.

*Таблица 1*

Состояние	Закалка	Отжиг при 350 °С	Отжиг при 400 °С	Отжиг при 500 °С	Отжиг при 600 °С
Микротвердость, НВ	253,6 ± 20,2	332,5 ± 47,2	286 ± 36,7	281,8 ± 19,4	262,2 ± 22,8

### Выводы

В данной работе были проведены исследования сплава Ti<sub>49,2</sub>Ni<sub>50,8</sub> в крупнозернистом состоянии с последующими отжигами в диапазоне температур старения 350–600 °С.

Был рассчитан средний размер зерна для каждого состояния, исследована микроструктура при помощи оптического микроскопа и РЭМ, выполнены исследования фазового состава сплава методом рентгеноструктурного анализа и измерена микротвердость. Согласно данным по микроструктуре, мы видим, что повышение температуры отжигов приводит к уменьшению микротвердости, вследствие увеличения роста размера зерна и частиц.

## Библиографический список

1. Гюнтер В.Э., Домбаев Г.Ц., Сысолятин П.Г. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. – Томск: ТГУ. – 1998. – 486 с.
2. Потекаев А.И., Клопотов А.А., Матюнин А.Н., Марченко Е.С., Гюнтер В.Э., Джалолов Ш.А. Влияние фазового наклепа на предмартенситные состояния и на мартенситные превращения в многокомпонентных сплавах Ti (Ni, Co, Mo) с эффектами памяти формы//Материаловедение. – 2010. – № 12. – С. 37 - 44.
3. В.Р. Жезленков, А.А. Тайлашев, В.В. Соторов, А.А. Клопотов // Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов – Томск, 24–27 апреля, 2012. – С. 101–103.
4. Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н., Ясенчук Ю.Ф., Чекалкин Т.Л., Овчаренко В.В., Клопотов А.А., Дамбаев Г.Ц., Сысолятин П.Г., Фомичев Н.Г., Олесова В.Н., Миргазизов М.З., Проскурин А.В., Зиганьшин Р.В., Поленичкин В.К., Матюнин А.Н., Фатюшин М.Ю., Молчанов Н.А., Моногенов А.Н. Никелид титана: медицинский материал нового поколения - Томск: НПП МИЦ, 2006. – 296 с.
5. Brailovski, V. Shape memory alloys: fundamentals, modeling, applications / V. Brailovski, S. Prokoshkin, P. Terriault, F. Trochu. – Montreal: Ecole de technologie superieure (ETS) Publ., 2003.
6. Журавлев В.Н. Сплавы с термомеханической памятью и их применение в медицине / В.Н. Журавлев, В.Г. Пушкин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 150 с.

© Исхакова Э.И., 2023

УДК 620.18

К.Э. КИРЬЯНОВА, А.Е. МЕДВЕДЕВ

*kristina.kiryanova.2002@mail.ru, medvedevandreyrf@gmail.com*

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

*Уфимский университет науки и технологий*

### **ПОЛУЧЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДНО-АЛЮМИНИЕВОЙ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ПРОВОЛОКИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

*Аннотация:* В данной работе рассмотрены образцы биметаллических проволок с медной оболочкой и сердечником из сплава Al-0,5Fe. Нанесение медного слоя толщиной 0,1 мм производилось электролитическим методом. Омеднение поверхности алюминиевой проволоки не приводит к существенным изменениям предела прочности (около 200 МПа) или электропроводности (около 57,5% IACS) относительно проволоки из сплава Al-0,5Fe аналогичного диаметра,

но значительно снижает величину относительного удлинения до разрушения (с 4,9% до 1,5%) и изменяет характер разрушения при испытаниях на растяжение на хрупкий.

*Ключевые слова:* биметаллические материалы; медно-алюминиевая проволока; электролитическое омеднение; механические испытания; электропроводность

Медь является незаменимым сырьем для различных отраслей промышленности, таких как машиностроение, строительство, электротехника и легкая промышленность [1-3]. Тем не менее медь является относительно дорогостоящим материалом, и ее использование ограничено экономическими соображениями. В связи с этим, поиск более дешевых альтернатив меди является актуальной задачей электротехнической промышленности.

Алюминий является вторым после меди техническим проводником по значению удельной электрической проводимости. В то же время алюминий характеризуется меньшей плотностью по сравнению с медью, и если взять два отрезка алюминиевой и медной проволоки одного и того же электрического сопротивления, то алюминиевый проводник будет иметь больший диаметр, но будет легче приблизительно в 2 раза [4]. Соответственно, алюминий и алюминиевые сплавы могут служить альтернативой меди и медным сплавам, при сохранении уровня электропроводности можно выиграть в массе готового изделия.

В настоящее время широкое применение нашли слоистые металлические композиции. Они успешно используются в области электрических и электронных компонентов благодаря их преимуществам, связанных с высокой проводимостью, низкой плотностью, хорошими характеристиками прочности и ценовой конкурентоспособностью по сравнению с медью и медными сплавами [5, 6]. Композитные материалы на основе алюминия, плакированного медью, могут быть адаптированы для достижения выдающихся свойств, таких как меньший вес, теплопроводность, прочность и производительность сварки. Их вес может быть уменьшен на 35–50%, а их теплопроводность и электропроводность сравнимы с некоторыми медными сплавами [7].

Относительно свежим подходом к получению медь-алюминиевых биметаллических проволок может служить электролитическое осаждение меди на алюминиевой проволоке. Такой подход, по крайней мере в теории, осуществим для серийного производства. Кроме того, он позволяет с более высокой точностью контролировать толщину как медного слоя (и, соответственно, соотношение меди и алюминия в сечении проводника), так и диффузионного слоя, неизбежно возникающего в такого рода материалах. Литературных данных по такому способу получения биметаллических проволок в литературе крайне мало, поэтому предлагаемое ниже исследование можно считать инновационным.

В настоящем исследовании была изучена попытка получения биметаллической проволоки электролитическим методом с медной оболочкой и

сердечником из алюминиевого сплава. В качестве сердечника был выбран электротехнический алюминиевый сплав Al-0,5Fe из-за своих повышенных механических характеристик.

### Материал исследования

В качестве материала исследования были взяты прутки диаметром 11 мм и длиной более 2 м из сплавов системы Al-Fe с содержанием железа 0,5 вес. %, которые были изготовлены методом непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). Химический состав сплава представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава системы Al-0.5Fe

	Si	Fe	Mg	Mn	Cu	Zn
Al-0,5Fe	0,41	0,39	0,39	≤0,035	≤0,035	≤0,035

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 а, б представлены результаты оптической металлографии биметаллической проволоки до и после отжига. Согласно литературным данным [8], рекомендуемая доля меди в сечении в проволоках типа алюминий-медь составляет от 10 до 15%. В данном случае необходимо учитывать толщину никелевого слоя (Рис. 1 а). Электролитическое нанесение никеля и меди на проволоку из алюминиевого сплава привело к образованию химического соединения между металлами. На границе металлов отсутствуют поры, крупные интерметаллидные частицы и иные нежелательные дефекты. Граница алюминий-никель характеризуется включением мелких частиц/неровностей, в то время как граница никель-медь кажется сплошной.

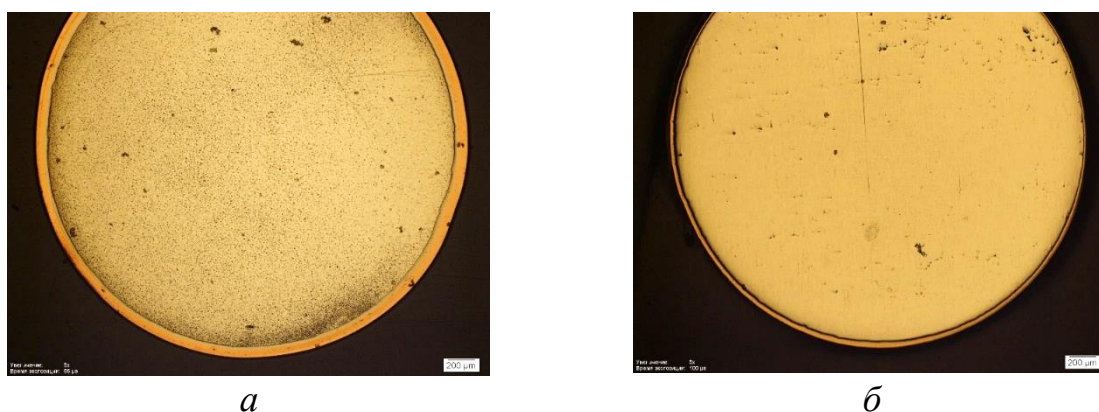


Рис. 1. Металлография поперечного сечения проволоки сплава Al-0,5Fe, покрытого медью:

а – до отжига;

б – после отжига, ОМ

Данные РЭМ показывают наличие переходных слоев алюминий-никель и никель-медь как в исходном, так и в отожжённом образце (рис. 2). Толщина

переходного слоя алюминий-никель не изменяется в результате отжига и составляет 5 мкм, так же, как и толщина слоя никель-медь (3 мкм).



Рис. 2. Металлография поперечного сечения проволоки сплава Al-0,5Fe, покрытого медью:

*а* – до отжига;  
*б* – после отжига, РЭМ

В табл. 2 представлены свойства образцов проволок Al-0,5Fe без медного покрытия и с покрытием. Проволока сплава Al-0,5Fe демонстрирует достаточно высокие показатели механической прочности, сохраняя при этом высокий уровень электропроводности. Электролитическое омеднение не привело к изменению электропроводности и прочности, но значительно (до 1,5%) снизило уровень пластичности проволоки. В результате отжига при 300 °С, 1 ч пластичность материала выросла почти до уровня проволоки без медного покрытия (4,3%), также выросла электрическая проводимость до уровня, превышающего значения проволоки Al-0,5Fe. Предел прочности остался без изменений, в то время как условный предел текучести снизился со 185 МПа до 135 МПа.

Таблица 2

Физико-механические свойства проволок сплава Al-0,5Fe

Образец	Электрические свойства		Механические свойства		
	$\omega$ , МСм/м	IACS, %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
Al-0,5Fe (без покрытия) [25]	29,85±1,0	57,8±0,4	160±10	204±14	4,9±0,4
Al-0,5Fe (с покрытием)	29,68±0,9	57,5±0,5	185±6	187±7	1,5±0,1
Al-0,5Fe (с покрытием) + 300 °С, 1 ч	31,43±0,8	60,9±0,3	135±5	184±6	4,3±0,6

На рис. 3 представлены кривые растяжения образцов проволок Al-0,5Fe без медного покрытия и с покрытием. Образцы проволоки Al-0,5Fe без покрытия разрушаются вязко, кривая характеризуется четко выделенной стадией пластического течения. Образцы, полученные электрохимическим методом, склонны к хрупкому разрушению. Отжиг при 300 °С в течение 1 ч приводит к

появлению на кривой растяжения стадии пластического течения. Омедненные проволоки, как до отжига, так и после, характеризуются двухступенчатой кривой, или двухступенчатым разрушением. Первая ступень соответствует разрыву медно-никелевой оболочки, вторая – разрушения медного сердечника.

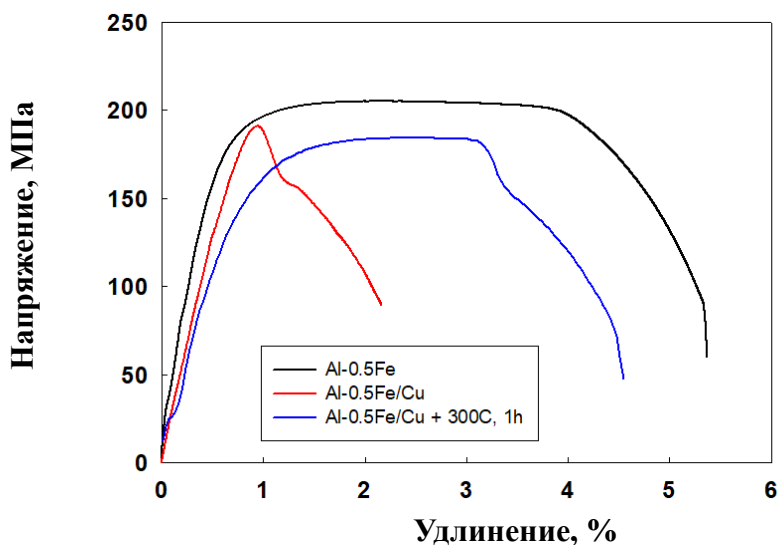


Рис. 3. Инженерные кривые растяжения проволок Al-0,5Fe до и после электрохимического осаждения меди

На рис. 4 представлены результаты фрактографического анализа образцов проволок Al-0,5 Fe без медного покрытия и с покрытием. Проволока без покрытия разрушается вязко, с большой величиной удельного сужения, и характерным ямочным изломом (рис. 4 а).

На снимке образца проволоки с медной оболочкой видно (рис. 4 б), что разрушение алюминия и медно-никелевого слоя происходило неравномерно. Перед разрушением происходит расслоение биметаллического композита – никель отслаивается от алюминия, причем соединение медь-никель лишь частично (рис. 5 б). После отслоения от медно-никелевой оболочки алюминий разрушается вязко, о чем говорит и характерный ямочный вид излома, и достаточно высокая величина относительного сужения образца. Разрушение медно-никелевого слоя происходит хрупко (рис. 4 б), и этот момент соответствует первому пику на кривой растяжения образцов (рис. 3). На рис. 4в представлены результаты фрактографического анализа омедненных проволок, подвергнутых отжигу при 300 °С в течение 1 ч. Медно-никелевая оболочка отслаивается от алюминия в большей степени, нежели в проволоке до отжига (рис. 4 а). Поверхность излома слоистая, характеризуется большим количеством «обломков» медно-никелевой прослойки (рис. 4 б).



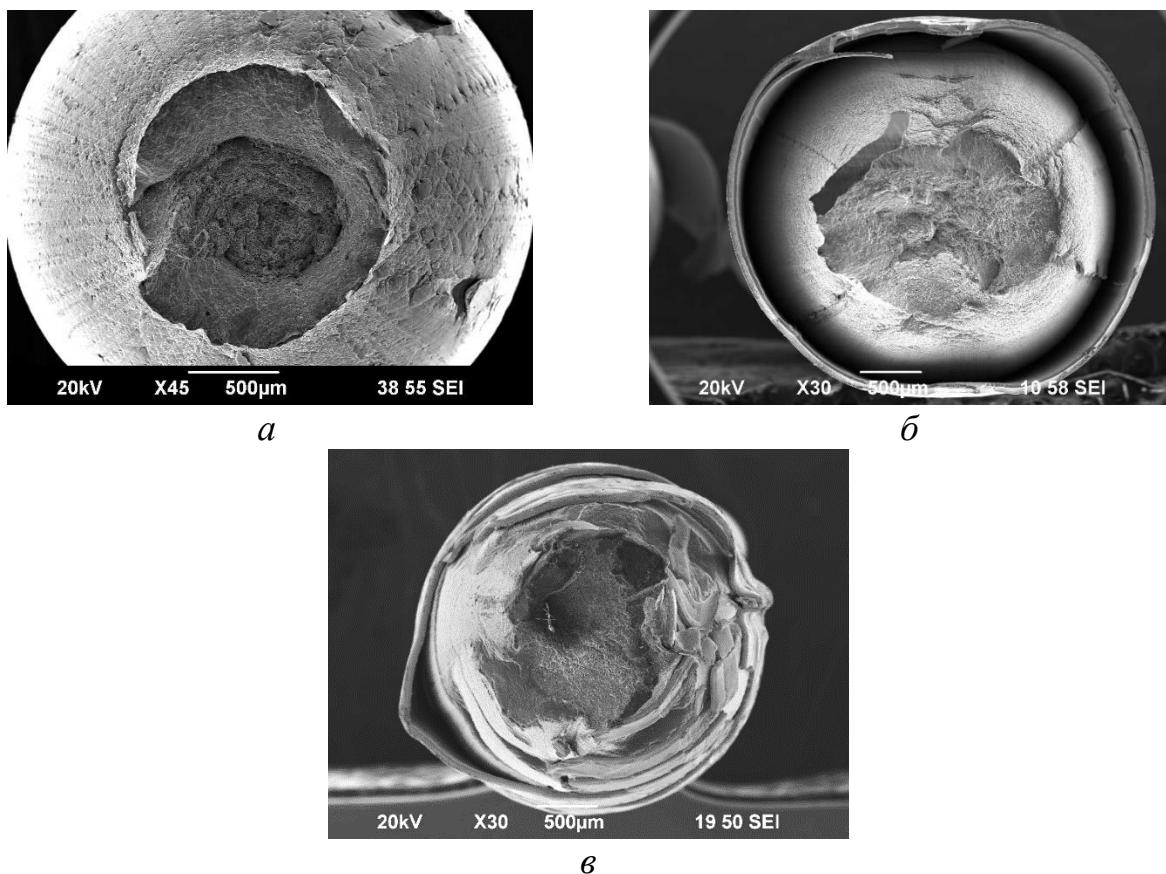


Рис. 4. Результаты фрактографического анализа образцов проволоки Al-0,5Fe:

- a* – без медного покрытия;
- б* – с медным покрытием до отжига;
- в* – с медным покрытием после отжига, РЭМ

### Выводы

1. Получены образцы биметаллического сплава на основе проволоки из сплава Al-0.5Fe, покрытого медью электролитическим методом. Доля меди в сечении составляет не более 9%, на границах раздела металлов отсутствуют видимые дефекты/интерметаллиды.
2. Предел прочности и удельная электрическая медно-алюминиевой проволоки практически не отличаются от аналогичных у алюминиевой проволоки состава Al-0.5Fe, в то время как относительное удлинение до разрушения значительно ниже (1,5% против 4,9%).
3. Отслоение никелевого слоя от алюминиевого, и зарождение хрупких трещин в никелевом слое являются причинами пониженной пластичности биметаллической проволоки.
4. Отжиг биметаллической проволоки при 300 °С в течение 1 ч привёл к увеличению электропроводности до 60,9% IACS и относительного удлинения до разрушения до 4,3%, при сохранении предела прочности.

## Библиографический список

1. An Z, Yan J, An H, Tan J, Han Y, Li H, Yang J, Ramakrishna S (2023) Resource, environmental and economics research for primary and secondary copper: A bibliometric and systematic review. *J Clean Prod* 425:138671
2. Huang W, Yu H, Wang L, Wu X, Ouyang C, Zhang Y, He J (2023) State of the Art and Prospects in Silver- and Copper-matrix Composite Electrical Contact Materials. *Mater Today Commun* 107256
3. Li L, Liu G, Pan D, Wang W, Wu Y, Zuo T (2017) Overview of the recycling technology for copper-containing cables. *Resour Conserv Recycl* 126:132–140
4. Jawalkar CS, Kant S (2015) A Review on use of Aluminium Alloys in Aircraft Components. *i-manager's Journal on Material Science* 3:33–38
5. Lapovok R, Ng HP, Tomus D, Estrin Y (2012) Bimetallic copper-aluminium tube by severe plastic deformation. *Scr Mater* 66:1081–1084
6. Qi Y, Lapovok R, Estrin Y (2016) Microstructure and electrical conductivity of aluminium/steel bimetallic rods processed by severe plastic deformation. *J Mater Sci* 51:6860–6875
7. Barrett C, Tetelman A, Nix W (1973) *The Principles of Engineering Materials*. Prentice-Hall, Hoboken, NJ, USA
8. MWS Wire Industries. Copper Clad Aluminium. <https://mwswire.com/copper-clad-aluminum/>. Accessed 17 Oct 2023.

© Кирьянова К.Э., Медведев А.Е., 2023

УДК 620.18

Д.С. МЕЛЬНИКОВ

*denismelnikov2000@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук М.М. АБРАМОВА

*Уфимский университет науки и технологий*

### **ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ 110X18M**

*Аннотация:* Рассмотрено влияние ИПД на износостойкость стали 110X18M. Обнаружены закономерности изменения степени износа в зависимости от микроструктуры.

*Ключевые слова:* подшипниковая сталь 110X18M; износ; ИПДК

С развитием промышленности и технологий возникает потребность в материалах с особыми свойствами. Для повышения механических характеристик применяют различные методы интенсивной пластической деформации (ИПД).

Применение ИПД с последующей термической обработкой позволяет значительно повысить прочность и твердость сплава. Помимо этого, данным методом достигается однородность распределения упомянутых характеристик по всему объему материала, которая, в свою очередь определяется микроструктурой. Одной из главных проблем подшипниковой стали является её карбидная неоднородность, которая приводит к снижению её износостойкости, твердости и прочности. Поэтому обработка данного типа стали методами ИПД может быть перспективной областью исследования.

### Материалы и методики исследования

Материалом, используемым в данной работе, был выбран сплав коррозионностойкой подшипниковой стали 110X18M стандартного химического состава (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав стали 110X18M

C	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	S	Si
1,10– 1,20	16,50– 18,00	≤0,30	Осн.	0,50– 1,00	0,50– 0,80	≤0,30	≤0,025	≤0,015	0,53– 0,93

Образцы подвергались интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) при 300 °С. Количество оборотов ИПДК – 10. Термообработка осуществлена в печи Nobertherm. Термическая обработка (ТО) представляет собой закалку при 1050 °С длительностью 1 час в масле с охлаждением на воздухе с последующим низким отпуском при 170 °С на 1,5 часа. Структуру сталей выявляли после механической шлифовки, травления в растворе 3%-азотной кислоты. Съемку образцов проводили на РЭМ при следующих настройках: ускоряющее напряжение U=10–20 кВ, увеличение 500–5000х.

Исследования износостойкости проводили на высокотемпературном трибометре Nanovea. Метод основан на определении коэффициента трения скольжения - отношения силы трения, возникающей при взаимном перемещении прижатых друг к другу контртела и испытываемого образца, к усилию прижима.

Образцы стали 110X18M представляют собой плоские диски диаметром 10 мм. Контртело – шарик стали 95X18 диаметром 3 мм. Скольжение контртела относительно образца происходило путем вращения платформы с образцом (след износа на образце – окружность).

Режимы работы:

1. Нагрузка 1 Н, частота обращения 100 об/мин.
2. Нагрузка 10 Н, частота обращения 100 об/мин.
3. Нагрузка 1 Н, частота обращения 5 об/мин.
4. Нагрузка 10 Н, частота обращения 5 об/мин.

## Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктура в исходном состоянии представляет собой зернистый перлит со средним размером карбидов  $2,9 \pm 0,3$  мкм и  $15,6 \pm 0,8$  мкм, объемная доля карбидных частиц составляет  $51 \pm 2\%$  (рис. 1 а). Карбидная фаза неоднородна.

Состояние стали после закалки и отпуска – высокодисперсная структура. В этой структуре присутствует мартенсит отпуска, остаточный аустенит и нерастворенный цементит, количество крупных карбидов заметно снижается (рис. 1 б). Средний размер карбидов составляет  $2,5 \pm 1,5$  мкм и объемная доля –  $19 \pm 1\%$ .

Микроструктура стали после ИПДК показана на рисунке 1 в. После ИПДК при  $300\text{ }^\circ\text{C}$  средний размер карбидов составил  $2,0 \pm 0,5$  мкм с объемной долей –  $20 \pm 1\%$ . По сравнению с исходным состоянием карбиды измельчаются, неоднородность размеров сохраняется, однако распределение карбидов по ферритной матрице становится более однородно.

Микроструктура стали после ИПДК+ТО показана на рисунке 1г. Средний размер карбидов составил  $2,8 \pm 1,0$  мкм. Объемная доля карбидов  $19 \pm 1\%$  для состояния ИПДК при  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , что является наименьшим из всех состояний. Карбиды в результате ИПД стали мельче по сравнению с исходным состоянием, а также присутствует мартенсит отпуска.

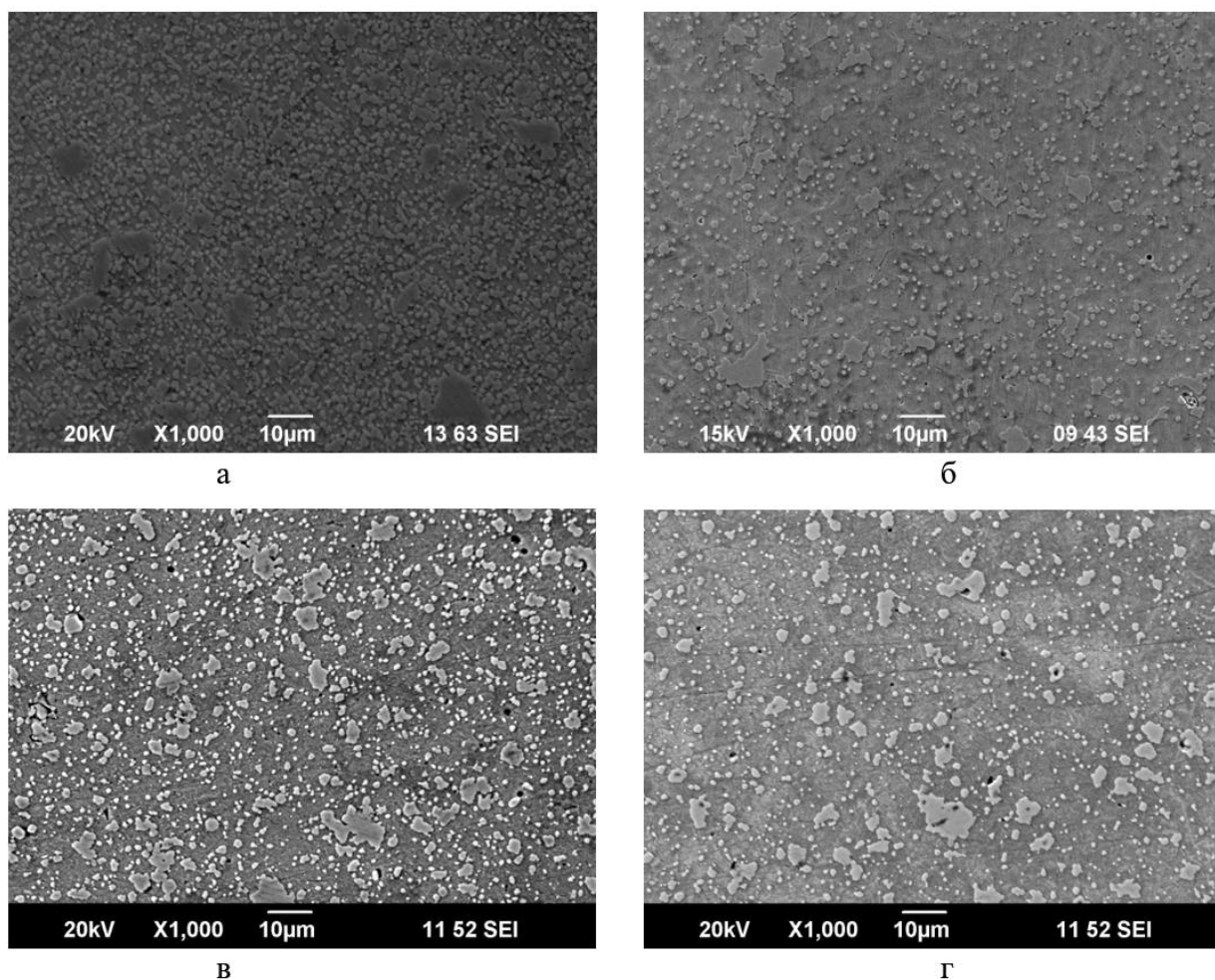


Рис. 1. Микроструктура стали:

*a* – в исходном состоянии;

*б* – микроструктура стали после стандартной ТО;

*в* – микроструктура стали после ИПДК ( $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

*г* – микроструктура стали после ИПДК ( $T=500$ )+ТО

Для исходных образцов типичным является график трения со «ступенью» (рис. 2 а), что говорит нам о том, что в процессе трения контртело соприкасается с частицей карбида образца. При дальнейшем трении эта частица выкрашивается и контртело соприкасается с более мягкой ферритной матрицей образца, «ступень» преодолевается, коэффициент трения увеличивается.

Зависимость трения от времени для образцов после ТО не имеет резких скачков (рис. 2 б). Это может свидетельствовать о том, что мелкие частицы карбидов растворились в твердом растворе, сократилась объемная доля карбидов в нем, раствор упрочнился, а превратившийся после закалки мартенсит уменьшил разницу в твердости между карбидной фазой и матричным твердым раствором.

График зависимости коэффициента трения от времени для образцов после ИПДК (рис. 2 в) состоит из небольших скачков, что может говорить о появлении множества мелких карбидных частиц.

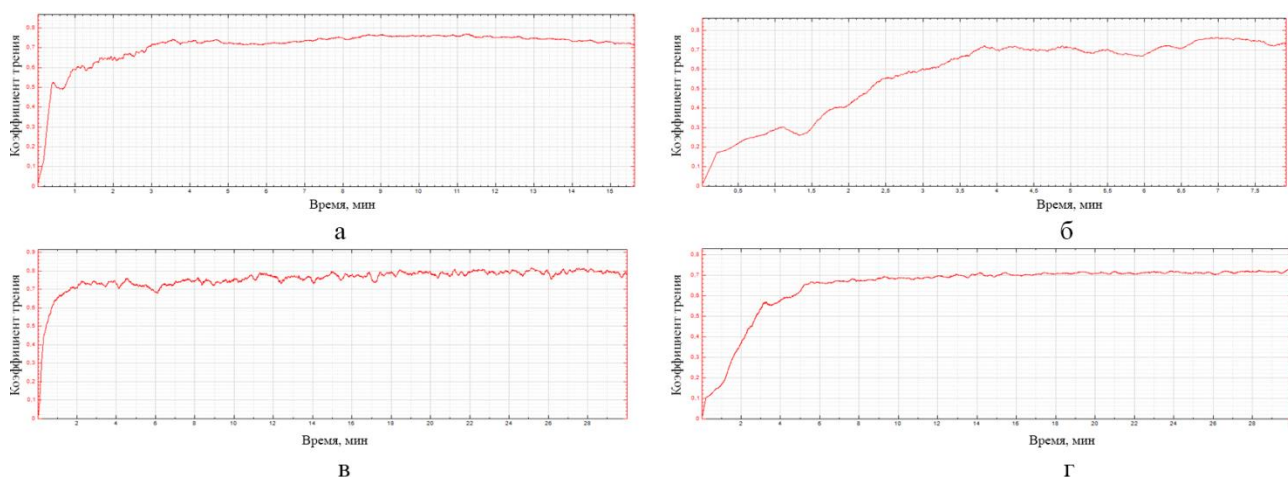


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от времени испытания в режиме №2:

*a* – в исходном состоянии;

*б* – после стандартной ТО;

*в* – после ИПДК ( $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

*г* – после ИПДК ( $T=500$ )+ТО

После операций ИПДК и ТО структура стали представляет собой мелкие зерна мартенсита и частицы карбидов. В данном состоянии прочностные показатели максимальны. По достижении устоявшегося трения график линейный (рис. 2 г).

## **Выводы**

1. После применения интенсивной пластической деформации перед термической обработкой снижается объёмная доля карбидов, значительно снижается количество крупных карбидов, которые измельчаются в процессе деформации и частично растворяются в результате термической обработки.

2. Мартенсит, образованный после закалки, и растворенная и измельченная по всему объёму карбидная фаза улучшают общие свойства стали, поскольку крупные карбиды вредны для фрикционных и прочностных свойств подшипниковой стали.

## **Библиографический список**

1. Киселева С.К., Зарипов Н.Г. Влияние интенсивной пластической деформации на микроструктуру и трибологические свойства стали 110x18м-швд/ Евразийский союз ученых. 2020. № 7. С. 32–36.

2. Гулина И.В. и др. Особенности испытания подшипниковой стали / Труды ВИАМ. 2019. № 10. С. 76–83.

3. Мороз А.Н., Глотка А.А., Боляк В.Р. Длияние карбидной составляющей на служебные характеристики стали 110X18M / Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2013. № 2. С. 26–28.

© Мельников Д.С., 2023

УДК 669

А.А. ПРОТАЦКАЯ

*a.protatskaya@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент каф. МиФМ С.Р. ШАРИПОВА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПОРИСТОСТИ ОБРАЗЦОВ**

*Аннотация:* В работе показаны возможности методов оценки пористости на примере образцов, полученных селективным лазерным сплавлением (СЛС). Литейные технологии, к которым можно отнести и аддитивные, нередко приводят к образованию в изделиях пор различного происхождения. Для оценки пористости применяются различные методы, в частности, метод микроструктурного анализа пор и метод гидростатического взвешивания.

*Ключевые слова:* пористость; микроструктурный анализ пористости; гидростатическое взвешивание

Целью данной работы являлось сравнение применимости различных методов оценки пористости сплавов на примере образцов СЛС сплава Инконель-718.

При селективном лазерном сплавлении изготовление трехмерных физических объектов происходит за счет сплавления частиц металлического порошка [1]. Аддитивные технологии направлены на создание высокопрочных изделий со сложной неразъемной геометрией. Однако, эти изделия, как и все материалы, полученные технологией порошковой металлургии, содержат поры. Их подразделяют на две группы:

- 1) закрытые поры – не сообщающиеся с окружающей средой;
- 2) открытые поры – сообщающиеся с окружающей средой.

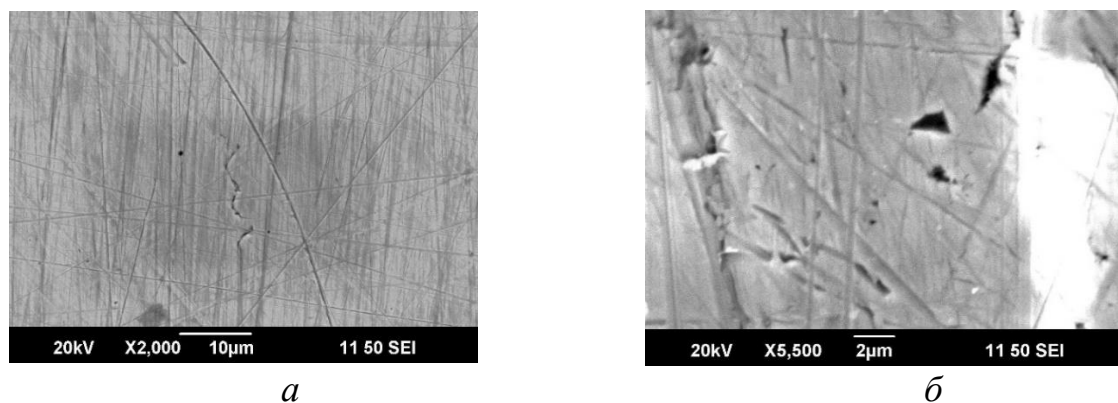
С целью снижения пористости в работе была использована технология наложения ГИП – горячего изостатического прессования. Оценивали пористость образцов до и после наложения ГИП.

Оценку пористости проводили двумя методами. Первый – микроструктурный анализ снимков, полученных на оптическом и растровом микроскопах.

На снимках образцов до ГИП видно, что поры имеют разную форму и размеры. Наблюдаются изолированные усадочные поры (рис. 1 а) размером порядка 10 мкм.

По границам тройных стыков присутствуют поры треугольной формы (рис. 1 б) размером около 1 мкм.

Также методами РЭМ можно различать мелкие поры размером менее 1 мкм.

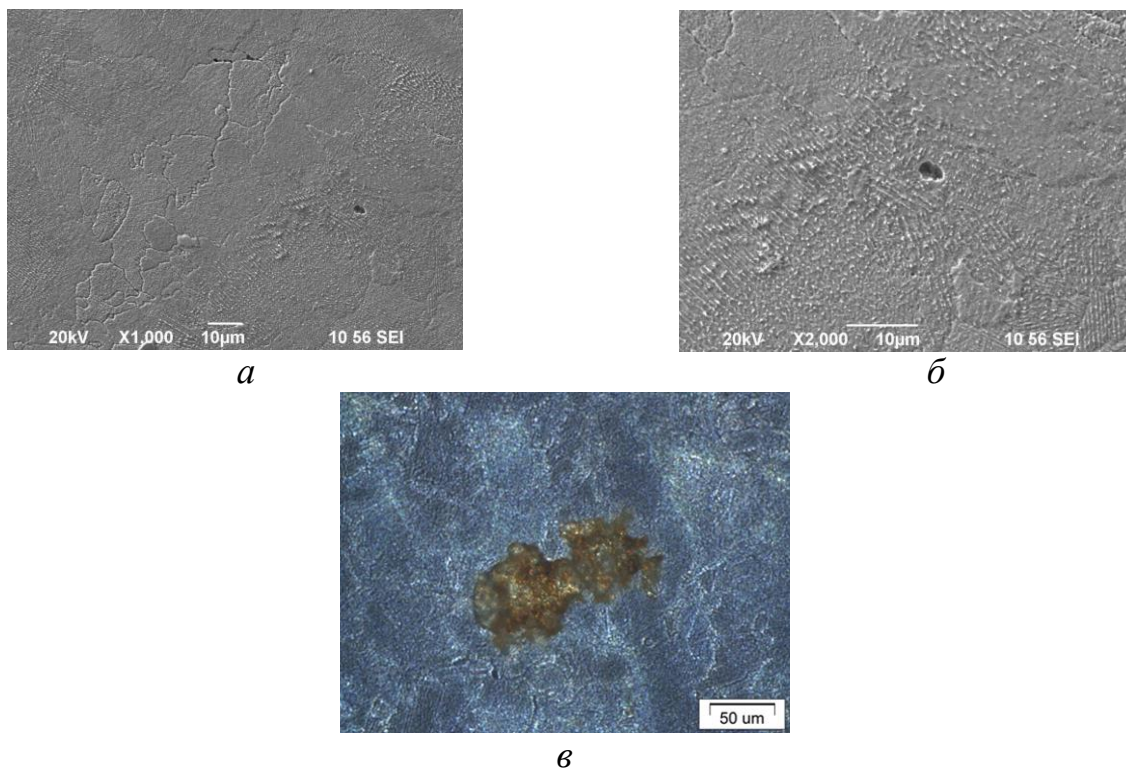


*Рис. 1.* Поры сплава Инконель 718 в разных частях образца до ГИП (РЭМ)  
*а* – центральной;  
*б* – краевой

Микроструктурным методом была определена объемная доля пор: для состояния до ГИП по краю образцов пористость оказалась на 5,3% выше, чем в центральной части.

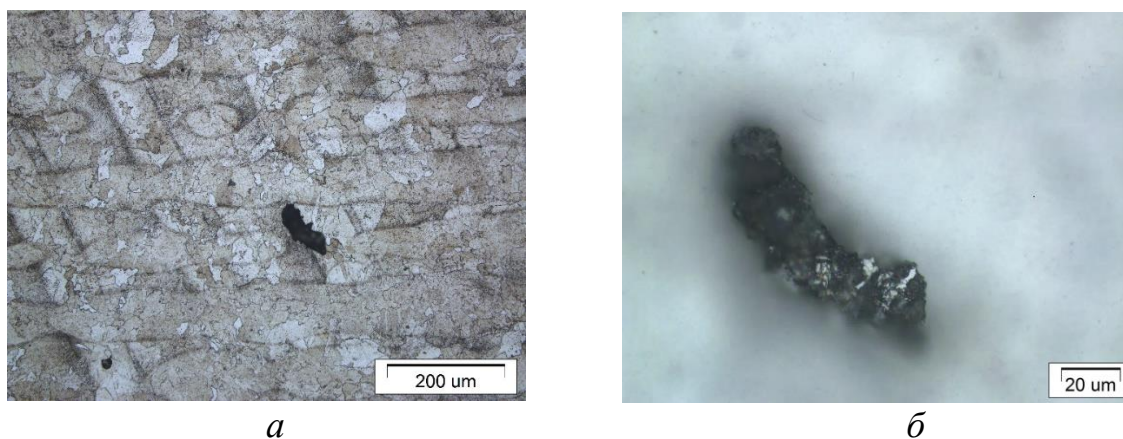
После ГИП, в структуре также присутствовали поры, однако в отличие от состояния до ГИП доля пор заметно снизилась: в структуре встречаются

округлые поры размером около 4 мкм (рис. 2 а, б) и крупные размером около 70 мкм (рис. 2 в).



*Рис. 2. Изображения пор образца после СЛС+ГИП  
а, б – микрофотографии РЭМ;  
в – оптическая металлография*

На рисунке 3 присутствует вытянутая пора размером 20\*120 мкм.



*Рис. 3. Пора образца Инконель 718 после ГИП с разными увеличениями*





*Рис. 4.* Поры различных размеров сплава Инконель 718 (после ГИП)  
(оптическая микроскопия)

На рис. 4 можно видеть как мелкие, так и крупные поры, обнаруженные в центральной части образца.

Оценить пористость после ГИП методами микроструктурного анализа не представляется возможным, поскольку размер пор так мал, что получить несколько различных пор на одном поле зрения не удастся. Поэтому, пористость СЛС Инконель 718 после ГИП оценивали методом гидростатического взвешивания [2].

Это метод измерения плотности жидкостей и твердых тел, основанный на законе Архимеда: на всякое тело, погруженное в жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (газа) поддерживающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа), направленная вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема [3].



*а*



*б*

*Рис. 5.* Взвешивание образцов на аналитических весах ВЛ7-200:  
*а* – на воздухе; *б* – в жидкости

Испытуемые образцы взвешивают сначала на воздухе (рис. 5 а), а затем в жидкости (рис. 5 б). Отдельно взвешивают проволоку, на которой подвешивают образец также в воде и в воздухе. В качестве рабочей жидкости используют дистиллированную воду и керосин. Вода имеет малую скольнность к испарению, но низкую смачиваемость, а керосин напротив – хорошо смачивает поверхности, но достаточно быстро испаряется. Для каждого образца проводят не менее трех измерений в каждой жидкости. Вес проволоки вычитают из общего веса. Плотность неизвестного вещества определяют по формуле 1:

$$\rho = \frac{M}{M - m} * \rho_{ж}, \quad (1)$$

Данным методом после ГИП плотность повысилась в керосине с 8,49444 до 8,49756 гр/см<sup>3</sup>; в воде с 8,13590 до 8,20080 гр/см<sup>3</sup> при стандартной плотности 8,5 гр/см<sup>3</sup>.

Таким образом, микроструктурный метод позволяет оценить пористость только локальных участков и на ограниченных полях зрения, при этом дает возможность сравнить между собой приповерхностные и центральные области образцов. Метод гидростатического взвешивания дает возможность получить интегральную плотность по объему образца.

### Библиографический список

1. Mark Curies German selective laser melting specialist mulls IPO // Industrial laser solutions. 15.08.2014.
2. Горячее изостатическое прессование для аддитивного производства: сайт – URL: <https://industry3d.ru> (дата обращения: 18.02.2023). – Текст: электронный
3. Матренин, С.В. Определение плотности материалов: методическое указание по выполнению лабораторных работ по курсу «Механические и физические свойства материалов» для студентов направления 15.06.00 / С.В. Матренин. – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – 8 с.

© Протацкая А.А., 2023

## **СНИЖЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ 45 МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПОЛИРОВКИ**

*Аннотация:* В работе представлены результаты исследования электролитно-плазменной полировки изделия из Стали 45.

*Ключевые слова:* электролитно-плазменная полировка, шероховатость, поверхность, гладкость

Электролитно-плазменная полировка (ЭПП) – это передовая технология, используемая для улучшения качества поверхности металлических изделий. Эта методика обработки позволяет достичь высокой степени гладкости и чистоты поверхности металла, что является критически важным во многих промышленных областях. Одним из материалов, которые можно обработать с использованием ЭПП, является сталь 45. В этой статье рассмотрим принципы работы электролитно-плазменной полировки и ее применение в обработке стали 45.

Электролитно-плазменная полировка – это процесс, в ходе которого поверхность металла подвергается воздействию плазменного разряда в присутствии электролитического раствора. Этот метод сочетает в себе преимущества электрохимической и физической обработки, что позволяет достичь выдающихся результатов в области поверхностной гладкости и чистоты.

Процесс ЭПП является разновидностью электрохимической обработки, но в отличие от традиционного электрохимического метода он проводится при высоких напряжениях порядка 100-600 В [1].

Электролитно-плазменная обработка осуществляется в растворах солей, кислот и щелочей с низкой концентрацией (порядка 1-20%) [1].

Преимущества электролитно-плазменной полировки:

1. Улучшенная гладкость поверхности: ЭПП позволяет добиться высокой степени гладкости поверхности, что особенно важно в промышленности, где требуется минимизировать трение и износ.

2. Удаление окислов и загрязнений: процесс удаляет окислы и другие загрязнения с поверхности стали, что повышает ее коррозионную стойкость и улучшает эстетический вид изделий.

3. Точное удаление слоев материала: ЭПП позволяет удалять точно определенные слои материала с поверхности металла, что полезно при восстановлении изношенных или поврежденных деталей.

4. Контролируемая обработка: Процесс обладает высокой степенью контролируемости, что позволяет точно регулировать параметры обработки в зависимости от требований конкретного изделия.

5. Экологическая безопасность: электролиты, используемые в процессе, могут быть выбраны таким образом, чтобы минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Процесс начинается с погружения металлической заготовки, в данном случае из материала стали 45, в электролитический раствор хлорида аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). Затем на поверхность заготовки подается электрический ток, который создает плазменный разряд. Воздействие плазмы и электролита на поверхность металла приводит к растворению поверхностных неровностей и окислов, создавая гладкую и блестящую отделку.

Этот исследовательский проект фокусируется на обработке поверхности изделия из материала Сталь 45, с целью достижения наименьшего параметра шероховатости Ra. Отталкиваясь от литературных данных [1], процесс происходит в 5% растворе хлорида аммония разогретым до температуры  $80 \pm 10$  °C, с продолжительностью обработки в 5 минут. В результате этой обработки достигнуто гладкая поверхность с параметрами шероховатости от 0,6 до 1,8 мкм.

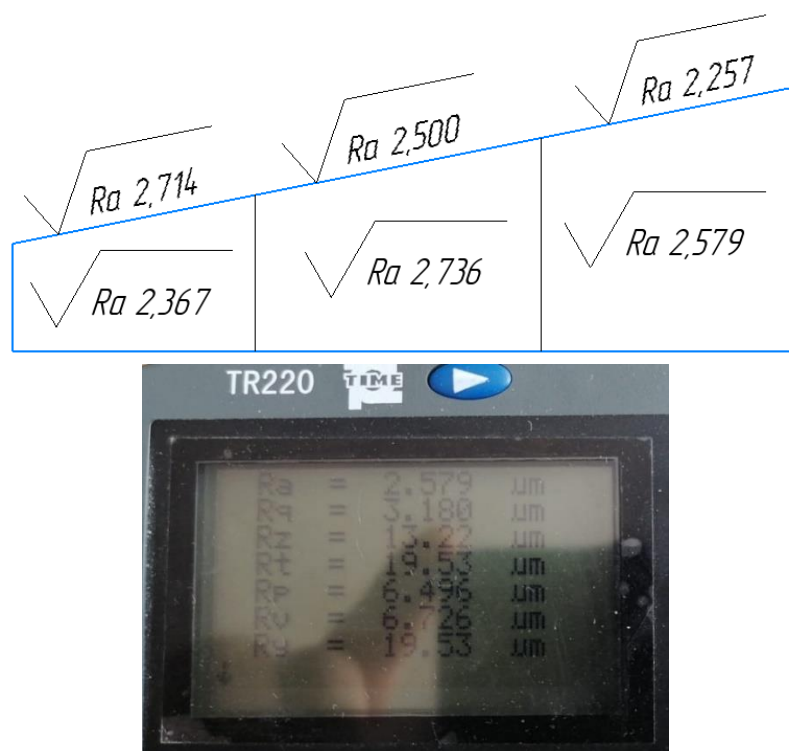


Рис. 1. Измерение параметра шероховатости до обработки на рабочей поверхности изделия из материала Сталь 45

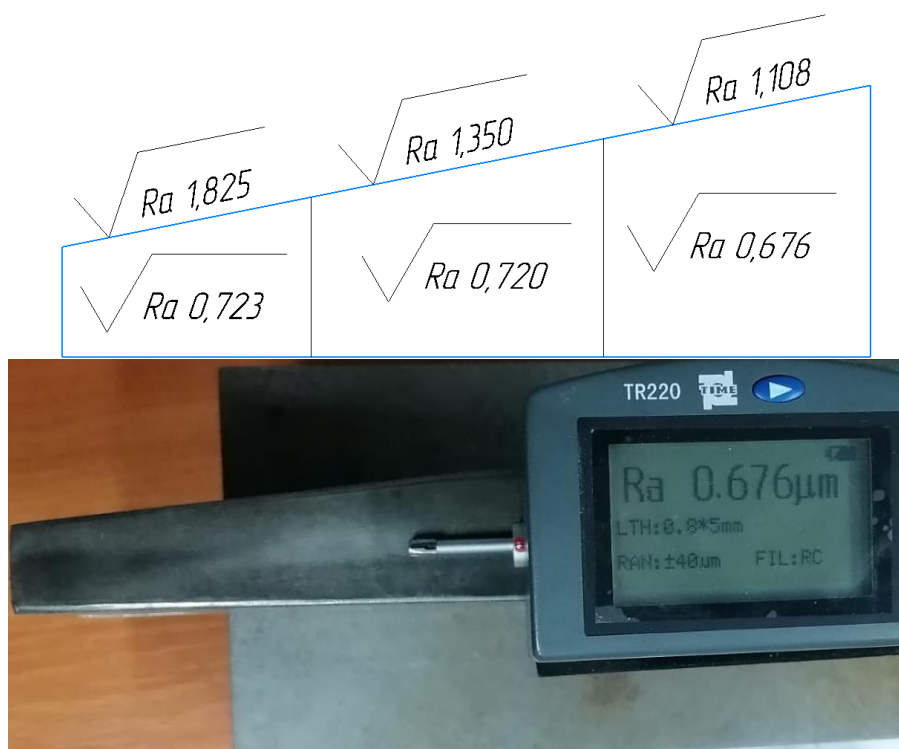


Рис. 2. Измерение параметра шероховатости после обработки на рабочей поверхности изделия из материала Сталь 45

Таблица 1

Режим обработки 5 минут в 5% растворе соли $\text{NH}_3\text{Cl}$		
До обработки, мкм	После обработки, мкм	Соотношение изменений параметра шероховатости, %
2,714	1,825	32,76
2,500	1,350	46,00
2,257	1,108	50,91
2,367	0,723	69,46
2,736	0,720	73,68
2,579	0,676	73,79
		57,77

Результаты измерений показывают уменьшение значения шероховатости обработанного материала в 2-3 раза, среднее значение изменения в процентном соотношении составляет 57,77%.

Стоит отметить, что боковые грани изделия технологически подвергались полировке дважды, так как окунание в раствор производилось верхней и нижней

рабочей поверхностями, в связи с этим боковые грани полировались не более 10 минут, отсюда видно значительное отличие параметров от Ra 0,6 до Ra 0,72.

Электролитно-плазменная полировка нашла широкое применение в различных отраслях промышленности. В автомобильной промышленности, например, она используется для обработки двигательных деталей, что улучшает их эффективность и долговечность. В аэрокосмической отрасли ЭПП применяется для обработки турбинных лопаток и других критически важных деталей. Также эта технология находит применение в производстве медицинского оборудования, электроники и многих других отраслях, где высокое качество поверхности металла играет ключевую роль.

В заключение, электролитно-плазменная полировка является важным инструментом в современной промышленности. Ее способность улучшать гладкость, чистоту и коррозионную стойкость поверхности стали 45 делает этот процесс незаменимым в производстве высокоточных изделий. С постоянным развитием технологий можно ожидать, что электролитно-плазменная полировка будет продолжать находить новые применения и совершенствоваться, отвечая на потребности современной промышленности.

### **Библиографический список**

1. Е.В. Парфенов, Р.Р. Невьянцева, С.А. Горбатков, А.Л. Ерохин // Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление. 2013. Vol. 29. P. 489–502. DOI: 10.1016/j.jmst.2013.02.005.

2. Описание процесса электролитно-плазменного полирования. [Электронный ресурс]. – Сморгонь: Стекловак, 2004. – Режим доступа: <http://www.finishing.narod.ru/index5.html>. – 22.01.2011.

3. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в водоеводных объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.5.1315-03. [Электронный ресурс]. – М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2003. – Режим доступа: <http://www.gostrf.com/>. – 12.04.2011.

© Рихсиев А.А., Парфенов Е.В., 2023

УДК 621.357.2

А.Р. САБИТОВ

Sabitovazat1669@yandex.ru

Науч. руковод. – д-р. техн. наук, доцент Е.В. ПАРФЕНОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ СПЛАВА Ti-18Zr-15Nb И ПЭО ПОКРЫТИЯ НА НЁМ**

*Аннотация:* Сплавы титана, циркония и ниобия (TZN) с эффектом памяти формы обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошей биохимической и биомеханической совместимостью, в сравнении с другими титановыми сплавами. Эти качества сплава можно повысить, применив плазменно-электролитическое оксидирование, нанеся на его поверхность защитную оксидную пленку. В данной работе исследуется новый сплав Ti-18Zr-15Nb и ПЭО покрытие на нём.

*Ключевые слова:* Ti-18Zr-15Nb; плазменно-электролитическое оксидирование

### **Введение**

В современной травматологии широко распространилось использование сплавов титана в качестве основного материала для изготовления имплантатов. Титановые сплавы, безусловно, являются наиболее распространенным классом металлических биоматериалов, благодаря сочетанию свойств: высокой прочности, низкому модулю Юнга, высокой коррозионной стойкости к агрессивной среде человеческого организма, эффект памяти формы (ЭПФ). Одним из перспективных сплавов является Ti-18Zr-15Nb. Данный сплав, состоит из нетоксичных компонентов, что делает его использование человеком намного безопаснее, а также обладает хорошей коррозионной стойкостью и прочностными характеристиками.

Однако, при установке и длительном использовании имплантата из такого материала, в организме у человека может скапливаться некоторое количество ионов металлов, что, в последствии, негативно скажется на организме. Во избежание этой проблемы было разработано множество способов обработки поверхности, и одним из перспективных способов является плазменно-электролитическое оксидирование [1].

Плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО) – метод обработки в электролите сплавов на основе титана, магния и алюминия, происходящий под воздействием высоких напряжений.

## Методика ПЭО

Перед оксидированием образцы были отполированы до зеркальной поверхности с помощью шкурочек различной зернистости, начиная с грубой Р400 и заканчивая мелкой Р2500. После этого образец промывался в дистиллированной воде в течение 5 мин, для удаления лишних загрязнений, затем промывался в изопропиловом спирте для обезжиривания поверхности. Для проведения ПЭО использовались круглые образцы крупнозернистый (КЗ) TZN диаметром 9 мм, в верхней части образца было проделано отверстие диаметром в 1 мм для крепления титанового держателя с изоляцией для снижения токов, которые могут пройти по держателю. Во время ПЭО образцы погружались в электролит на глубину 50 мм от уровня электролита. Сам электролит находился в пластиковом резервуаре объёмом 5 л. В этом резервуаре также находился змеевик охлаждения, также служащий катодом. Состав электролита, использовавшегося для оксидирования: 20г/л  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (Р-электролит), разведённых на 5 литрах дистиллированной воды. Длительность обработки была 5 мин с частотой импульсов биполярного напряжения 1000 Гц. Во время оксидирования под резервуаром включалась магнитная мешалка, необходимая для перемешивания электролита и равномерного распределения температуры в электролите. Весь процесс происходит при постоянной температуре около  $20 \pm 1$  °С, с напряжениями 430 В на положительном импульсе, 40 В на отрицательном. Скважность импульсов составляла 26%. Все данные выставлялись на компьютере в программе управления установкой на основе LabView.

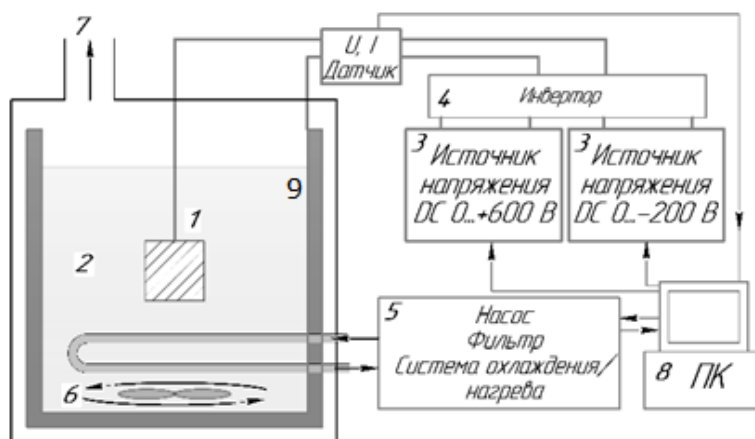


Рис. 1. Упрощенная схема установки по плазменно-электролитическому оксидированию

На рис. 1 представлена принципиальная схема установки, на которой показаны: образец 1, электролизер 2, источники постоянного напряжения 3, инвертор 4 для подачи импульсного напряжения, гидросистема охлаждения 5, перемешивание электролита 6, вытяжка 7, компьютер 8 для управления процессом ПЭО и для сбора данных, змеевик 9 для охлаждения электролита [2].



## Методики исследования

Качественный рентгенофазовый анализ сплава Ti-18Zr-15Nb и покрытия на нём проводился на дифрактометре Bruker Phaser. Для сравнения опытных и табличных значений использовалась база данных PDF 2 содержащая более 200 000 различных проб. Анализ дифрактограммы выполнялся в программе Philips Xpert HighScore Plus

Оптическая микроскопия для исследования образцов проводилась на оптическом микроскопе Olympus GX5

Шероховатость покрытия измерялась с помощью профилометра TR-220.

Пористость покрытия определялась в программе ImageJ по снимкам полученным из оптической микроскопии

Микротвёрдость ПЭО-покрытий измеряли с помощью установки EmcoTest DuraScan с использованием алмазной пирамидки Виккерса при нагрузке на индентор в 50 г на чистый образец и 100 г на покрытый. Изучение параметров микротвёрдости проводилось в программном обеспечении EcosWorkFlow.

Коррозионные свойства исследовались с помощью потенциостата-импедансметра Р-5Х в растворе Рингера в трёх-электродной ячейке объемом 100 мл с хлорид серебряным электродом сравнения ( $E_0=0,222$  В) и графитовым противозэлектродом. Токи коррозии определялись по методу Тафеля.

## Результаты исследований

### Рентгенофазовый анализ

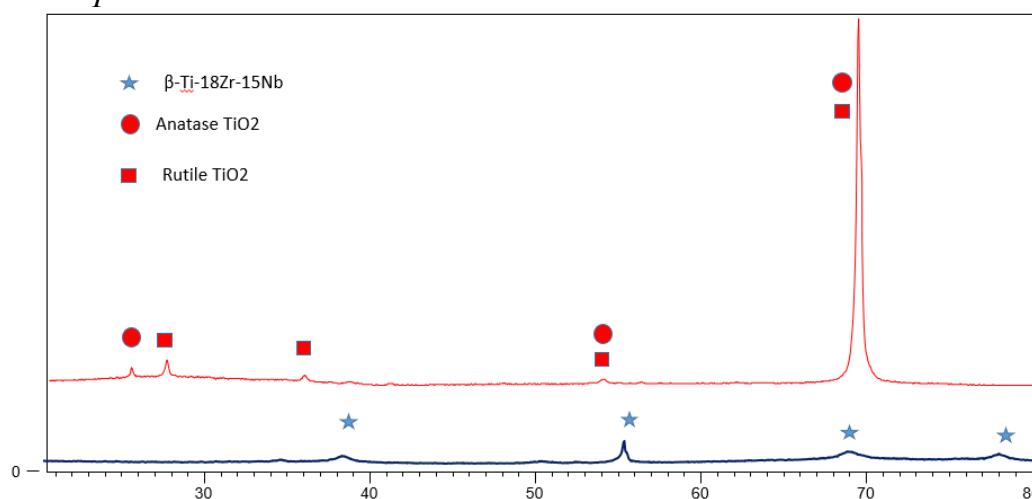


Рис. 2. Дифрактограммы Ti-18Zr-15Nb и нанесенным защитным ПЭО покрытием

На рентгенограмме оксидного слоя видно наличие 2 фаз: рутил и анатаз, причем количество рутила больше, чем анатаза. В процентном соотношении этих 2 фаз получается 67% рутила и 37% анатаза по результатам работы алгоритма SemiQuant. Проводя анализ дифрактограммы непокрытого образца, видно, что он

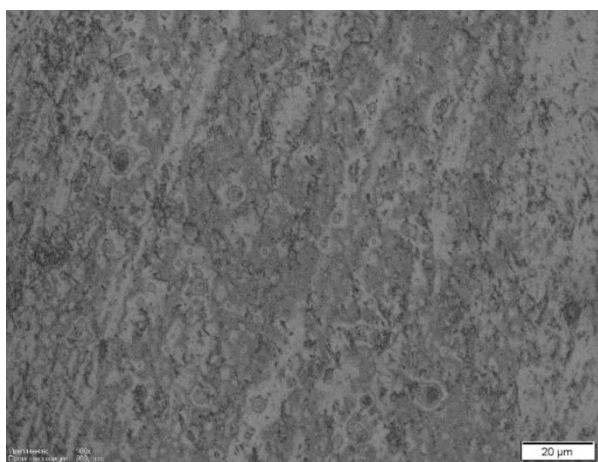
весь состоит из  $\beta$ -фазы титана, и интенсивность его пиков значительно меньше чем у покрытого образца.

### *Микроскопия*

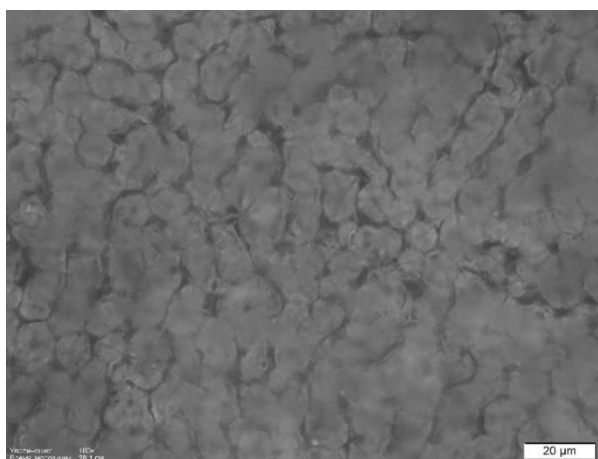
На оптическом снимке сплава Ti-18Zr-15Nb видно, что он в основном состоит из темной  $\beta$ -фазы, с небольшим количеством светлой  $\alpha$ -фазы.

На снимке защитного оксидного ПЭО покрытия видно пористую структуру, схожую с костной структурой человеческой кости. Поры внутри защитного слоя имеют 2 вида равноосные и вытянутые. Размер пор варьируется от 0,5 до 10 мкм, а удлинённые поры имеют ширину 3-5 мкм и длину доходят до 30 мкм [2].

В табл. 1 приведены результаты измерений характеристик поверхностного слоя.



*Рис. 3.* Поверхность сплава Ti-18Zr-15Nb x2000



*Рис. 4.* Поверхность оксидного покрытия TiO<sub>2</sub> x2000

### *Таблица 1*

Результаты измерений параметров покрытого и чистого TZN

Морфологические параметры ПЭО-покрытия, такие как пористость и шероховатость, имеют большое влияние на биосовместимость имплантатов с

Образец	Шероховатость, мкм	Пористость, %	Размер пор, мкм	Микротвердость, HV
Без покрытия	Ra <0,1	-	-	287±13,03
С покрытием	Ra = 0,942±0,0155; Rz = 5,946 ±0,273	12,29 ± 2,13	2,42 ± 0,15	493,8± 91,35

костной тканью. Кость имеет пористую структуру, и её значения разнятся от типа костной ткани и её местоположения в живом организме. В компактной костной ткани пористость составляет около 13-18%, для губчатой она выше. В проведенных испытаниях пористость покрытия составила  $12,29 \pm 2,13\%$ , что довольно близко к значениям пористости кости. Кальций и фосфор входят в состав “каркаса” костной ткани, который обеспечивает нормальное функционирование ее клеток, в том числе протекание процессов регенерации [1], поэтому образом добавка фосфатов в электролит позволяет улучшить совместимость имплантата с костной тканью.

### Коррозионные свойства

Метод проверки образцов на коррозионную стойкость описан в источнике [3]. В табл. 2 приведены результаты коррозионных испытаний.

Таблица 2

Коррозионные свойства покрытого и чистого TZN

Образец	$E_{\text{corr}}$ , В	$I_{\text{corr}}$ , нА/см <sup>2</sup>	Rp Мом*см <sup>2</sup>
Чистый TZN	-0,405	47,03	0,69
Покрытый TZN	-0,155	9,58	3,98

На коррозионные свойства очень сильно сказывается морфология ПЭО-покрытия. Значения потенциала свободной коррозии  $E_{\text{corr}}$  показывают нам, что необработанный образец обладает более активной поверхностью. Увеличение  $E_{\text{corr}}$  указывает на то, что ПЭО приводит к пассивации поверхности сплава, вследствие чего возрастает и поляризационное сопротивление Rp. Ток коррозии  $i_{\text{corr}}$  после получения оксидной пленки уменьшается, что указывает на улучшение коррозионной стойкости [4].

### Вывод

Сплав Ti-18Zr-15Nb является хорошей альтернативой другим титановым сплавам с памятью формы, в составе которых присутствуют токсичные вещества, а также он обладает повышенной коррозионной стойкостью, что повышает его долговечность и хорошей биосовместимостью с костной тканью человека.

ПЭО – перспективный метод обработки сплава, т.к. с его помощью можно повысить коррозионную стойкость изделия, что положительно скажется на долгосрочной стабильности имплантата.

## Библиографический список

1. Kaliaraj, G.S. Surface functionalized bioceramics coated on metallic implants for biomedical and anticorrosion performance-a review / G.S. Kaliaraj, T. Siva, A. Ramadoss // Journal of Materials Chemistry B. – 2021. – Vol. 9, No. 46. – P. 9433-9460. – DOI 10.1039/d1tb01301g.

2. Исследование режимов формирования покрытий методом плазменно электролитического оксидирования на титане Grade 4 / А.Г. Стоцкий, В.Р. Мукаева, Р.Г. Фаррахов [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2019. – Т. 23, № 4(86). – С. 57-64.

3. Kelly, R. & Scully, John & Shoesmith, D.W. & Buchheit, R.G... (2003). The polarization resistance method for determination of instantaneous corrosion rates. Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering. 124-150.

4. Исследование защитных ПЭО-покрытий на титановом сплаве с памятью формы для изделий медицинского назначения / С.Р. Шехтман, Р.Г. Фаррахов, И.А. Рамазанов, Е.В. Парфенов // Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы: Сборник трудов Открытой школы-конференции стран СНГ, Уфа, 05–09 сентября 2020 года / Отв. редактор А.А. Назаров. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2020. – С. 57-59.

© Сабитов А.Р., 2023

УДК 691.771

С.И. САЛАТОВА, И.А. РАМАЗАНОВ

*cjyzcfkfnjdf@mail.ru*

Науч. руковод. – Н.Г. ЗАРИПОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

### МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg В НАНОСТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ

*Аннотация:* В настоящей работе в сплаве 1565 системы Al-Mg сформировано однородное наноструктурное состояние со средним размером зерна 95 нм. Формирование НС состояния позволило достичь в сплаве 1565ч высоких значений механических свойств.

*Ключевые слова:* алюминиевый сплав; наноструктурное состояние; механические свойства; прочность; пластичность

## **Введение**

Недавние исследования показали, что в алюминиевых сплавах формирование ультрамелкозернистого или наноструктурного (НС) состояния с регламентированным распределением легирующих элементов в виде вторичной упрочняющей фазы, а также сегрегаций, либо прослоек вдоль границ зерен приводит к уникальному комплексу свойств, одновременно повышается прочность, пластичность и электропроводность материала [1-5].

Сплавы системы Al–Mg слабо упрочняются термической обработкой и не являются жаропрочными. Легирование магнием обеспечивает высокую коррозионную стойкость алюминиевого сплава при слабом снижении его пластичности, и обеспечивает такой комплекс свойств магналиев, благодаря которому эти сплавы являются одними из широко используемых среди деформируемых алюминиевых сплавов.

Получение высокого комплекса механических свойств этих сплавов за счет управления структурой расширило бы их применение в промышленности.

Целью работы являлся анализ влияния наноструктурного состояния сплава на механические свойства алюминиевого сплава 1565.

## **Материал и методы исследования**

Образцы сплава 1565ч (Al-5,66Mg-0,81Mn-0,67Zn-0,09Zr-0,07Cr-0,04Ti-0,001Be-0,3(Fe+Si) (масс. %), выпускаемого Самарским металлургическим заводом, для исследования в состоянии поставки представляли из себя плиту толщиной 20 мм и лист толщиной 6 мм.

Заготовки сплава 1565 в виде дисков диаметром 20 мм и толщиной 1,4 мм подвергали кручению под высоким давлением (КВД) при комнатной температуре на уникальной установке «СКРУДЖ-200» с приложенным удельным давлением 6 ГПа и скоростью деформирования 0,2 об/мин. Суммарное количество оборотов подвижного бойка установки составило 10 [1,2].

Анализ микроструктуры осуществляли на электронном микроскопе фирмы JEOL JEM-2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине INSTRON 5982 с программным обеспечением Bluehill 3.

Микротвердость по Виккерсу (HV) оценивали на приборе EMCO–TestDuraScan 50 под нагрузкой 0,1 N в течении 15 сек.

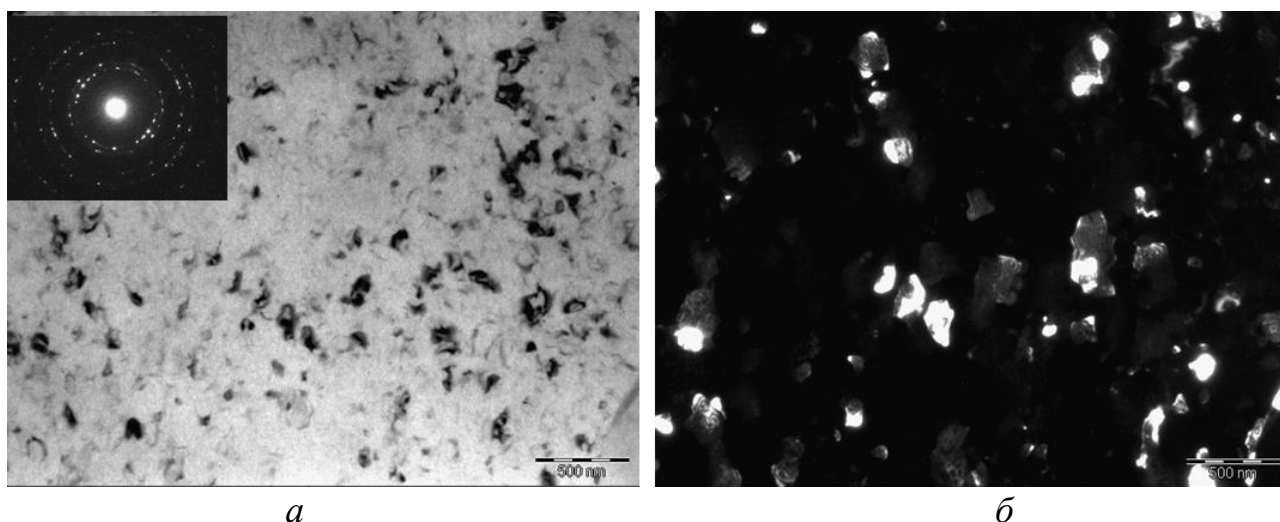
## **Результаты исследований**

Структура сплава 1565 после прокатки (исходное состояние) – волокнистая, средний размер длины волокон составляет 200-500 мкм, ширины -  $3\pm 0,2$  мкм (Рис. 1). Имеются выделения частиц второй фазы со средним размером около 3-5 мкм, объемная доля которых составляет 5-7%.



*Рис. 1.* Микроструктура сплава 1565 после прокатки (исходное состояние)

В результате обработки КВД при комнатной температуре в сплаве формируется однородное НС состояние со средним размером зерен  $95 \pm 5$  нм, коэффициент формы 1,1 (Рис. 2), при этом измельчаются и выделения вторых фаз.



*Рис. 2.* Микроструктура сплава 1565 после обработки КВД при комнатной температуре:

*а* – светопольное изображение;  
*б* – темнопольное изображение

Формирование такого структурного состояния позволило достичь в НС сплаве условного предела текучести  $715 \pm 5$  МПа, предела прочности  $800 \pm 6$  МПа

при относительном удлинении до разрушения  $1.2 \pm 0,2\%$  (рис. 3). Характеристики прочности НС сплава в 2 раза превышают таковые в сплаве в исходном состоянии (условного предела текучести  $230 \pm 3$  МПа, предела прочности  $420 \pm 6$  МПа при относительном удлинении до разрушения  $25 \pm 0,2\%$ ). После КВД микротвердость НС сплава 1565 составила HV  $237 \pm 4$ , что также превышает микротвердость исходного состояния (HV  $110 \pm 2$ ) более чем в 2 раза.

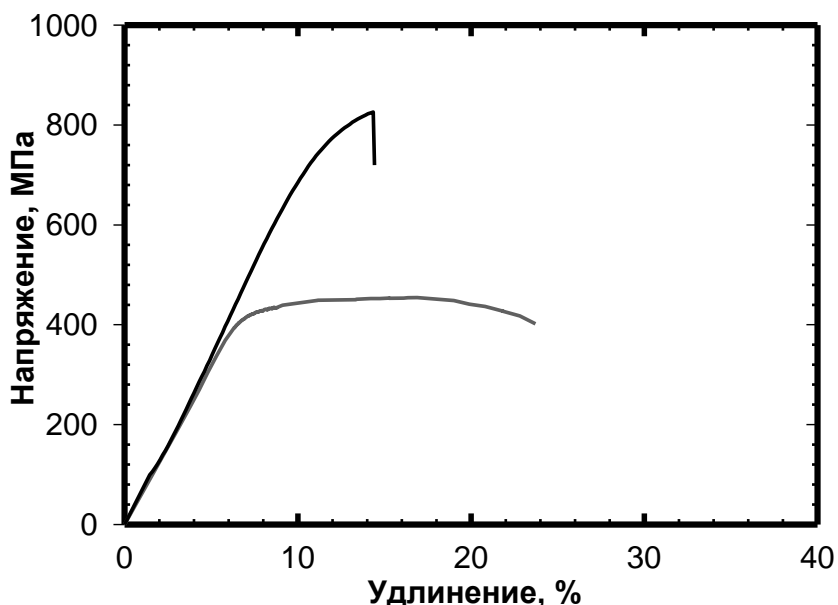


Рис. 3. Кривые растяжения образцов в исходном и НС состояниях при комнатной температуре

### Выводы

1. Термомеханическая обработка сплава 1565, включающая закалку с температуры  $480^\circ\text{C}$ , интенсивную пластическую деформацию методом КВД при комнатной температуре приводит к формированию НС состояния с размерами зерен 95 нм.

2. Формирование НС состояния позволило достичь в сплаве 1565ч высоких значений механических свойств: предела прочности 800 МПа, условного предела текучести 715 МПа, относительного удлинения до разрушения  $1,2 \pm 0,2\%$ .

### Библиографический список

1. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk nanostructured materials: fundamentals and applications // Hoboken: Wiley/TMS, 2014. 440 p.
2. Liddicoat P.V., Liao X.-Z., Zhao Y., Zhu Y., Murashkin M.Y., Lavernia E.J., Valiev R.Z., Ringer S.P. Nanostructural hierarchy increases the strength of aluminium alloys // Nature Communications.2010. V.1, issue 6. P. 1-7.
3. Тептерев М.С., Арышенский Е.В., Гук С.В., Баженов В.Е., Дриц А.М., Кавалла Р. Исследование влияния режимов отжига на эволюцию зеренной

структуры и интерметаллидных фаз в холоднокатаной ленте из алюминийево-магниевого сплава // ФММ. 2020. Т. 121, № 9. С. 995–1002.

4. Kishchik M.S., Mikhailovskaya A.V., Portnoy V.K., Kotov A.D., Drits A.M. Effect of modes of heterogenizing annealing before cold rolling on the structure and properties of sheets from alloy 1565CH // Metal Science and Heat Treatment. 2019. Т. 61. № 3-4. С. 228-233.

5. Кищик М.С., Котов А.Д., Демин Д.О., Кищик А.А., Аксенов С.А., Михайловская А.В. Влияние режимов всесторонней изотермическойковки на деформационное поведение и микроструктуру сплава на основе системы Al–Mg // ФММ. 2020. Т. 121. № 6. С. 659-666.

© Салатова С.И., Рамазанов И.А., 2023

УДК 621.777.07

А.Р. СИРАЗЕЕВА, М.О. ЗАЙДАЛКИЛАНИ, А.М. АБУАЙЯШ

*sirazeeva.arina@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук, К.М. НЕСТЕРОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА $Fe_{30}Ni_{30}Mn_{30}Cr_{10}$ , ПОДВЕРГНУТОГО ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

*Аннотация:* В данной работе представлены результаты исследования термостабильности высокоэнтропийного сплава  $Fe_{30}Ni_{30}Mn_{30}Cr_{10}$ , подвергнутого интенсивной пластической деформации методами ИПДК и РКУП. Максимальное значение микротвердости у образца ВЭСа достигается за счет обработки ИПДК при 300 °С и отжиге 450 °С, которое составляет 6015 МПа.

*Ключевые слова:* высокоэнтропийный сплав; термическая стабильность; микротвердость; интенсивная пластическая деформация; термическая обработка; метод Виккерса

### **Введение**

Высокоэнтропийные сплавы получили огромное внимание среди ученых благодаря своим преимуществам среди других промышленных сплавов – высокими значениями коррозионной стойкости, микротвердости, жаростойкости и жаропрочности [1-2].

Прочность конструкционных материалов, например таких как, сталь 40Х с твердостью 2800 МПа, ограничена возможностью развития [3], поэтому в свою



очередь решением проблемы является использование новых материалов, таких как высокоэнтропийные сплавы.

Также известно, что с помощью интенсивной пластической деформации в сочетании с последующей термической обработкой можно добиться наибольшей твердости, которые также позволяют увеличить прочностные характеристики металлов и сплавов [4].

### Материал и методы исследования

В качестве материала исследования был использован высокоэнтропийный сплав  $Fe_{30}Ni_{30}Mn_{30}Cr_{10}$ . Химический состав сплава показан в табл. 1.

В качестве методов для повышения прочностных характеристик использованы методы интенсивной пластической деформации (ИПД). Благодаря ИПД может сформироваться ультрамелкозернистое состояние, которое в свою очередь может повлиять в лучшую сторону на прочностные свойства [5]. В данном исследовании применяются методы интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) и равноканальное угловое прессование (РКУП). Температура для одного образца ИПДК была комнатная, для другого образца – 300 °С. Гидростатическое давление прессования составило  $P=6$  ГПа. Температура обработки РКУП составляла 450 °С с количеством проходов равным 3 по режиму Вс. В качестве исходного состояния был взят литой образец без термообработки.

Таблица 1

Химический состав сплава  $Fe_{30}Ni_{30}Mn_{30}Cr_{10}$ , вес. %.

Элемент	Опτικο-эмиссионный анализ	Рентгенофлуоресцентный анализ
	$Fe_{30}Ni_{30}Mn_{30}Cr_{10}$	$Fe_{30}Ni_{30}Mn_{30}Cr_{10}$
	Содержание, %	Содержание, %
Fe	30,81±0,06	29,49±0,23
Mn	>22,80	27,59±0,22
Cr	13,89±0,18	8,88±0,14
Ni	30,80±0,13	32,63±0,23
Примеси (Ti, Se, Cu, Zn, W, Mg, Al, Si)	≥1,69	≥1,41

Исследование прочности, замером микротвердости проводили по методу Виккерса на автоматической установке Durascan, используя пирамидальный алмазный индентор, с нагрузкой 0,1 Н, 10 секунд (ГОСТ 9450-76). На компьютере подключенного к микротвердомеру, выбирается 20 точек по диаметру образца, и запускается автоматическое последовательное нагружение. Далее микротвердомер в автоматическом режиме проводит замер длин диагоналей

отпечатков оставленных индентором, и пересчитывает в твердость по Виккерсу в каждой точке замера соответственно.

Были проведены последовательные отжиги образцов в исходном состоянии и образцов подвергнутых ИПДК, РКУП до 700 °С в печи типа СНОЛ по 30 минут.

### Результаты

В результате ИПДК 300 °С микротвердость возросла до 6015±226 МПа при отжиге равном 450 °С. В свою очередь микротвердость на образце РКУП составила 3344±123 МПа при отжиге 550°С. Измерения показали, что действительно наблюдается увеличение твердости по сравнению с исходным состоянием в случае РКУП на 47,5%, а в ситуации ИПДК 300 °С на 75,7%. Можно отметить снижение микротвердости во всех образцах, подвергнутых ИПД после температуры 650 °С. Из этого следует, что стабильность свойств твердости присутствует до данной температуры (рис. 1).

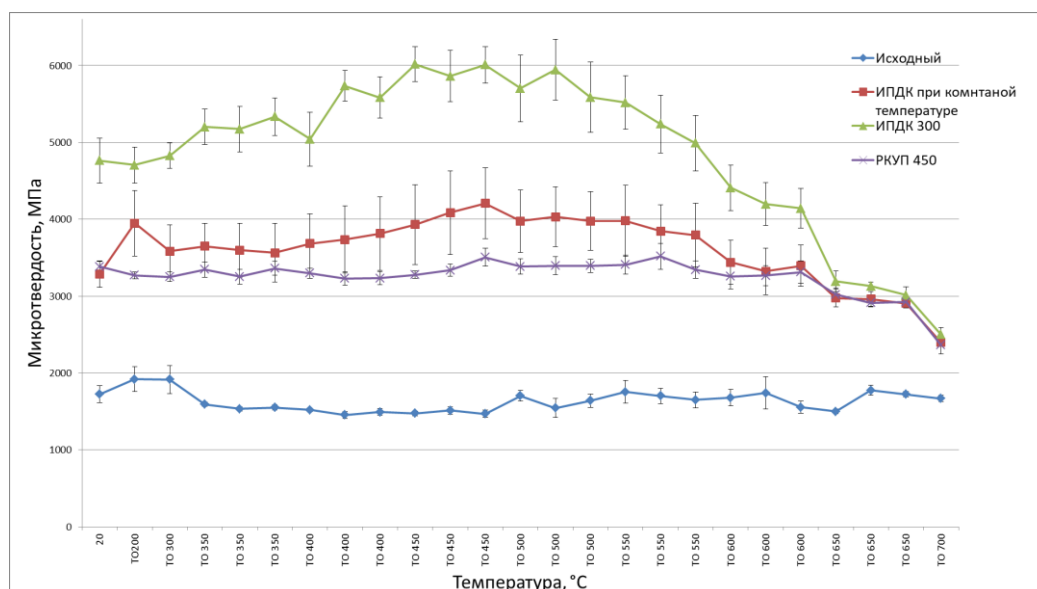


Рис. 1. Графики исследования термостабильности образцов в исходном состоянии и подвергнутых ИПД

Таким образом, при использовании метода ИПД прочностные свойства можно улучшить более, чем в 4 раза при ИПДК 300 °С и в 2 раза при РКУП 450°С, соответственно равными 6015±226 МПа и 3344±123 МПа. Термостабильность наблюдается вплоть до 650 °С.

### Библиографический список

1. Погребняк А.Д., Комаров Ф.Ф., Береснев В.М., Константинов С.В., Салищев Г.А. Многокомпонентные и высокоэнтропийные сплавы и нитридные покрытия на их основе. – М.: ЛЕНАНД, 2021. – 336 с.

2. A novel HfNbTaTiV high-entropy alloy of superior mechanical properties designed on the principle of maximum lattice distortion / Zibing An [et al.] // Journal of Materials Science and Technology 79 2021 P. 109–117.

3. Оглезнев Н.Д., Абляз Т.Р. влияние режимов электроэрозионной прошивки стали 40х на микроструктуру и точность размеров отверстий// Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2.

4. Получение, структура и свойства высокоэнтропийных материалов: Тезисы международной конференции и школы молодых ученых (г. Белгород, 14-16 октября 2020 г.) / под ред. Г.А. Салищева, М.С. Тихоновой, Е.А. Поволяевой. – Белгород: ООО «Эпицентр», 2020. – 108 с.

5. Шайсултанов Д.Г. Структура и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeNiX (X=Mn, V, Mn и V, Al и Cu): дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. – Белгород, 2015. – 142 с.

© Сиразеева А.Р., 2023

УДК 669:621.785

Т.Б. СУМЫНИНА

*tsumynina@list.ru*

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

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ВЛИЯНИЯ РКУП НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ TWIP СТАЛИ**

*Аннотация:* TWIP стали – стали, проявляющие эффект пластичности, наведенной двойникованием (Twinning Induced Plasticity). Эти стали имеют структуру аустенита в холоднокатанных листах. Твип стали обладают высокой прочностью и пластичностью, перспективностью в развитии и изучении. Так же они демонстрируют хорошую деформируемость [1]. В работе проведены исследования влияния степени деформации на структуру и микротвердость TWIP стали.

*Ключевые слова:* пластичность, наведенная двойникованием; влияние РКУП на микроструктуру и микротвердость; аустенитная сталь

### **Введение**

TWIP стали – стали с пластичностью, вызванной двойникованием. Эти стали сочетают одновременно и высокую прочность, и большую пластичность. Благодаря этому вызывают большой интерес с точки зрения практического применения.

Разработки твип 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, превосходной 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. [1]

Стали с пластичностью, вызванной двойникованием (TWIP), имеют хороший баланс между высокой прочностью и большой пластичностью, что делает их многообещающими кандидатами для крупномасштабного применения в автомобильной и строительной промышленности.[2]

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 TWIP сталей направлены на повышение предела текучести. [1]

Таким образом, целью настоящей работы является изучение влияния режимов РКУП на структуру и микротвердость TWIP стали.

### **Материал и методики**

Для проведения основных исследований была выбрана высокомарганцевая сталь аустенитного класса Fe-18Mn-2Al. Основным видом поставки является калиброванный прутки. Химический состав твип стали приведен в табл. 1.

*Таблица 1*

Химический состав исследуемой твип стали

Химический элемент	%
Марганец (Mn)	16-18
Алюминий (Al)	2
Железо (Fe)	Остальное
Углерод (C)	0,62
Кремний (Si)	0,03
Хром (Cr)	0,04
Сера (S)	0,007

Образцы подвергались РКУП.

Технологические особенности:

- Угол пересечения каналов инструмента: 120 °
- Обработка n=1 и n=12
- Деформация при T=400 °C

При помощи металлографического анализа были получены изображения микроструктуры образцов.

При помощи EBSD анализа были получены изображения зеренной структуры материала, распределение зерен по размеру и их разориентировка, а

также определены наличия малоугловых, высокоугловых границ, текстуры в области сканирования.

Микротвердость измерялась по методу Виккерса (Hv) на микротвердомере.

### Результаты исследования и их обсуждение

#### *Исследование исходной микроструктуры TWIP стали*

В исходном состоянии TWIP стали структура однородная, границы зерен хорошо различимы. Также в микроструктуре хорошо выражены двойники внутри зерен.

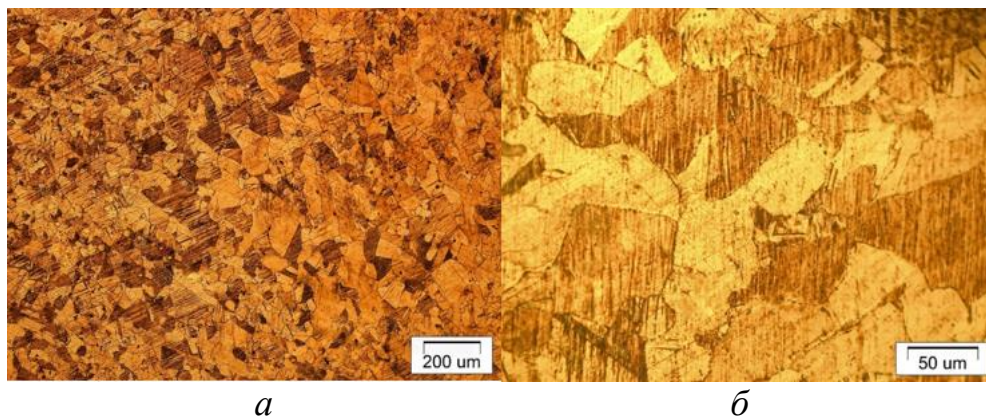


Рис. 1. Изображение исходной микроструктуры TWIP стали при увеличении:

$a - \times 200$ ;  
 $b - \times 50$

Средний размер зерна составляет  $42 \pm 21$  мкм.

#### *Результаты EBSD анализа*

В результате анализа EBSD получены исходная и подверженная РКУП микроструктуры TWIP стали, отличающиеся размером зерна.

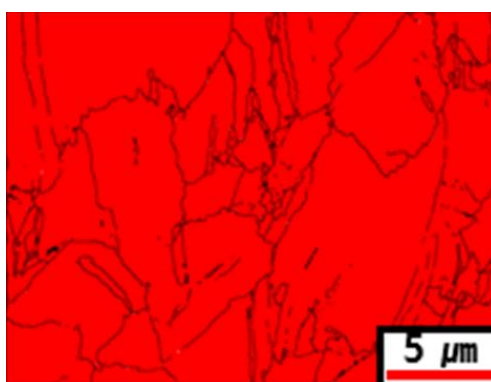


Рис. 2. Изображение исходной микроструктуры TWIP стали, полученной при  $T=1050$  °C в течение 1 часа

Средний размер зерна составляет  $5 \pm 2$  мкм.

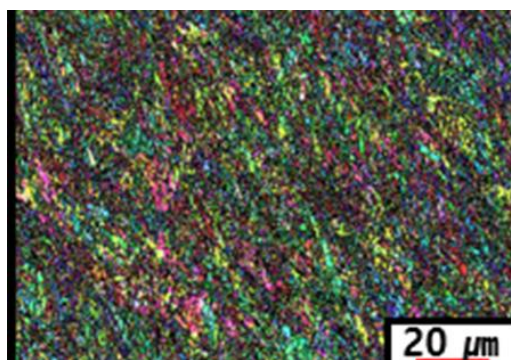


Рис. 3. Изображение микроструктуры TWIP стали после РКУП ( $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $n=1$ )

После РКУП происходит значительное измельчение структуры, границы зерен неразличимы.

*Исследование микротвердости TWIP стали после РКУП при различных температурах и комбинации режимов*

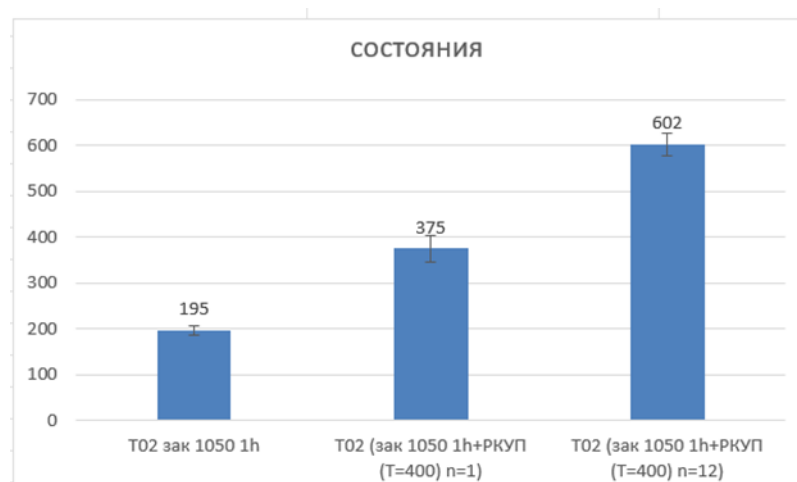


Рис. 4. Гистограмма распределения значений микротвердости TWIP стали

Исследование микротвердости показало, что в исходном состоянии микротвердость составляет  $195 \pm 10$  Hv, РКУП при  $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$  и 1 проходе приводит к увеличению значения микротвердости до  $375 \pm 28$  Hv, после увеличения количества проходов до 12 значения микротвердости увеличиваются до  $602 \pm 25$  Hv.

## Выводы

1. Были сформированы исходные состояния при  $T=1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Средний размер зерна составляет  $42 \pm 21$  мкм, после EBSD анализа средний размер зерен:  $5 \pm 2$  мкм. Границы зерен хорошо различимы, что свидетельствует об их равновесном состоянии. Границы четкие и тонкие. В микроструктуре хорошо различимы двойники внутри зерен. В результате РКУП при  $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $n=1$  (количество проходов) было сформировано состояние в аустенитной стали

отличающееся размером зёрен. РКУП привело к значительному измельчению структуры.

2. Микротвердость в исходном состоянии при  $T=1050^{\circ}\text{C}$  составила  $195\pm 10$  HV, после РКУП  $n=1$  составила  $375\pm 28$  HV, а при  $n=12$   $602\pm 25$  HV. Применение РКУП привело к значительному росту микротвердости (приблизительно в 3 раза).

### Библиографический список

1. Сумынина Т.Б. «Живая» TWIP сталь. Статья в сборнике трудов конференции. 2022. – С. 394-396.

2. 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.

3. 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.

© Сумынина Т.Б., 2023

УДК 669-1

Н.А. ХАЙБУЛИНА

*nkhaibulinaw@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук А.В. ГАНЕЕВ

*Уфимский университет науки и технологий*

### РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В СТАЛИ 13X11H2B2MФ-Ш ПОСЛЕ ХОЛОДНОГО ПРОКАТА И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

*Аннотация:* Данная работа посвящена исследованию влияния деформационно-термической обработки на функциональные свойства стали ЭИ-961Ш.

В ходе исследования было выявлено, влияние деформационно-термической обработки на зарождение и распространение трещин при динамической нагрузке стали.

*Ключевые слова:* холодная прокатка; деформационно-термическая обработка; работа зарождения трещины; работа распространения трещины

### Введение

Для повышения ресурса деталей газовых турбин, работающих при высоких температурах необходимо повышение прочностных свойств материалов при их изготовлении. Сортовой прокат и последующая термическая обработка

(ДТО) является наиболее популярным методом получения заготовок из сталей для крупносерийного производства [1].

Известно, что легирование сталей и изменение структуры материала влияют на прочностные свойства. Легирующие элементы обеспечивают дисперсное твердение материала. За счет формирования мелкого зерна в структуре сталей происходит упрочнение материала в результате увеличения доли границ раздела [2, 3].

При холодном прокате (ХП) изменяются такие свойства, как прочность материала, предел текучести и предел прочности. Было исследовано, что дополнительная перезакалка (ПЗ) в воду увеличивает прочностные характеристики стали. Изменение структуры в стали ЭИ-961Ш увеличивает предел выносливости с 1220 МПа (после ХП) до 1380 МПа (после ХП и дополнительной закалки (ХП+ПЗ)). Установлено, что структура и температура оказывают влияние на ударную вязкость [4]. В связи с этим, актуальностью данного исследования является выявить характер разрушения материала при динамических испытаниях в установленном интервале температур.

Работа разрушения динамическом воздействии делится на две основные составляющие: работа зарождения (РЗТ) и распространения трещин (РРТ). Известные исследования, где использовались такие методы как: модель повреждаемости материала Гарсона-Твергарда-Нилдмана [5], метод с использованием акустической эмиссии, который открывает дополнительные возможности к исследованию процессов при динамическом нагружении [6], также используют методы численного моделирования с использованием программного комплекса ABAQUS [7]. Наиболее используемым методом изучения работ зарождения и распространения трещин при динамических нагрузках описан в работе [8], который предполагает, что максимальное значение силы на диаграмме «Сила – Деформация» является концом зоны зарождения и началом зоны распространения трещины.

Целью настоящей работы является исследование влияния ДТО на поведение феррит-мартенситной стали при динамическом нагружении, а также расчет работы зарождения и распространения трещин.

### **Материал и методики исследования**

В качестве материала для исследования была использована сталь ЭИ-961Ш (13X11H2B2MФ-Ш), химический состав приведен в табл. 1.

*Таблица 1.*

Химический состав стали ЭИ-961Ш, ат.%, не более

C	Si	Mn	Cu	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V
0,1..0,16	До 0,6	До 0,6	До 0,3	1,5..1,8	До 0,025	До 0,03	10,5..12,0	0,35..0,50	1,6..2,0	0,18..0,30

Исходный материал подвергли ХП (20 °С) и ХП с дополнительной закалкой (ХП+ПЗ). Для проката использовали пруток стали после стандартной термической обработки, которому придали форму пластины. Затем имеющиеся



образцы прокатывали в несколько раз на 6-ти валковом прокатном стане скоростью 1,5 м/мин с общей степенью обжатия 50%. Дополнительная перезакалка состояла из нагрева и выдержки 30 мин при 850 °С с последующим охлаждением в масло.

Испытания проводились на системе с падающим грузом для измерения параметров ударных испытаний (вертикальный копер) Instron CEAST 9350 с инструментальной регистрацией нагрузки как функции времени и/или отклонения образца до разрушения. Образцы с концентратором вида V (Тип 12) в соответствии с ГОСТ 9454-78 испытывались при начальной энергии 150 Дж. в интервале температур от – 60 °С до 120 °С.

### Результаты и их обсуждение

В ходе проведения динамических испытаний на ударную вязкость были получены экспериментальные графики сила-деформация (рис. 1) по результатам которых находились работы зарождения и распространения трещин.



Рис. 1. Кривые поглощенной энергии при ударе при температурах от –40 °С до 120 °С:

$a$  – ХП;  
 $b$  – ХП+ПЗ

Для того чтобы определить работу зарождения и распространения трещин использовался метод описанной Л. Р. Ботвиной [8], в котором отмечено, что максимальное значение силы на графике является значением силы, где заканчивается работа зарождения и начинается работа распространения трещины. В ходе исследования было выявлено, что максимальный пик силы достигал 25 кН, являющимся критическим значением для зарождения трещины. Последующее распространение трещины зависило от температуры испытания и вида ДТО.

Работа зарождения и распространения трещины определялась площадью под кривой и рассчитывалась по формуле 1:

$$A = \sum \left( \frac{P_{n+1} + P_n}{2} \cdot (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n) \right), \quad (1)$$

где  $P$  – сила,  $H$ ;  
 $\varepsilon$  – деформация,  $мм$ .

Момент перехода работы зарождения в работу распространения трещины находился в зависимости от максимальной силы полученной кривой. Ниже представлены графики зависимости работы зарождения и распространения трещин от температуры испытания (рис.2).

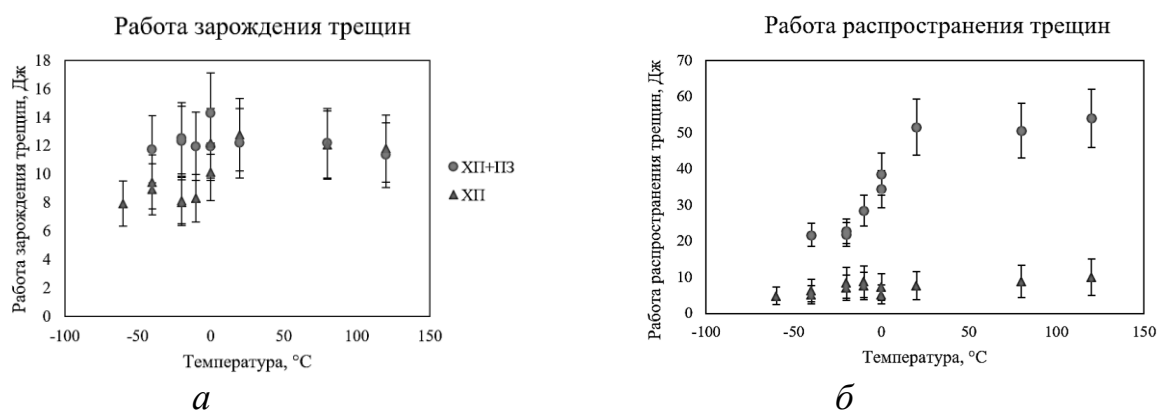


Рис. 2. ХП (▲) и ХП+ПЗ (●) в интервале температур от -40 °C до 120 °C:

$a$  – работа распространения трещин;  
 $b$  – работа зарождения трещин

По полученный данным можно заметить, что ХП работа зарождения трещины изменяется незначительно и остается близкой к  $10 \pm 2$  Дж для ХП, и  $12 \pm 2$  Дж для ХП+ПЗ. В то время как работа распространения трещины для ХП возрастает монотонно от 4 до 10 Дж, а при ХП+ПЗ резко увеличивается от 22 Дж

при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и прекращает свой рост при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , достигая значения 55 Дж.

Подобное поведение можно объяснить увеличением вязкой составляющей в исследуемых образцах. Увеличение вязкой составляющей приводит к увеличению длины плато с максимальным поглощением энергии удара материалом [7]. Таким образом. По характеру кривой можно не только определить работу энергии, но и иметь представление температуры хрупко-вязкого перехода ( $T_{\text{хвп}}$ ). Эта температура зависит от структуры материала, что хорошо заметно по графикам на рисунке 1б. Для состояния ХП+ПЗ температура  $T_{\text{хвп}}$  составляет  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для состояния ХП определить  $T_{\text{хвп}}$  затруднительно из-за близкого расположения кривых. Что требует дополнительного фактографического анализа поверхности излома образцов.

С дальнейшим увеличением температуры испытаний на ударный изгиб работа распространения трещины достигает максимальных значений и практически не растет.

### **Заключение**

Проведен графический анализ данных поглощенной энергии при динамических испытаниях на ударный изгиб образцов стали ЭИ-961Ш после холодной прокатки и дополнительной перезакалки в интервале температур от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

По экспериментальным данным рассчитана работа зарождения и распространения трещины. Показано, что работа зарождения трещины не зависит от структуры стали и температуры испытания и составляет  $10\pm 2$  Дж. Работа распространения трещины является структурно температурной зависимой величиной и достигает максимума 55 Дж.

Графический анализ позволяет определить температуру хрупко-вязкого перехода. Для после холодной прокатки и перезакалки  $T_{\text{хвп}}$  составляет  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### **Библиографический список**

1. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебное пособие / М.Ю. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во Машиностроение, 1990. – 528 с. – ISBN 5-217-00858-X.
2. Тарасенко, Л.В. Процессы фазовой нестабильности в жаропрочных сталях при длительных нагревах / Л.В. Тарасенко, В.И. Титтов // ВИАМ/2005-204373.
3. Оболенская, А.А. Исследование свойств механически легированных сталей / А.А. Оболенская, К.К. Рыбалко // Инновационные технологии в машиностроении, образование в экономике. – 2017. – № 4-1 (6). – С. 16–19.
4. Фрик, А.А. Влияние прокатки и дополнительной термической обработки на структуру и прочностные свойства стали ЭИ-961Ш / А.А. Фрик, М.А. Никитина, Р.К. Исламгалиев // Вестник УГАТУ. – 2021. – № 3 (93). – С. 10–17.

5. Gurson, A.L. (1977). Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. *Journal of Engineering Materials and Technology-transactions of The Asme*, 99, P. 2-15.

6. Оценка хрупкой прочности Fe-Cr-Ni-Mo мартенситно-старееющей стали методом инструментированных ударных испытаний / С.В. Гладковский, Е.М. Бородин, С.В. Смирнова [и др.] // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I междунар. интерактив. науч.-практ. конф. [13-19 дек. 2011 г., г. Екатеринбург]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. – Ч. 1. – С. 401-407.

7. Кондряков, Е.А. Расчетное определение момента зарождения трещины в стандартных образцах Шарпи и образцах с боковыми надрезами / Е.А. Кондряков, А.В. Панасенко. – Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування №1 (73). 2015. С. 38-43.

8. Ботвина, Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности/ Л.Р. Ботвина. – Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. – М.: Наука, 2008. – 334 с. – ISBN 978-5-02-032647-7.

© Хайбулина Н.А., 2023

УДК 621.9.047.7

Р.З. ХАМАТДИНОВ, И.А. РАМАЗАНОВ

*khamatdinov.rz@ugatu.su*

Науч. руковод. – доктор техн. наук, проф. Е.В. ПАРФЕНОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ СТАЛИ 20X13 НА РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭЛЕКТРОЛИТА И ИСХОДНЫХ ПОДГОТОВКАХ ПОВЕРХНОСТИ**

*Аннотация:* В статье исследовано влияние исходной подготовки поверхности и температуры электролита на процесс электролитно-плазменного полирования стали 20X13.

*Ключевые слова:* электролитно-плазменное полирование; сталь 20x13

### **Введение**

Развитие авиационных и других отраслей промышленности предполагает соответствия жёстким стандартам и высоким требованиям к деталям из металлов и сплавов [1].

Одним из перспективных сплавов является сталь 20X13, которая применяется во многих направлениях машиностроения [2]. В задачах финишной

обработки поверхности подобных сталей используют методы механического, химического и электрохимического полирования [3], что способствует уменьшению шероховатости и повышению коррозионной стойкости деталей. Исследование влияния иных способов финишной обработки является актуальным направлением исследований. В случае механической обработки полирование обеспечивается абразивными кругами, часто с сочетанием с вибрационными технологиями [3]. Однако данный процесс довольно трудоёмкий, требует больших временных затрат и не исключает введение частиц абразивов в изделие. Во время химического полирования обычно параллельно уменьшаются неровности поверхности при её растворении, а также образуется оксидная пленка при воздействии раствора на материал [3,5]. Электрохимическая обработка заключается в погружении детали в электролит под напряжением 10-20 В и растворении микровыступов по закону электролиза Фарадея; в ходе анодной поляризации происходит уменьшение шероховатости поверхности [3,5]. Для данных подходов характерны высокая агрессивность веществ, коррозия технологического оборудования, вредные условия труда для обслуживающего персонала и трудоёмкость при утилизации отходов производства.

Существует необходимость избавиться от основных недостатков описанных методов при обработке поверхности сталей. Таковым является процесс электролитно-плазменного полирования (ЭПП). Он отличается от электрохимического полирования применением высокого напряжения (200 В и более) и использованием безопасных электролитов на основе разбавленных водных растворов нетоксичных солей [3,6]. В ходе процесса ЭПП образуется парогазовая оболочка (ПГО), которая отделяет поверхность изделия от электролита, распределяется равномерно и регулирует скорость растворения за счёт своего отрицательного динамического сопротивления. ПГО оказывает значительное влияние на обрабатываемую поверхность [4]. Поверхность подвергается сразу гидродинамической, плазмохимической и термической обработке, что в совокупности эффективно сглаживает микронеровности, и обеспечивает полирование. После ЭПП достаточно одного промыва в тёплой воде. Данный подход экономичнее и быстрее остальных рассмотренных выше. Электролиты используются безвредные и легко утилизируемые. Процесс поддаётся механизации и автоматизации, однако требуются большие энергетические затраты пиковой мощности, а также появляются дополнительные требования по электробезопасности при работе с технологическим источником повышенного напряжения.

Цель исследования заключается в установлении влияния исходной подготовки поверхности стали на процесс электролитно-плазменного полирования стали 20X13 при различной исходной температуре.

### **Материалы и методы**

Процесс электролитно-плазменного полирования (ЭПП) проводился на специальной установке, разработанной в Уфимском университете науки и технологий. Для исследования влияния температуры образцы стали 20X13

(размеры 60x20x5 мм), которые предварительно были обработаны до шероховатости 0,32 мкм и 0,08 мкм. Всего 6 образцов. Они были подвергнуты ЭПП при напряжении 300 В при различных температурах электролита (70, 80, 90 °С), а именно 5 % растворе сульфата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Температура электролита поддерживалась постоянной с точностью до 3 °С. Процесс проводился в 3 этапа: 1, 3, 5 минут от общего начала обработки. После каждого этапа проводились измерения поверхностных свойств. Шероховатость поверхности образцов  $R_a$  определялась с помощью профилометра TR220. Измерение массы проводилось на лабораторных аналитических весах ВЛ-120С. На растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6490LV были получены топографии поверхностей образцов до и после ЭПП.

## Результаты и их обсуждение

Графики зависимостей шероховатости  $R_a$  и убыли массы образцов от времени приведены на рис. 1. РЭМ-изображения поверхности до и после ЭПП приведены на рис. 2 и рис. 3

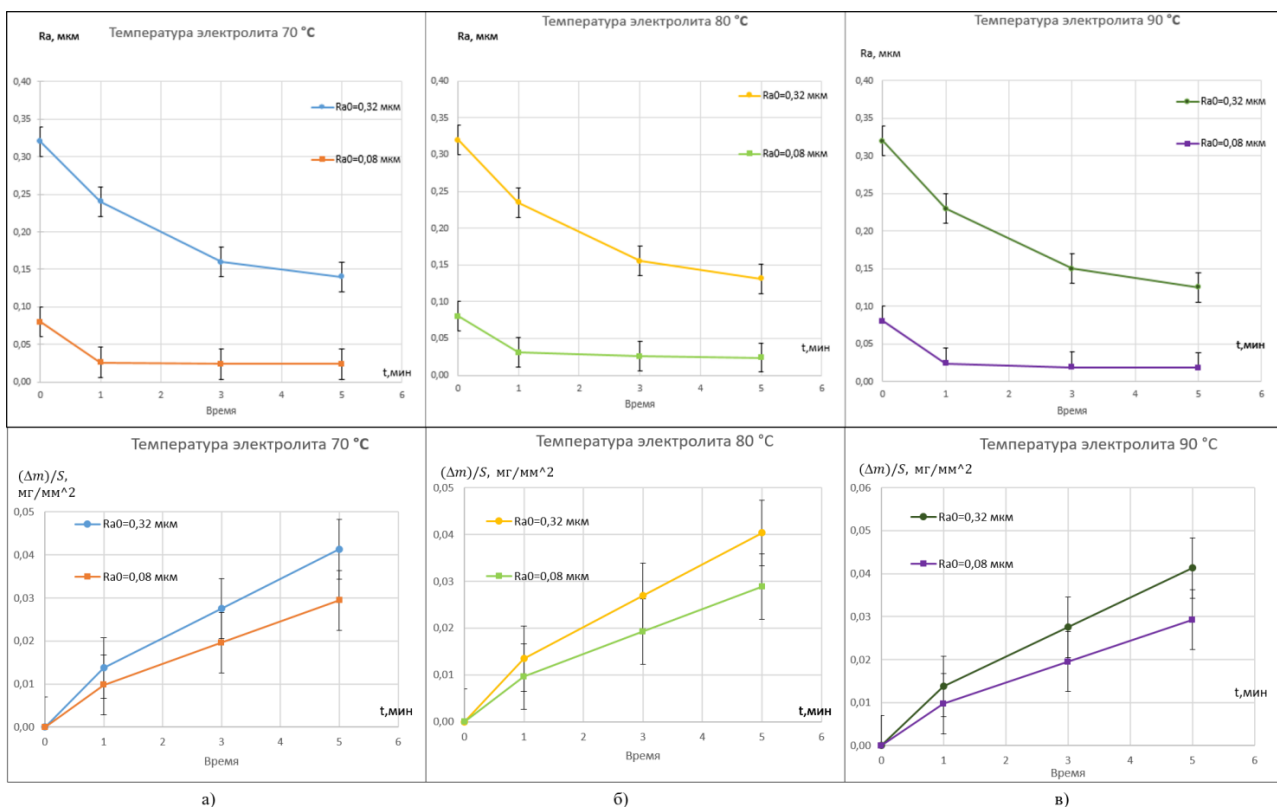
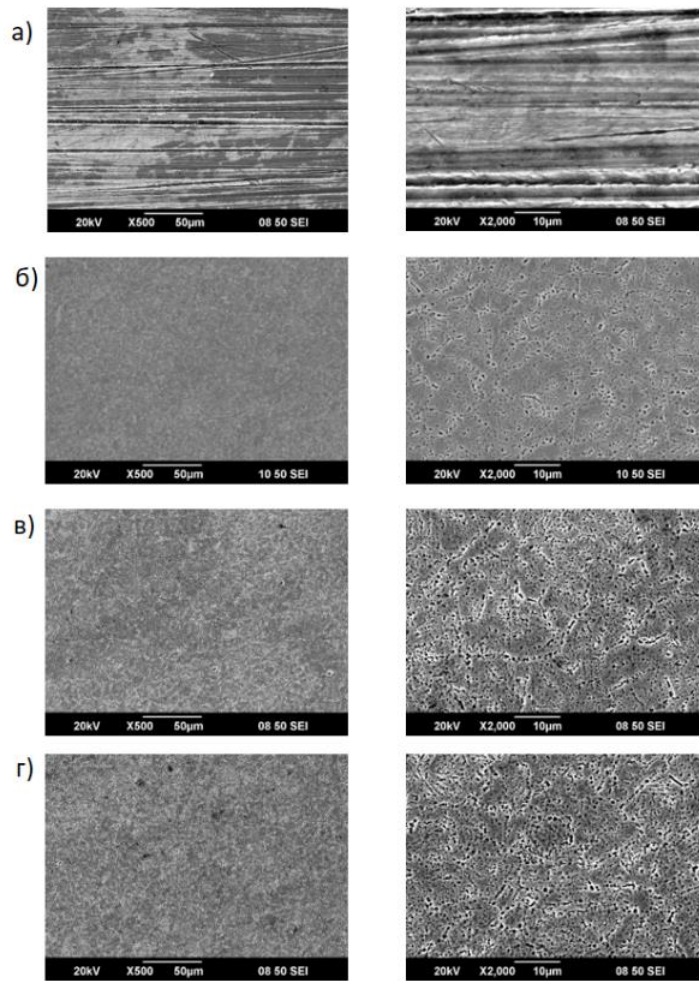


Рис. 1. Графики зависимости изменения шероховатости  $R_a$  (сверху) и убыли массы образцов (снизу) от времени при различных температурах электролита:

а – 70 °С;

б – 80 °С;

в – 90 °С



*Рис. 2.* Снимки образцов на РЭМ с исходной шероховатостью  $Ra_0=0,32$  до и после ЭПП при разных температурах в течении 5 минут:

- a* – исходный;
- б* – после ЭПП 70 °С;
- в* – после ЭПП 80 °С;
- г* – после ЭПП 90 °С

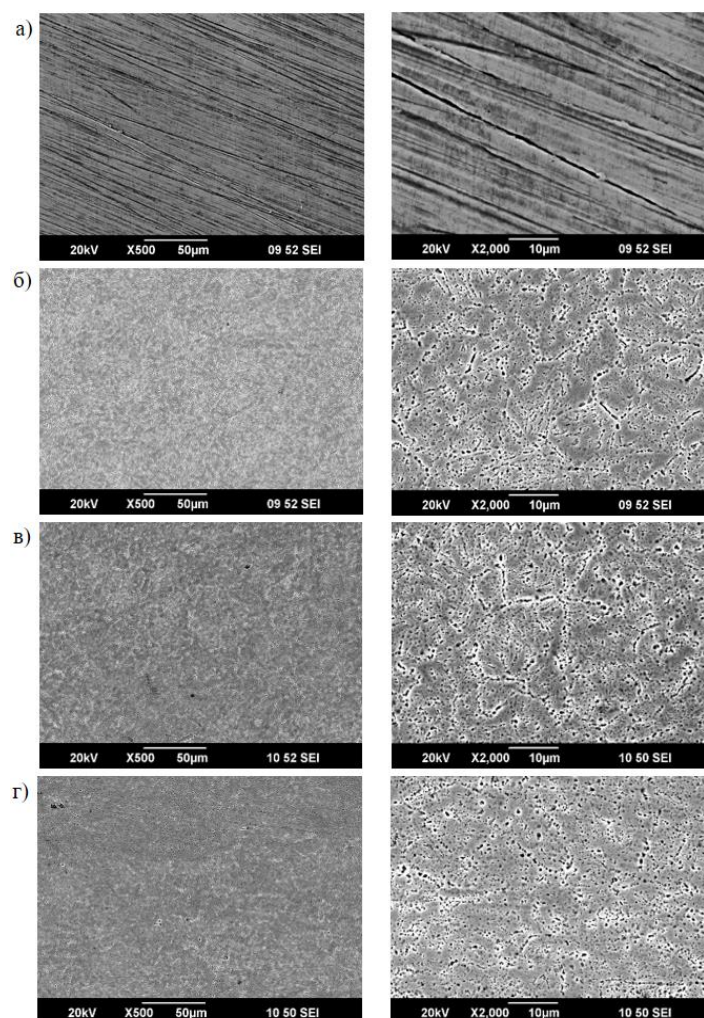


Рис. 3. Снимки образцов на РЭМ с исходной шероховатостью  $Ra_0=0,08$  до и после ЭПП при разных температурах в течении 5 минут:

- a* – исходный;
- б* – после ЭПП 70 °С;
- в* – после ЭПП 80 °С;
- г* – после ЭПП 90 °С

При исследовании различных температур электролита (70–90 °С) удалось достичь эффекта полирования во всем диапазоне. Из полученных результатов стало ясно, что использование электрополировки позволяет снизить шероховатость поверхности стали 20X13 до значения в диапазоне от 0,09 до 0,11 мкм. Снижение шероховатости происходит экспоненциально. В случае, если исходная шероховатость равна 0,32 мкм, увеличение температуры электролита способствует ускоренному процессу полирования стали 20X13. Это связано с более сильным гидродинамическим воздействием парогазовой оболочки (ПГО) [1]. Изменение шероховатости образцов с исходной шероховатостью 0,08 мкм незначительно.

С увеличением температуры электролита при ЭПП происходит увеличение доли вытравленных областей на поверхности. При использовании различных температурных режимов, риски, образованные после предварительного



шлифования, полностью вытравливаются. Однако волнистость поверхности остается. Это подтверждается измерениями шероховатости и толщины слоя поверхностного слоя, где при повышении температуры электролита процесс ЭПП становится более эффективным.

На изображениях образцов с начальной шероховатостью 0,08 мкм после 5 ЭПП можно заметить, что доля вытравленных областей остается одинаковой во всех температурных режимах. Это также подтверждается одинаковыми средними значениями шероховатости во всех трех температурных режимах.

Влияние температуры электролита в основном отражается на скорости обработки. Независимо от изучаемого диапазона температур электролита (70–90 °С) при начальной шероховатости Ra 0,32 мкм у образцов из стали 20X13 возможно снижение этого параметра в 2 раза в течение 1–3 минут ЭПП и достижение предела в диапазоне шероховатости Ra 0,09–0,11 мкм после 5 минут. Влияние ЭПП на образцы с исходной шероховатостью 0,08 мкм при тех же условиях было незначительным для этого параметра. Уменьшение массы образцов пропорционально увеличивается с увеличением продолжительности обработки, что можно объяснить стабильностью процесса. Во всех случаях обнаружены карбиды Fe<sub>23</sub>C<sub>6</sub> и Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, которые образуются в отжиге стали 20X13.

### **Выводы**

В ходе проведенной работы были исследованы аспекты влияния температуры электролита и исходного состояния поверхности на процесс ЭПП стали 20X13. Выявлено, что ЭПП снижает шероховатость Ra поверхности стали 20X13 до диапазона 0,09–0,11 мкм. После ЭПП на поверхности образовались ямки, которые вызваны вытравливанием карбида хрома по границам аустенитных зерен. Требуется дополнительное исследование влияния ЭПП на механические свойства стали 20X13.

### **Библиографический список**

1. Основы материаловедения (металлообработка): учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / [В.Н. Заплатин, Ю.И. Сапожников, А.В. Дубов и др.]; под ред. В.Н. Заплатина. – 8-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2017. – 272 с.
2. Иванников Е.В. Конструкционные стали и сплавы для заданных изделий: учеб. пос. [Текст]. – Липецк: Издательство Липецкого государственного технического университета, 2017. – 83 с.
3. Куликов, И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. – Минск: Беларус. наука, 2010. – 232 с.
4. Ушомирская Л.А. Формирование газовой анодной оболочки и ее влияние на возможности электролитно-плазменной обработки сложных поверхностей / Л.А. Ушомирская, В.И. Новиков, А.И. Фоломкин // *Металлообработка*. 2012. № 3. Рр. 11–14.

5. Грилихес, С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойства металлов / С.Я. Грилихес. – Л.: Машиностроение, 1987. – 232 с.

6. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление [Текст] / [Е.В. Парфенов и др.]. – Москва: Машиностроение, 2014. – 380 с.

© Хаматдинов Р.З., 2023

УДК 620.186.5

Д.А. ШАРАФУТДИНОВ, Э.И. УСМАНОВ  
danil.sharf03@gmail.com, usm4nov-emil@yandex.ru, rovaliev@gmail.com  
Науч. руковод. – канд. техн. наук Р.Р ВАЛИЕВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ВЛИЯНИЕ ИПДК НА МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ**

*Аннотация:* В настоящей работе представлены результаты исследования влияния интенсивной пластической деформации на структуру и микротвердость титанового сплава ВТ6, полученного электронно-лучевой аддитивной технологией (ЭЛАТ). Деформационную обработку проводили методом интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК). По результатам исследования определено, что обработка ИПДК 3D-напечатанного методом ЭЛАТ сплава ВТ6 позволяет сформировать в объеме материала ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру со средним размером зерен  $100 \pm 5$  нм и высокой плотностью дефектов кристаллической решетки. В результате наблюдается увеличение микротвердость сплава почти в 1,5 раза с  $307 \pm 4$  до  $448 \pm 4$  НВ.

*Ключевые слова:* титановый сплав ВТ6; ИПДК; УМЗ структура; микротвердость; электронно-лучевая аддитивная технология

### **Введение**

В последнее время активное развитие получили аддитивные технологии, которые подразумевают послойное выращивание изделий, что позволяет получать готовые заготовки различной геометрии с минимальным расходом сырья [1]. Для аддитивного производства изделий из титановых сплавов наиболее часто используются электронно-лучевые и лазерные методы аддитивного производства [2]. В настоящей работе применяется метод проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии (ЭЛАТ), который заключается в расплавлении с помощью электронного луча специальной

проволоки и затвердевании полученного расплава на подложке [3]. Траектория движения наплавляемого слоя определяет геометрию получаемой заготовки. Известно, что методом ЭЛАТ можно получать заготовки титанового сплава ВТ6, который является одним из наиболее широко распространенных конструкционных материалов в авиационной промышленности благодаря своей высокой удельной прочности и коррозионной стойкости при повышенных температурах. В частности, благодаря данным преимуществам, титановый сплав ВТ6 применяется для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД) [4]. Однако 3D-напечатанный методом ЭЛАТ сплав ВТ6 обладает невысокими прочностными свойствами по сравнению со сплавом, полученным традиционными методами (литье, горячая прокатка и т.д.) [2-4]. В этой связи актуальной задачей является повышение прочностных характеристик 3D-напечатанного методом ЭЛАТ титанового сплава ВТ6.

Известно, что прочностные свойства металлов и сплавов можно повысить с помощью измельчения их зеренной структуры, используя интенсивную пластическую деформацию (ИПД) [5]. В частности, интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) позволяет измельчить зеренную структуру до размеров около 100 нм и накопить высокую плотность дефектов кристаллической решетки, что в свою очередь значительно повышает прочностные свойства [5].

Целью настоящей работы является исследование влияния интенсивной пластической деформации кручением на микроструктуру и микротвердость титанового сплава ВТ6, полученного методом ЭЛАТ.

### **Материал и методики исследования**

В качестве материала для исследований использовали титановый сплав ВТ6 (состав, вес. %: Al – 4,7; V – 4,1; Fe – 0,1; O – 0,2; Ti – основа), 3D-напечатанный методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии в ИФПМ СО РАН, г. Томск, Россия. Плавление проволоки осуществлялось электронной пушкой с плазменным катодом в вакууме  $1,3 \times 10^{-3}$  Па. Подача проволоки осуществлялась со скоростью 2 м/мин под углом  $35^\circ$  к поверхности опорной плиты. Перемещение опорной плиты относительно электронного луча осуществлялось по меандровой траектории с зеркально наплавленными слоями со скоростью 2,2 мм/с. Из полученной заготовки выточили пруток  $\varnothing 20$  мм и затем из него, при помощи электроэрозионного станка АРТА-120, вырезали образцы  $\varnothing 20$  мм и высотой 2 мм для проведения деформационной обработки и дальнейших исследований.

Для формирования ультрамелкозернистой структуры образец подвергали ИПДК при комнатной температуре и удельным сжимающим давлением 6 ГПа на уникальной научной установке СКРУДЖ-200 в НИИ ФПМ ФГБОУ ВО «УУНиТ», Уфа, Россия. Скорость вращения нижнего бойка составляла 0,2 об/мин с целью исключения проскальзывания образца. В результате были получены образцы в виде дисков с УМЗ структурой диаметром 20 мм и толщиной 0,9-1,0 мм.

Исследование микроструктуры образцов проводили на оптическом микроскопе (ОМ) Olympus GX53 и просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEOL JEM-2100, работающего при ускоряющем напряжении 200 кВ. Для микроструктурных исследований изготавливали тонкие фольги, путем механического утонения заготовок на шлифовальной бумаге до толщины 0,1–0,2 мм с последующей их электролитической полировкой на установке “Tenipol-5” с использованием электролита следующего состава: 300 мл метанол (СН<sub>3</sub>ОН), 175 мл бутанол (С<sub>4</sub>Н<sub>9</sub>ОН), 30 мл хлорная кислота (НСlO<sub>4</sub>).

Измерения микротвердости проводили на микротвердомере “Buehler Omnimet”. 136-градусную алмазную пирамиду Виккерса вдавливали в образец, приложив на индентор нагрузку 100 г с выдержкой 15 секунд. Измерение микротвердости сплава после ИПДК проводили в области, находящейся в 5 мм от центра образца. Для расчета среднего значения микротвердости брали не менее сорока измерений. Анализ отпечатков микротвердости проводили на ПК с использованием соответствующего программного обеспечения.

### Результаты исследований

Исходная микроструктура сплава ВТ6, полученного методом ЭЛАТ, представлена на рис. 1. На данном изображении видно, что структура достаточно однородна и состоит из крупных первичных  $\beta$  – зерен, внутри которых наблюдается мартенситная  $\alpha'$  – фаза с пластинчатой морфологией. Продольные размеры  $\beta$  зерен составляют примерно 17 мкм, поперечные – 1,5 мкм. Средняя ширина пластин  $\alpha'$  – Ti составляют около 1 мкм.

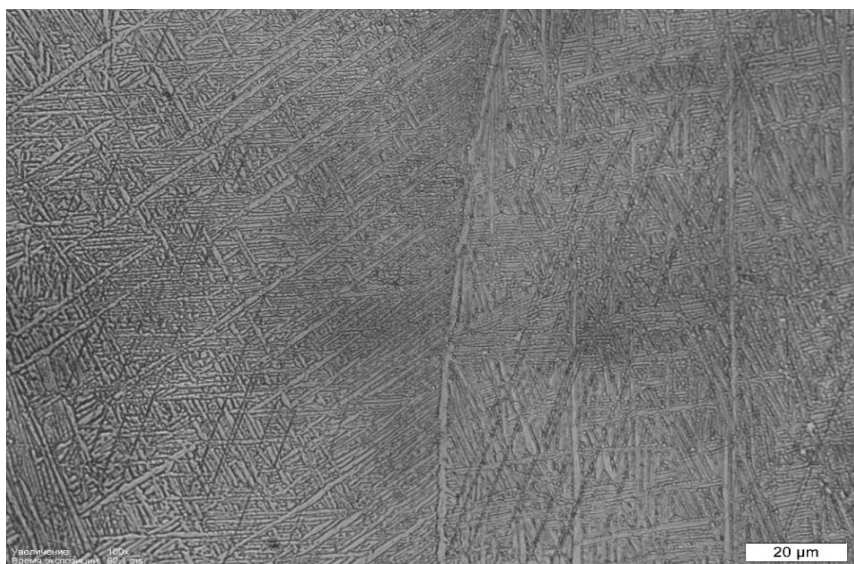
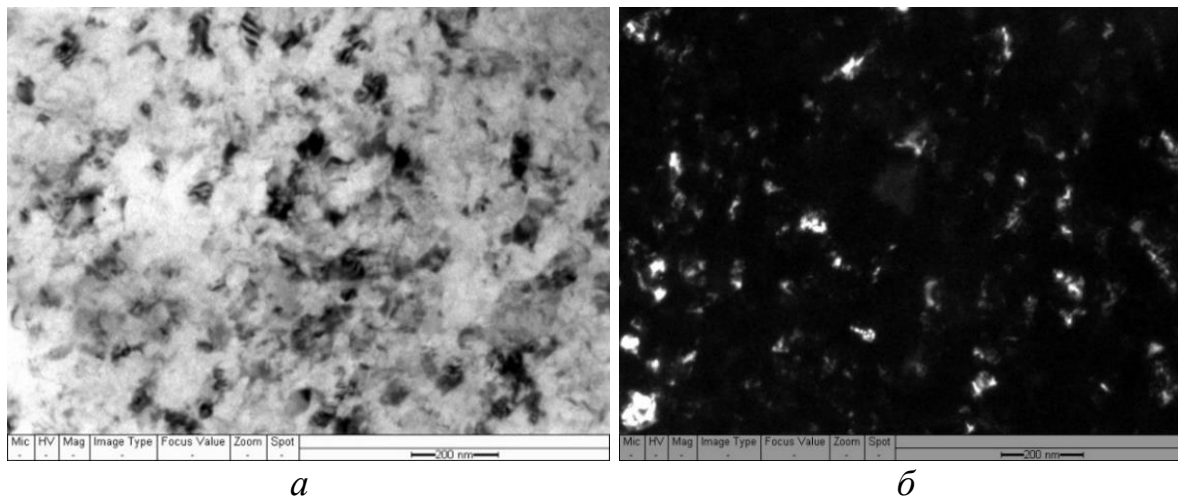


Рис. 1. Исходная микроструктура 3D-напечатанного методом ЭЛАТ сплава ВТ6 (ОМ)

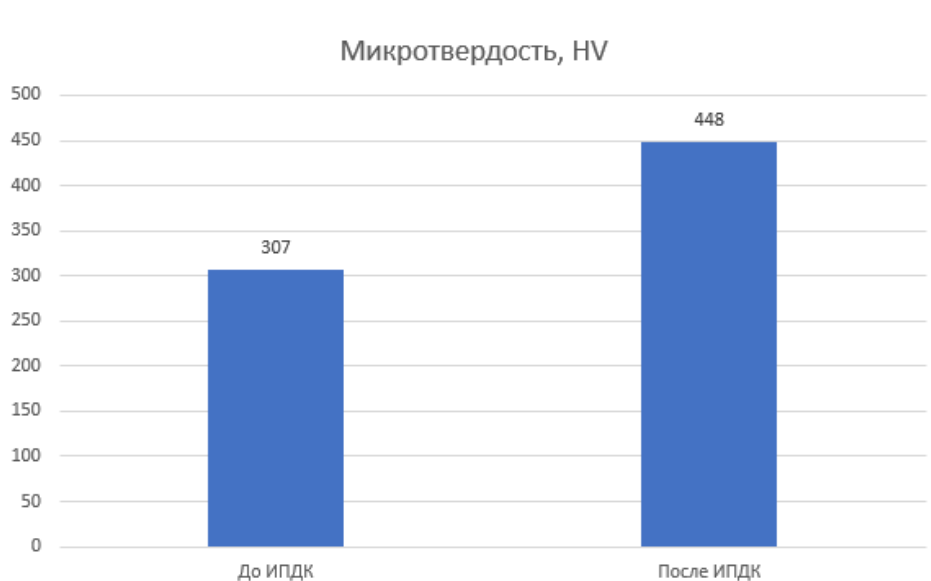
После деформационной обработки методом ИПДК по режиму 10 оборотов при комнатной температуре, в титановом сплаве ВТ6 формируется УМЗ структура со средним размером зерен около  $100 \pm 5$  нм. По отсутствию контраста границ зерен можно также судить о накоплении в результате обработки крайне

высокой плотности дефектов кристаллической решетки. Микроструктура 3D-напечатанного методом ЭЛАТ сплава ВТ6 в ПЭМ после ИПДК представлена на рис. 2.



*Рис. 2.* Микроструктура 3D-напечатанного методом ЭЛАТ сплава ВТ6 после ИПДК (ПЭМ):  
*a* – светлопольное изображение;  
*б* – темнопольное изображение

На рис. 3 представлены результаты измерений микротвердости 3D-напечатанного методом ЭЛАТ титанового сплава ВТ6 в исходном состоянии и после ИПДК. Микротвердость в исходном состоянии составляет  $307 \pm 4$  НВ. Деформационная обработка методом ИПДК при комнатной температуре приводит к значительному повышению микротвердости, которое достигает значения  $448 \pm 4$  НВ, такое повышение показателей микротвердости обусловлено сильным измельчением зеренной структуры и накоплением высокой плотности дефектов кристаллической решетки в результате ИПДК.



*Рис. 3.* Микротвердость сплава ВТ6, полученного методом ЭЛАТ, до и после ИПДК

### **Заключение**

В настоящей работе было исследовано влияние ИПДК на структуру и микротвердость 3D-напечатанного методом ЭЛАТ титанового сплава ВТ6.

В результате работы определено, что обработка ИПДК позволяет сформировать в объеме 3D-напечатанного методом ЭЛАТ титанового сплава ВТ6 УМЗ структуру со средним размером зерен около  $100 \pm 5$  нм и накоплению высокой плотности дефектов кристаллической решетки. В результате после обработки методом ИПДК наблюдается значительное повышение микротвердости 3D-напечатанного сплава ВТ6 до значений равным примерно  $448 \pm 4$  HV.

Полученные результаты будут полезны для описания структурных особенностей после поверхностных обработок 3D-напечатанного сплава ВТ6 методами ИПД, например, трением с перемешиванием

### **Библиографический список**

1. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1. № 1-2. С. 208-216.

2. Маркушев М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов // Письма о материалах. 2011. Т. 1. № 1. С. 36-42.

3. Panin A.V., Kazachenok M.S., Dmitriev A.I., Nikonov A.Y., Perevalova O.B., Kazantseva L.A., Sinyakova E.A., Martynov S.A. The effect of ultrasonic impact treatment on deformation and fracture of electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V under uniaxial tension // Materials Science and Engineering: A. 2022. Vol. 832. P. 142458.

4. А. Г. Илларионов, А. А. Попов. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2014. 137 с.

5. Valiev R.R., Panin A.V., Usmanov E. I., Savina Y. N., Valiev R.Z. Microstructural Transformation and Enhanced Strength of Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufactured Ti-6Al-4V Alloy Induced by High-Pressure Torsion // Adv Eng Mater. 2023. P. 2300814.

© Шарафутдинов Д.А., 2023

УДК 621.762

В.С. ШТАТНОВА, О.М. ХАПКОВ

*Shtatnova98@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент А.В. КУРОЧКИН

*Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П.А. Соловьева*

## **РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

*Аннотация:* На основе приведенных в работе исследований сделан вывод о преимуществе порошкового материала  $TiC_{25}Ni_6BN$  и технологии его изготовления перед аналогами. Предлагаемый материал способен превзойти порошковые материалы ( $WC$ ,  $CrC$ ), используемые в различных сферах в качестве защитных покрытий на поверхностях ответственных деталей.

*Ключевые слова:* порошковая металлургия; композиционные материалы; карбид титана; защитные покрытия

Современное машиностроение характеризуется высокими требованиями к надежности и долговечности конструкции. Это обеспечивается нанесением на детали специальных покрытий или искусственно созданными поверхностными слоями, которые должны обеспечивать такие эксплуатационные характеристики, как: коррозионная стойкость, износостойкость, теплостойкость и др. Выбор покрытий осуществляется в зависимости от условий эксплуатации деталей.

В машиностроительной и нефтегазовой промышленности подавляющее большинство изделий подвергают гальванизации. В качестве защитного покрытия используется твердое хромирование, которое характеризуется простотой технологического процесса и доступностью материалов, но при нанесении его на титановые и алюминиевые сплавы процесс существенно усложняется. Это выражено в использовании дополнительных операций, что в совокупности всех факторов ухудшает характеристики покрытий и снижает технико-экономические показатели. В качестве альтернативы твердому хромированию рассматриваются материалы (на основе карбида вольфрама ( $WC$ ) или карбида хрома ( $CrC$ )) наносимые методами газотермического напыления.

Наиболее востребованными в сфере защитных покрытий являются материалы от производителя Oerlicon Metco (Швейцария). К ним относятся композиционные порошки  $Cr_3C_2-25NiCr$  марки WOKA 7202 и  $WC_{10}Co_4Cr$  марки WOKA 3652. На сегодняшний день поставки от швейцарской компании приостановлены, что привело к возникновению дефицита композиционных порошков на основе вышеупомянутых карбидов. В связи с потребностью в импортозамещении, ООО «СТК» разработало аналоги указанных

композиционных порошков под названием КХНХ-25 и ВКХ, которые уже активно используются в работе.

Как следствие, исходные порошки для изготовления аналогов пользуются большим спросом, а из-за образовавшегося в Российской Федерации дефицита, значительно возрастает их стоимость и истощается потенциал. Основываясь на рисках дефицита, стал актуальным вопрос о частичной замене существующих на отечественном рынке зарубежных композиционных порошков.

Карбид вольфрама (WC) и карбид хрома (CrC) можно заменить на карбид титана (TiC), количество ресурса которого на территории РФ значительно больше. В дальнейшем такая модернизация позволит снизить влияние рынка импортных материалов.

Замена основного кермета (WC, CrC) на карбид титана (TiC) также подразумевает и новую технологию разработки композиционного материала. Технологии схожи на этапах подбора материалов и агломерации распылительной сушкой, которая позволяет получить сферообразные частицы. Распылительная сушка подразумевает собой тепло- и массообменный процесс агломерации исходных компонентов, которые ранее были соединены в суспензию со связующим веществом (клеообразный элемент, объединяющий все компоненты в одно целое). В большинстве случаев распылительная сушка не обеспечивает необходимую прочность частиц, а также не до конца удаляет связующее вещество.

В привычной технологии в качестве конечной операции используется высокотемпературное спекание, в то время как отличительной особенностью новой является плазменная сфероидизация. Её преимущества заключаются в получении более плотных частиц и повышении качественных характеристик композиционного порошка. Плазменная сфероидизация позволяет повысить значение насыпной плотности не менее чем в 1,5 раза. При такой окончательной операции пористость оболочки сферических частиц будет достигать минимума. Помимо указанных характеристик, за счет термического воздействия в установке плазменной сфероидизации происходит равномерное распределение элементов в частице.

Данные аспекты в совокупности положительно скажутся на структуре и качестве защитного покрытия. В результате использования этой операции снизится пористость покрытия, которая повысит сопротивление окислению (жаростойкость), сопротивление на изгиб и сопротивление термическим ударам. Разрабатываемый композиционный порошок имеет в своем составе в качестве основного материала карбид титана в никелевой матрице с гексагональным нитридом бора и химическим составом  $TiC_{25}Ni_6BN$ . Добавление в состав порошкового материала гексагонального нитрида бора позволяет добиться получения покрытия с повышенной смазочной способностью без увеличения абразивного износа деталей.

Композиционный материал  $TiC_{25}Ni_6BN$  предназначен для высокоскоростного газотермического напыления на поверхности деталей ответственного назначения, к примеру, на гидроцилиндры и компоненты насосов для нефтегазовой и авиационной промышленности, «короткоресурсные» пары



трения (например, шасси самолетов и штоки гидроцилиндров). Применение такого покрытия положительно скажется на параметрах износостойкости, коррозионной стойкости и фрикционных характеристиках обрабатываемых деталей. Прогнозируемые характеристики композиционного материала указаны в табл. 1.

Таблица 1

Прогнозируемые характеристики композиционного материала

Характеристика продукта TiC25Ni6BN	Параметр
Химический состав, %	TiC – основной компонент Ni – 24...26 BN – 5...7
Размер фракции зерна, мкм	20...45
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	4,5...5,5
Морфологические характеристики	Сферические частицы

Исключение в химическом составе композиционного материала TiC25Ni6BN таких компонентов как хрома, нихрома, алюминия и других примесей является одним из преимуществ композиции, так как из-за высокой коррозионной стойкости основного кермета (TiC) в составе, повышается чистота продукта. В табл. 2 приведены температуры окисления материалов, используемых в качестве основного компонента.

Таблица 2

Температуры окисления

Наименование	Температура, °C
Карбид титана	от 1100 до 1200
Карбид хрома	от 900 до 1000
Карбид вольфрама	от 500 до 600

За счет своих характеристик применение карбида титана (TiC) способно увеличить рабочую температуру покрытия по сравнению с карбидом вольфрама (WC) и карбидом хрома (CrC). В композиционном материале TiC25Ni6BN в качестве твердой смазки применяется нитрид бора (BN). Нитрид бора твердый смазочный материал, который характеризуется антифрикционными свойствами при трении в экстремальных условиях, что обеспечит снижение коэффициента трения покрытия без сопутствующего увеличения абразивного износа деталей. Прогнозируемые свойства покрытия приведены в табл. 3.

Прогнозируемые характеристики параметра

Характеристика продукта	Параметр
Коэффициент трения	0,1
Микротвердость, HV	800...1500
Рабочая температура, °С	До 800

В связи с потребностью в импортозамещении композиционных материалов, которые наиболее часто используются в защитных покрытиях, на территории РФ возрос спрос на изготовление аналогов. Ресурсный потенциал основных компонентов (WC, CrC) оказался слишком низок, поэтому в разработке их стали замещать на карбид титана (TiC), который находится в достаточном объеме.

Замена основного кермета также подразумевает и новую технологию разработки композиционного материала. Речь идет о применении плазменной сфероидизации вместо высокотемпературного спекания в качестве финального этапа изготовления. Применение технологии плазменной сфероидизации позволит повысить основные характеристики (сферообразность, пористость, насыпная плотность).

Разрабатываемый композитный материал TiC<sub>25</sub>Ni<sub>6</sub>BN способен превзойти порошковые материалы, которые на данный момент используются в различных сферах в качестве защитных покрытий на поверхностях деталей ответственного назначения. Применение такой композиции позволит повысить рабочую температуру покрытия и снизить коэффициент трения.

© Штатнова В.С., Халков О.М., Курочкин А.В., 2023

## СЕКЦИЯ 2.2. МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

УДК 006.86

Г.А. АБДУРАСУЛОВА

*abdurasulova2003@mail.ru*

Науч. руковод. – старший преподаватель А.Ф. САФИНА

*Уфимский университет науки и технологий*

### МЕЖЛАБОРАТОРНЫЕ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*Аннотация:* В статье рассмотрены вопросы проведения межлабораторных сравнительных испытаний показателей качества электрической энергии. Представлен порядок проведения данной процедуры, основные документы и результаты испытаний.

*Ключевые слова:* межлабораторные сравнительные испытания, показатели качества электрической энергии, провайдер, референтная лаборатория, приписанные значения

В настоящее время проведение межлабораторных сравнительных испытаний (МСИ) играет важную роль в обеспечении единства измерений, поскольку является наиболее объективным и эффективным способом определения реального уровня работы лабораторий. Одним из основных преимуществ МСИ можно назвать возможность сравнивать результаты измерений, полученные различными лабораториями, и определение степени их соответствия. Это позволяет выявить систематические ошибки в их работе, а также оценить точность и достоверность результатов.

Межлабораторные сравнительные испытания представляют собой организацию, проведение и оценку измерений или испытаний одних и тех же или аналогичных образцов в нескольких лабораториях при определенных условиях.

К нормативным документам в области межлабораторных испытаний относятся:

1. ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации»;

2. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»;

3. РМГ 103-2010 «Проверка квалификации испытательных (измерительных) лабораторий, осуществляющих испытания вещества, материалов и объектов окружающей среды (по составу и физико-химическим свойствам) посредством межлабораторных испытаний»;

4. ГОСТ Р 50779.60-2017 (ИСО 13528:2015) «Статистические методы. Применение при проверке квалификации посредством межлабораторных испытаний».

Порядок проведения МСИ состоит из несколько этапов. Первым этапом является формирование провайдером списка участников испытаний и контролируемых объектов, а затем заключение договора с референтными лабораториями для их участия. Только после этого начинается разработка программы МСИ. Присваиваются кодовые номера участвующим лабораториям и готовятся образцы для испытаний, которые будут отправлены им. Рассылка образцов осуществляется в зашифрованном виде, сопровождаемая письмом и инструкцией по проведению МСИ. Испытания проводятся согласно нормативным документам на методы испытаний. Протоколы испытаний отправляются уполномоченной организации по окончании испытания. Впоследствии организация, проводящая МСИ, обрабатывает полученные данные в соответствии с заранее утвержденной программой. Затем для каждой участвующей лаборатории подготавливается заключение, содержащее информацию о результатах участия и, при необходимости, рекомендации по улучшению работы.

В рамках данной работы рассматривается межлабораторные сравнительные испытания показателей качества электрической энергии с номинальным напряжением 0,38 кВ с помощью прибора Энерготестер ПКЭ-А, размещенный в единой точке электрической сети с средствами измерений участников.

Определяемые показатели и ожидаемые диапазоны представлены в таблице 1.

*Таблица 1*

Определяемые показатели и ожидаемые диапазоны

Определяемый показатель, ед. изм	Ожидаемый диапазон
Отклонение значения частоты напряжения электропитания от номинального значения, Гц	-0,4...0,4
Отрицательное и положительное отклонение напряжения электропитания от номинального, %	0...10%

Перед началом испытаний необходимо выполнить ряд подготовительных мероприятий. Во-первых, измерить температуру и влажность воздуха, атмосферное давление в пункте качества электроэнергии, а также напряжение и частоту питания. Эти параметры должны соответствовать руководству по эксплуатации (РЭ) применяемых СИ.

Во-вторых, необходимо правильно установить и заземлить СИ, выполнить прогрев, скорректировать время и дату, а также ввести необходимые установки для работы прибора. Для соединения СИ с сетью следует использовать соединительные кабели, входящие в комплект СИ.

В-третьих, необходимо принять меры по устранению влияния электромагнитных помех на измерения СИ. Наконец, важно определить,

соответствует ли маркировка фаз трехфазной сети правильному чередованию фаз. Для этого можно использовать фазоуказатель или применяемое СИ. Входные сигналы должны совпадать с маркировкой соответствующих каналов измерения напряжения прибора.

В МСИ приняли участие 4 лаборатории. При проверке квалификации участника использовалась параллельная программа, которая предполагает одновременное измерение всеми участниками характеристик одного и того же образца. Результаты участников представлены в сводных таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Результаты измерений показателей отклонения значения частоты напряжения электропитания от номинального значения

Шифр участника	$\Delta f_{(-)95\%}$	$\Delta f_{(+ )95\%}$	$\Delta f_{(-)100\%}$	$\Delta f_{(+ )100\%}$
1	-0,05	0,05	-0,07	0,05
2	-0,05	0,05	-0,08	0,04
3	-0,05	0,05	-0,07	0,04
4	-0,04	0,04	-0,08	0,04
Приписанные значения	-0,05	0,05	-0,08	0,05

Таблица 3

Результаты измерений показателей положительного и отрицательного отклонения напряжения

Шифр участника	Отклонения от напряжения					
	Наименьшее отклонение			Наибольшее отклонение		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	0,00	0,00	2,43	12,82	8,72	6,37
2	0,00	0,00	2,45	12,80	8,75	6,37
3	0,00	0,00	2,40	12,81	8,75	6,35
4	0,00	0,00	2,42	12,80	8,71	6,37
Приписанные значения	0,00	0,00	2,51	12,86	8,77	6,41

Приписанные значения параметров ОПК определялись провайдером согласно п. В.2.1 ГОСТ ISO/ИТС 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации». Определение приписанных значений ОПК осуществлялось согласно ГОСТ 30804.4-30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная».

Качество результатов измерений, полученных участниками, оценивалось с помощью  $E_n$ -индекса, который вычисляется по формуле:

$$E_n = \frac{x_i - x_{pt}}{\sqrt{U^2(x_i) + U^2(x_{pt})}}$$

где  $x_i$  – результат участника;

$x_{pt}$  – приписанное значение, определенное в эталонной лаборатории;

$U(x_i)$  – расширенная неопределенность результата участника  $x_i$ ;

$U(x_{pt})$  – расширенная неопределенность приписанного значения  $x_{pt}$ ;

$|E_n| \leq 1,0$  указывает на удовлетворительную характеристику функционирования;

$|E_n| > 1,0$  указывает на неудовлетворительную характеристику и требует выполнения действий.

Значения  $E_n$ -индекса, рассчитанные для участников МСИ, представлены в таблицах 4 и 5.

*Таблица 4*

Значения  $E_n$ -индекса для показателей отклонения значения частоты напряжения

Шифр участника	$E_n$ -индекс				Заключение о качестве результатов
	$\Delta f_{(-)95\%}$	$\Delta f_{(+)95\%}$	$\Delta f_{(-)100\%}$	$\Delta f_{(+)100\%}$	
1	0,00	0,00	0,64	0,00	удовл.
2	0,00	0,00	0,00	-0,64	удовл.
3	0,00	0,00	0,64	-0,64	удовл.
4	0,64	-0,64	0,00	-0,64	удовл.

*Таблица 5*

Значения  $E_n$ -индекса для показателей положительного и отрицательного отклонения напряжения

Шифр	Значения $E_n$ -индекса						Заключение о качестве результатов
	Наименьшее отклонение			Наибольшее отклонение			
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	
1	0,00	0,00	-0,47	-0,24	-0,29	-0,24	удовл.
2	0,00	0,00	-0,35	-0,35	-0,12	-0,24	удовл.
3	0,00	0,00	-0,65	-0,29	-0,12	-0,35	удовл.
4	0,00	0,00	-0,53	-0,35	-0,35	-0,24	удовл.

Таким образом, данные, представленные участниками, сравнивают с значением  $E_n$ -индекса, вычисленным провайдером. По этим результатам выдается свидетельство об участии лаборатории в межлабораторных сравнительных испытаниях. В нашем случае, все 4 лаборатории-участницы прошли межлабораторные сравнительные испытания и подтвердили свою квалификацию.

### **Биографический список**

1. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

2. ГОСТ 33073-2017 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

3. ГОСТ 30804.4.30 (IEC 61000-4-30:2008) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии».

4. ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации».

5. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

© Абдурасулова Г.А., 2023

УДК 336

К.В. ГАБДРАХМАНОВА

*Karina-00-02@mail.ru*

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

*Уфимский университет науки и технологий*

## **СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ГОСТ Р ИСО 9001-2015**

*Аннотация:* представлен материал, раскрывающий опыт сертификации производства. Описан процесс подготовки и сертификации производства.

*Ключевые слова:* сертификация; система менеджмента качества производства.

Сертификация производства: Процедура подтверждения соответствия, посредством которой независимая от изготовителя (продавца, исполнителя) и потребителя (покупателя) организация удостоверяет в письменной форме, что на данный момент, обстоятельства производственного процесса достигают консистентности в производстве продукции и удовлетворяет требованиям соответствующим разделов 7.1.3-7.1.5, 8.4-9.2, 10 ГОСТ Р ИСО 9001-2015.

Целью сертификации производства является:

- повышение технологического порядка;
- укрепление отношений с покупателями;
- качественные и количественные условия устойчивости производства;
- конкретно определить те части технологического процесса, которые напрямую воздействуют на характеристики продукции, подлежащие обязательной сертификации.

Сертификация организации производства состоит из последующих этапов:

а) организация работ

В нее входят подготовка набора необходимых документов заказчиком и создание сертификационной комиссии. Члены комиссии должны являться незаинтересованными лицами в результатах сертификации, а также обладать глубокими экспертными знаниями критериев, процедур, методов аудита и специфики производственных процессов.

б) заочная оценка

Выполнять заочную оценку до выезда в организацию возложено на специально сформированную комиссию, которая занимается сертификацией. Оценка проводится непосредственно не в сертифицируемой организации, а дистанционно на основе полученного комплекта документов. В рамках своей работы комиссия собирает и анализирует дополнительную информацию о качестве продукции, выпускаемой производителями, подлежащими сертификации. Для получения такой информации комиссия может опираться на различные источники включая потребителей, национальные органы надзора и управления, ассоциации потребителей, гарантийные ассоциации и торговые объединения.

в) подготовка к аудиту "на месте"

Во время этого этапа комиссия должна разработать план аудита, который имеет следующие составные части:

- цели и параметры аудита;
- сроки и график проведения аудита, включая встречи с руководством проверяемой организации до и после проведения аудита, а также анализ деятельности проверяемой организации, проводимый комитетом;
- область аудита, включая распознавание структурных подразделений аудируемой организации;
- дата посещения проверяемого подразделения;
- анализируемые подразделения и этапы СМКП;
- определение сотрудника, ответственного за выполнение плана аудита;
- идентификация представителя аудируемой организации (в сопровождении эксперта);
- обязанность соблюдать конфиденциальность.

Руководство органа по сертификации утверждает план аудита и распределяет обязанности между членами комиссии, в это же время проходит подготовка рабочих документов документы, включающие в себя: контрольные перечни вопросов, бланки для регистрации свидетельств аудита и протоколов совещаний.

г) проведение аудита "на месте" и подготовка акта по результатам аудита

Во время этой стадии сертификации комиссия собирает информацию, относящийся к области аудита и на основании этого проводят проверку. Всю полученную информацию доводят до руководителя организации, с целью проведения корректирующих мероприятий. Выявленные несоответствия во



время аудита заносят в акт и принимают решение о выдаче (не выдаче) сертификата соответствия производства

д) окончание сертификации, выдача и регистрация сертификата

Отсутствие информации о несоответствиях в результате проведенного аудита и принятие соответствующих корректирующих мероприятий, выполненных проверяемой организацией в согласованные сроки, являются основными критериями для принятия решения об удовлетворении Системы менеджмента качества продукции (СМКП) установленным требованиям. В случае успешной реализации таких корректирующих мероприятий, организация, проводящая сертификацию должна заявить их эффективностью. В иных ситуациях СМКП считается не соответствующей установленным требованиям.

е) инспекционный контроль сертифицированного производства

Плановый инспекционный контроль систематически проводят через полгода после получения сертификата. В то же время, последующие инспекционные проверки проводятся не позднее, чем раз в год со дня предыдущего контроля.

### **Библиографический список**

1. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 58490-2019 "Системы менеджмента качества. Порядок сертификации производств с учетом требований ГОСТ Р ИСО 9001-2015".

2. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Требования.

© Габдрахманова К.В., 2023

УДК 006.91

Э.И. ГАЙФУЛЛИНА

*eleonora.dvv@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Э.В.

САФИН

*Уфимский университет науки и технологий*

### **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОФОРМЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРКИ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗАЦИИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

*Аннотация:* В статье рассматривается автоматизация процесса оформления результатов поверки с целью повышения эффективности работы организаций за счет снижения влияния человеческого фактора при создании и заполнении

документации. Для этого задействуется прикладное программное обеспечение, интегрированное с Microsoft Office Excel и Microsoft Office Access.

*Ключевые слова:* оптимизация; автоматизация; оформление документации; поверка; программные средства; база данных

Оптимизация процесса оформления документации – важный шаг для повышения эффективности работы организации. Автоматизация процесса оформления результатов поверки позволяет снизить риск возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором. Также автоматизация процесса оформления документации и использование электронных форм документов сокращают время и затраты, связанные с оформлением результатов поверки.

Одним из возможных вариантов автоматизации является использование программного обеспечения (ПО) для обработки и анализа данных, полученных в ходе поверки.

В ПО входит база данных (БД), которая содержит в себе следующую информацию:

1. Наименования и типы средств измерений (СИ), их модификации;
2. Регистрационные номера в реестре Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (рег. №) присвоенные при утверждении типа;
3. Межповерочные интервалы для каждого отдельного типа СИ;
4. Методики поверки (МП) для каждого отдельного типа СИ;
5. Эталоны и СИ, используемые при поверке для каждого отдельного типа СИ;
6. Поверители для каждого отдельного типа СИ;
7. Формы протоколов для каждого отдельного типа СИ в соответствии с пунктами поверки МП;
8. Формы свидетельств (извещений) для каждого отдельного типа СИ в соответствии с требованиями Приказа Минпромторга России от 31.07.2020 № 2510 «Об утверждении порядка проведения поверки средств измерений, требований к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке».

Перечисленная выше информация вносится в БД самостоятельно сотрудниками организации с возможностью дальнейшего редактирования и дополнения, что позволяет использовать данное ПО без привязки к конкретной отрасли. Работа с БД осуществляется в Microsoft Office Access.

На рис. 1 представлен возможный интерфейс ПО для автоматизации процесса оформления результатов поверки:

The image shows a software window titled "Поверка" (Calibration). It contains several input fields and buttons. The fields are: "Тип СИ" (Type of SI) - dropdown; "Модификация СИ" (Modification of SI) - dropdown; "Исполнение" (Execution) - checked checkbox; "Год выпуска" (Year of issue) - text box; "Заводской номер" (Factory number) - text box. A section titled "Условия поверки" (Calibration conditions) contains: "Температура окружающего воздуха" (Ambient air temperature) - text box with "°C" unit; "Относительная влажность воздуха" (Relative humidity of air) - text box with "%" unit; "Атмосферное давление" (Atmospheric pressure) - text box with "кПа" unit. Below this are: "Поверитель" (Calibrator) - dropdown; "Дата поверки" (Calibration date) - text box. At the bottom are three buttons: "Создать протокол" (Create protocol), "Создать свидетельство" (Create certificate), and "Создать извещение" (Create notification).

*Рис. 1.* Интерфейс ПО для автоматизации процесса оформления результатов поверки

На рис. 2 представлен алгоритм ПО для автоматизации процесса оформления результатов поверки:

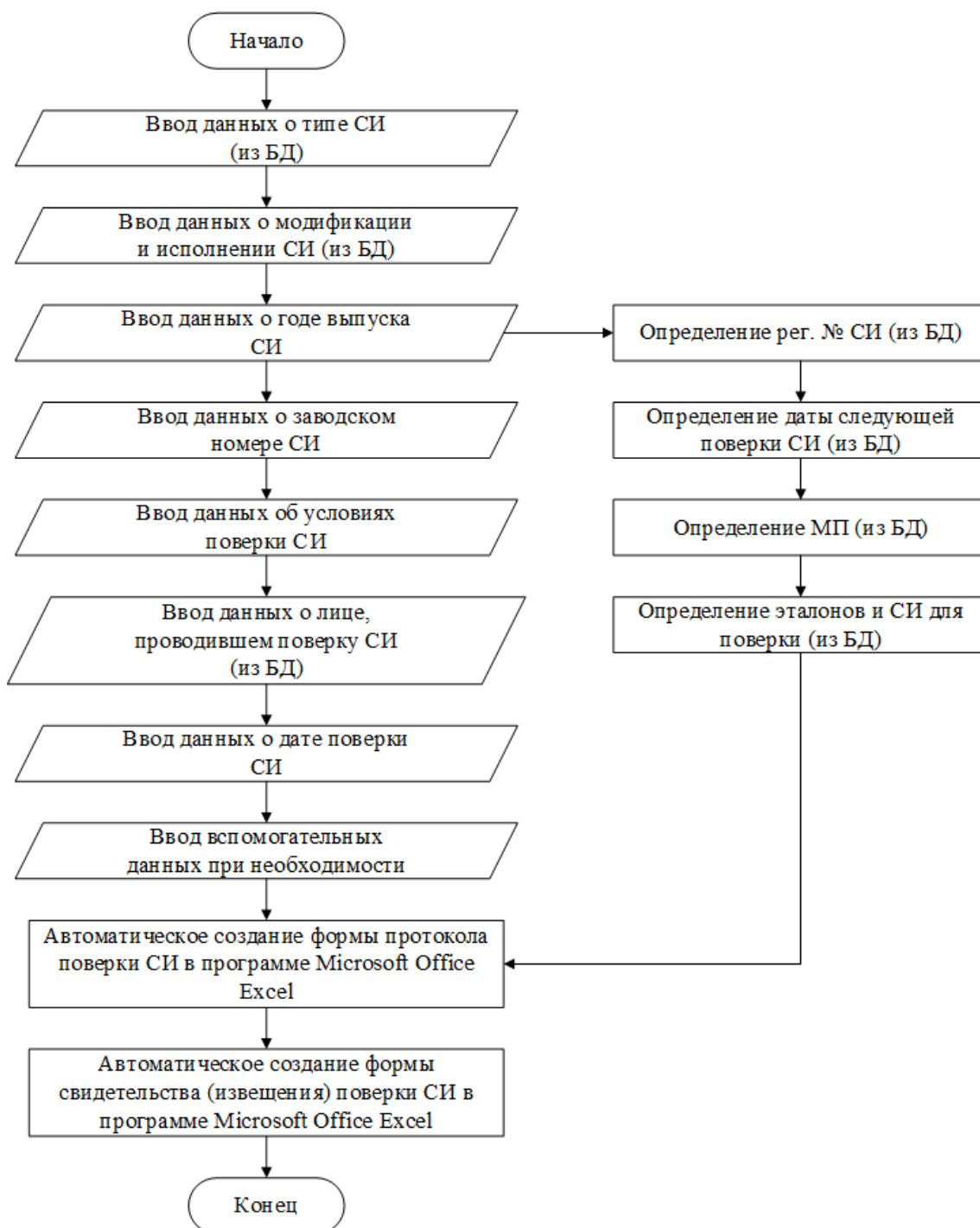


Рис. 2. Алгоритм ПО для автоматизации процесса оформления результатов поверки

Создание форм протоколов и свидетельств (извещений) осуществляется в Microsoft Office Excel, куда поверитель вносит данные, полученные в ходе поверки. На основе этой информации форма автоматически рассчитывает погрешности измерений и вариации, после чего определяет соответствие требованиям МП и выделяет поля, в которых выявлены несоответствия. Это позволяет избежать ошибок, связанных с неправильной интерпретацией результатов поверки.

Использование ПО для оформления результатов поверки также позволяет исключить ошибки, связанные с неправильным вводом данных (например,

неверный выбор рег. №) и потерей информации (например, указаны не все эталоны, которые были задействованы для поверки). Кроме того, автоматизированные системы могут обрабатывать большие объемы данных быстрее и эффективнее, чем человек.

Еще одним преимуществом автоматизации является ее гибкость. Системы могут быть настроены для работы с различными типами СИ для любых отраслей и могут быть адаптированы к изменяющимся требованиям – например, если поверка проводится с ограничениями. Это позволит организациям быстро реагировать на изменения в законодательстве и требованиях к отчетности.

Автоматизация может помочь снизить затраты на процесс оформления результатов поверки. Она может сократить количество сотрудников, необходимых для выполнения этой работы, и уменьшить время, необходимое для обработки данных. В результате организации могут сэкономить на затратах на персонал и на оборудование. Помимо этого, сокращаются затраты на печать и хранение бумажных документов. Вместо того, чтобы расходовать средства на печать и поддержание большого количества бумажных документов, можно использовать электронные формы, которые можно легко распечатать при необходимости.

Кроме того, вся необходимая документация хранится в электронном виде на сервере или в облачном хранилище, что делает ее легко доступной для всех заинтересованных сторон. Это также упрощает поиск и анализ информации, что может быть полезно при аудитах или проверках со стороны регулирующих органов.

Таким образом, автоматизация процесса оформления документации и использование электронных форм документов позволяют значительно сократить время и затраты на оформление результатов поверки. Это упрощает работу организации, повышает ее эффективность и позволяет сосредоточиться на более важных задачах.

### **Библиографический список**

1. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

2. Приказ Минпромторга России от 31.07.2020 № 2510 «Об утверждении порядка проведения поверки средств измерений, требований к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке».

3. Приказ Минпромторга РФ от 02.07.2015 № 1815 «Об утверждении Порядка проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке».

4. ГОСТ 8.513-84 «Государственная система обеспечения единства измерений. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения».

5. ГОСТ Р 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения».

© Гайфуллина Э.И., 2023

УДК 006.91

З.Р. ЗАЙДУЛЛИНА

*Zzr7778@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Э.Р.

ГАБДУЛЛИНА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОЛОГИИ ТЕСТИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ВУЗОВ**

*Аннотация:* В статье рассматриваются проблемы системы высшего образования в России и система менеджмента качества в ВУЗах как инструмент повышения качества образовательной деятельности.

*Ключевые слова:* система высшего образования, проблемы высшего образования, система менеджмента качества, тестирование

В настоящее время, в условиях глобализации и ускоренного развития технологий, образование, в том числе высшее, является основой развития общества, так как оно направлено на развитие интеллектуального ресурса человека, без которого невозможно социальное и экономическое процветание любого государства.

Система высшего образования – это двигатель интеллектуального развития, от уровня подготовки специалистов зависит благосостояние общества и стабильность экономики государства. Таким образом, высшее образование – это одна из ключевых сфер развития общества, которая определяет будущее страны [2].

Уровень подготовки специалистов зависит непосредственно от качества получаемого высшего образования. Развитие технологий и большой объем быстро меняющейся информации заставляет пересматривать существующие подходы к образованию. Рынок труда с учетом стремительно меняющейся действительности постоянно требует новых навыков и умений, так как появляются новые специальности и профессии, а некоторые ныне востребованные профессии в ближайшее время исчезнут.

Система высшего образования в нашей стране имеет ряд проблем, которые влияют как раз на качество образования, из-за чего уровень специалистов, выходящих из стен отечественных ВУЗов, не отвечает запросам рынка труда.

Некоторые из проблем, существующие на данный момент в высшем образовании:

– недостаточное финансирование ВУЗов, что влечет за собой ряд других проблем образования;

– устаревание программ обучения, их недостаточная актуализация или обновление, в связи с чем они не соответствуют потребностям рынка труда;

- недостаточное качество преподавания. Некоторые преподаватели не заинтересованы в своей работе, не отслеживают появление инноваций, современных методик, не хотят развиваться профессионально, не обладают достаточным количеством знаний для того, чтобы подготовить специалистов высокого уровня;
- недостаток практической подготовки студентов;
- отсутствие современных технологий в образовательном процессе. Как уже было показано выше, в век активного развития науки и технологий, студентам жизненно важно иметь навыки работы с последними достижениями в изучаемой области. Без доступа к новейшим технологиям студенты не могут достичь должного уровня в выбранной профессии и приспособиться к быстро меняющимся требованиям рынка труда;
- оторванность высшего образования от рынка труда, что приводит к подготовке ВУЗами специалистов, которые в данное время могут быть не востребованы на рынке труда;
- отсутствие эффективной системы оценки результатов образовательной деятельности;
- недостаток материально-технического обеспечения и др. (рис. 1) [5].



Рис. 1. Дерево проблем системы образования

Разработка системы оценки качества образования могла бы стать ответом на существующие проблемы. Для этого необходимы объективные и надежные механизмы: аккредитация образовательных учреждений, проведение регулярных аудитов и независимых оценок качества образования.

В целом, разработка и внедрение системы оценки качества образования является необходимостью, без которой повысить эффективность системы высшего образования в нашей стране не получится.

Есть ВУЗы, которые самостоятельно разрабатывают и внедряют систему менеджмента качества.

Например, в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете (далее – СПбГМТУ) в рамках СМК утверждены:

- Политика в области качества науки и образования на 2023-2026 годы;
- Порядок разработки стандартов организации. Управление документированной информацией СМК;
- Внутренние аудиты;
- Управление рисками и возможностями. Предупреждающие действия.

Также СПбГМТУ в рамках внутренней системы оценки качества образования разработаны стандарты «Положение о внутренней системе оценки качества образования» и «Положение о порядке проведения анкетирования в рамках внутренней системы оценки качества образования СПбГМТУ» [3].

Разработка СПбГМТУ системы менеджмента качества говорит о том, что данная система влияет на повышение качества образования, так как наличие такой системы в вузе позволяет осуществить планирование, контроль, применение инструментов измерения качества образовательной деятельности.

Одним из инструментов контроля качества образования в рамках СМК может быть тестирование, как оценка результата образовательной деятельности. В Уфимском университете науки и технологий, например, проводится входное тестирование первокурсников, а также некоторые преподаватели проводят тестирование своих студентов в системе Moodle.

Одной из современных тенденций подготовки специалистов является единая система проверки знаний обучающихся. Поэтому, второй год подряд в вузах осуществляется тестирование обучающихся по программам бакалавриата для апробации метода внешнего контроля знаний в рамках проекта «Совершенствование и реализация модели независимой оценки качества подготовки обучающихся в образовательных организациях высшего образования», проводимого по договору возмездного оказания услуг ФГБУ «Росаккредагентство». Проверяется качество подготовки обучающихся, диагностируется уровень сформированности компетенций обучающихся по направлениям подготовки (не более чем по двум компетенциям по каждому направлению подготовки и (или) специальности высшего образования).

Надо отметить, что сейчас понятие компетентности включает в себя не только знания, умения и навыки [4]. Но основной проблемой остается то, что современный компетентностный подход лишь называет основные требования к выпускнику вуза, но не дает методы и критерии оценки полученных компетенций. Это приводит к тому, что вчерашнему студенту при поступлении на работу при наличии отличных оценок в дипломе зачастую не хватает практических навыков и работодателю приходится его дополнительно обучать. Таким образом, работодатель получает не готового специалиста, а некий «полуфабрикат».



Исходя из изложенного, необходим инструмент, позволяющий оценить обучающегося на этапе обучения именно с точки зрения его готовности приступить к работе на практике.

Таким инструментом могло бы стать тестирование.

В связи с этим, важнейшей задачей становится разработка методологии тестирования, позволяющего оценить компетенции обучающегося не только с точки зрения требований образовательных и профессиональных стандартов, но и с учетом требований работодателей, выявить недостатки в образовательном процессе. В дальнейшем выявленные недостатки позволят скорректировать образовательный процесс для повышения качества подготовки специалистов.

Для успешного внедрения тестирования необходима разработка соответствующих процессов подготовки и проведения тестирования, средств измерений результатов, утверждение нормативных документов. Тестирование должно проводиться в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами, профессиональными стандартами и федеральными законами.

### **Библиографический список**

1. Федеральный закон от 29 декабря 2012 года № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации».
2. Боброва, Т.А. Современная система высшего образования Российской Федерации: основные проблемы и пути их решения // Молодой ученый. – 2018. – № 45 (231). – С. 127-130.
3. Материалы сайта Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.smtu.ru/ru/page/84/>.
4. Назина, Л.И., Никульчева, О.С. Некоторые аспекты внедрения СМК в вузе // Актуальная биотехнология. – 2013. – № 2 (5). – С. 61-63.
5. Проблемы и решения: улучшение качества высшего образования в 2023 году. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.burn-soft.ru/problemy-i-resheniya-uluchshenie-kachestva-vysshego-obrazovaniya-v-2023-godu/?ysclid=loebk903u868945756>.

© Зайдуллина З.Р., 2023

УДК 621.762.822

А.Р. КАНЗАФАРОВА

*kanzafarova\_15@mail.ru*

Науч. руковод. – старший преподаватель А.Ф. САФИНА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **МЕЖЛАБОРАТОРНЫЕ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПО КАЛИБРОВКЕ ЦИФРОВОГО МАНОМЕТРА ДМ5002М**

*Аннотация:* В статье рассмотрены вопросы, касающиеся межлабораторных сравнительных испытаний по калибровке цифрового манометра ДМ5002М. Представлены основные нормативные документы, устанавливающие требования к межлабораторным сравнительным испытаниям по калибровке цифрового манометра ДМ5002М, порядок проведения МСИ, описание средства измерения, а также результаты измерений, полученные участниками МСИ.

*Ключевые слова:* межлабораторные сравнительные испытания, калибровка цифрового манометра, анализ результатов испытаний

Участие лабораторий в программах проверках квалификации посредством межлабораторных сравнительных (сличительных) испытаний является одним из критериев подтверждения компетентности и повышения качества лабораторий, а также достоверности результатов испытаний.

**Межлабораторными сравнительными испытаниями (МСИ)** называют организацию, проведение и оценку испытаний одних и тех же или аналогичных образцов в двух или более лабораториях в соответствии с заранее установленными условиями.

Целью проведения МСИ является оценка качества проводимых измерений в лабораториях и проведение корректирующих действий для обеспечения единства измерений, улучшение и подтверждение технической компетентности организации, оценка работы сотрудников лаборатории и способы усовершенствования их квалификации, повышение доверия клиентов в оказываемых услугах, выполнение обязательных нормативных требований, сравнение методов и процедур проведения испытаний, выявление и устранение недостатков в методиках проведения испытаний.

Межлабораторные испытания проводятся в соответствии со следующими этапами:

1. Подача заявки потенциальным участником;
2. Рассмотрение заявки Провайдером МСИ и заключение договора на предоставление услуг;
3. Выполнение испытаний участником и обработка результатов измерений Провайдером;

Участнику высылается образец для проверки квалификации и инструкция, согласно требованиям которой участник раунда выполняет испытания. Далее участник направляет результаты своих измерений и ОПК Провайдеру. Провайдер МСИ проводит статистическую обработку результатов измерений и формирует отчет по результатам раунда;

#### 4. Подведение итогов проведения раунда.

По завершению раунда МСИ участник получает персональный отчет по результатам раунда и свидетельство об участии в МСИ.

В рамках данной работы были рассмотрены вопросы проведения межлабораторных сравнительных испытаний по калибровке цифрового манометра ДМ5002М.

Цифровой манометр ДМ5002М представляет собой электронный прибор, который предназначен для высокоточных измерений избыточного давления и (или) разряжения неагрессивных, некристаллизующихся жидкостей, газов и пара.

Данный прибор применяется в качестве рабочих эталонов для поверки и калибровки рабочих средств измерений.

Цифровой манометр имеет электрический унифицированный выходной сигнал, сигнализирующее устройство и стандартный цифровой интерфейс, позволяющий автоматизировать процесс обработки результатов измерения. С помощью тензорезистивного преобразователя происходит преобразование давления в электрический сигнал. Текущее значение давления отображается на цифровом индикаторе.

Основные метрологические характеристики манометра ДМ5002М представлены в таблице 1.

*Таблица 2*

Метрологические характеристики манометра ДМ5002М

Образец контроля	Цифровой манометр ДМ 5002М
Погрешность, %	±0,5
Диапазон измерений, МПа	от 0 до 1,6
Номер в ГРСИ РФ	68984-17
Определяемая характеристика	Действительное значение избыточного давления
Ожидаемые диапазоны значений, МПа	0,9900...1,0100

Основные технические характеристики представлены в таблице 2.

*Таблица 3*

Технические характеристики манометра ДМ5002М

Параметр (характеристика) манометра ДМ2002М	Значение параметра (характеристики)
Тип прибора	Манометр цифровой

Температура окружающей среды, °С	от 21 до 25
Относительная влажность, %	от 30 до 80
Атмосферное давление, кПа	от 84 до 106,7
Межповерочный интервал прибора (МПИ)	1 год — для погрешности не более $\pm 0,25\%$ ; 2 года — для погрешности $\pm 0,5\%$

Межлабораторные испытания по калибровке цифрового манометра ДМ5002М проводятся на основе следующих документов:

1. ГОСТ Р 8.690–2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Использование программ проверок квалификации посредством межлабораторных сравнительных испытаний при аккредитации испытательных лабораторий»;

2. ГОСТ ИСО/МЭК 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации»;

3. 5Ш0.283.342 МП «Манометр цифровой ДМ5002М, ДМ5002Вн. Методика поверки»;

4. Описание типа средств измерений. Манометры цифровые ДМ5002М, ДМ5002Вн.

В программе проверки квалификации приняли участие 4 лаборатории. Тип программы проверки квалификации — последовательный. Участникам был направлен образец проверки квалификации с детально документированной инструкцией по подготовке и применению образца, с указанием срока выполнения испытаний и формы представления результатов испытаний. Результаты измерений, полученные участниками МСИ указаны в таблице 3.

Таблица 4

Результаты измерений, полученные участниками МСИ

	$X_{pt} \pm U_{pt} = (0,99970 \pm 0,00072)$ МПа			
	Результат измерений $x_i$ , МПа	Расширенная неопределенность результата измерений $U_i$ , МПа	$E_n$ - индекс	Заключение
Участник 1	0,99870	$\pm 0,00087$	0,86	удовлетворительно
Участник 2	0,99900	$\pm 0,00089$	0,61	удовлетворительно
Участник 3	1,00082	$\pm 0,00082$	1,03	сигнал действия
Участник 4	0,99950	$\pm 0,00082$	0,18	удовлетворительно

В качестве статистического показателя был выбран  $E_n$  – индекс, который объясняется следующим образом:

$|E_n| \leq 1,0$  – означает, что при определении избыточного давления характеристика функционирования является удовлетворительной;

$|E_n| > 1,0$  – указывает на сигнал действия и означает, что характеристика функционирования не является удовлетворительной.

При определении избыточного давления характеристики функционирования заявленных участников признаются удовлетворительными для трех участников из четырех и не требуют выполнения корректирующих действий. Участнику, получивший неудовлетворительный результат, рекомендовано выяснить причины появления сигналов, осуществить корректирующие действия, выяснить и устранить причины неудовлетворительных результатов.

#### **Библиографический список**

1. ГОСТ Р 50779.60-2017 «Статистические методы. Применение при проверке квалификации посредством межлабораторных испытаний».
2. ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».
3. ГОСТ ИСО/МЭК 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации».
4. Р 50.4.006-2002 «Рекомендации по аккредитации. Межлабораторные сравнительные испытания при аккредитации и инспекционном контроле испытательных лабораторий. Методика и порядок проведения».

© Канзафарова А.Р., 2023

УДК 006.91

Г.Р. МУСИНА

*musinagu27@yandex.ru*

Науч. руковод. – ассистент П.В. НИКИТИН

*Уфимский университет науки и технологий*

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ДОКАЗАТЕЛЬСТВО МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ АНАЛИЗАТОРОВ КАЧЕСТВА МОЛОКА**

*Аннотация:* Интенсификация сельского хозяйства, повышение качества и конкурентоспособности продуктов животного происхождения предъявляет все более высокие требования к безопасности и качеству продукции. Для этого необходимо развитие и применение методов измерения, которые дают объективную информацию о качестве и безопасности молочного молока.

*Ключевые слова:* метрологическая прослеживаемость; ультразвуковой метод; анализатор; молоко; молочная продукция; качество

Обеспечение метрологической прослеживаемости важно для устойчивого развития экономики, а также для обеспечения потребителей точными и надежными продуктами и услугами.

В соответствии с РМГ 29-2013. ГСИ Метрология. Основные термины и определения п.9.2

Метрологическая прослеживаемость – свойство результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределенность измерений.

Обеспечение и доказательство метрологической прослеживаемости результатов поверки и калибровки являются критическими этапами в обеспечении точности измерений. Вот как это можно осуществить:

- Использование аккредитованных лабораторий;
- Поддержание записей;
- Сертификаты и свидетельства;
- Аудиты и проверки;
- Обучение персонала;
- Обновление и повторная калибровка.

В Республике Башкортостан, в 2022 году, объем выпуска сырого молока, произведенного хозяйствами всех категорий, составил 1586,1 тыс. т. Согласно отчету Росстата, Республика Башкортостан занимает третье место в Российской Федерации по этому показателю, уступая только Республике Татарстан (2033,5 тыс. т) и Краснодарскому краю (1631,3 тыс.т). Однако, несмотря на это, Республика Башкортостан является одним из ведущих регионов России в плане обеспеченности жителей молоком и молочными продуктами. При установленной медицинской норме потребления в 325 кг в год, в Башкортостане выпускается около 400 кг молока на каждого жителя ежегодно.

Анализаторы качества молока являются важными инструментами для определения параметров молочных продуктов, таких как жирность, белковость, лактоза и другие. Они применяются в лабораториях и производствах молочной промышленности для обеспечения качества и соответствия продукции требованиям стандартов.

Однако, для достоверности результатов анализов и признания их соответствующими требованиям стандартов, необходимо, чтобы анализаторы были поверены и калиброваны в соответствии с требованиями метрологической прослеживаемости. Метрологическая прослеживаемость связывает измерения, результаты которых получены с помощью анализаторов, с международными стандартами единиц измерения.

На базе ультразвуковых методов созданы отечественные лабораторные анализаторы, использующиеся в молочной отрасли – Клевер-2 и Лактан (рис.1). Эти устройства позволяют проводить комплексный анализ молока, включая определение жира, белка, лактозы, соматических клеток и многие другие параметры.

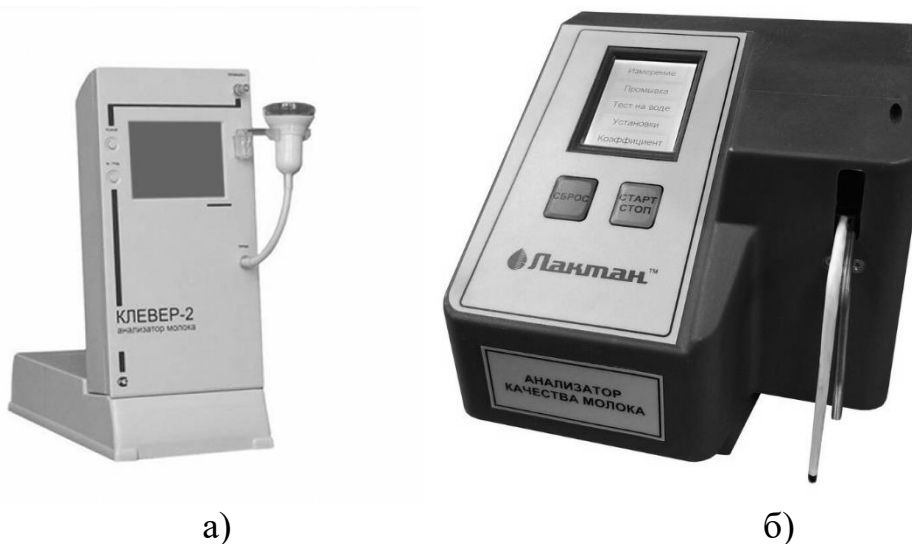


Рис. 1. Анализаторы молока Клевер-2 (а) и Лактан (б)

Ультразвуковой метод определения показателей качества молока позволяет получить результат анализа в течение 2 минут, уменьшить погрешность измерения, не требует химической обработки молока и предусматривает возможность последующего использования взятого на анализ образца. Поэтому ультразвуковые анализаторы активно используются в зарубежных странах при сравнительном анализе качества молока, произведенного в хозяйствах, при проведении исследований по сравнительному анализу точности измерения ультразвуковых и инфракрасных анализаторов (по коэффициенту корреляции) таких показателей качества молока, как жир, белок, лактоза.

Лаборатория может обеспечить прослеживаемость результатов измерений к Международной системе единиц посредством:

- калибровки, осуществляемой национальным метрологическим институтом;
- калибровки (поверки), осуществляемой калибровочной (поверочной) лабораторией, аккредитованной национальным органом по аккредитации;
- калибровки, осуществляемой международной калибровочной лабораторией;
- аттестованных значений стандартных образцов утвержденного типа;
- путем сличения, прямо или косвенно, с национальными или международными эталонами.

В случае с данными анализаторами качества, отсутствует обеспечение метрологической прослеживаемости через применяемые эталоны единицы величин средства измерений. На текущий момент прослеживаемость обеспечивается только через методики измерений. Стоит острый вопрос, связанный с производством стандартных образцов.

В методике поверки прописаны два варианта ее проведения. Согласно первого анализатор может быть поверен с использованием стандартных образцов (ГСО 10111-2012). Дополнительно используются и аттестованная смесь молока, и дистиллированная вода для контроля корректности показателей.

В соответствии со вторым способом используется методики измерений МВИ 2007.24.01/2. Поверка для второго способа осуществляется с использованием, аттестованных смесей, приготовленных согласно прилагаемой к анализатору инструкции.

Стандартные образцы проходят аттестацию для проверки и подтверждения их соответствия требованиям стандарта. Аттестация проводится для обеспечения точности и надежности результатов испытаний, используемых в различных сферах деятельности, таких как научные исследования, контроль качества продукции и метрологические работы.

В соответствии с Рекомендациями по метрологии и контролю качества "РМГ 52-2002. Аттестация стандартных образцов":

Методика аттестации должна представлять исчерпывающую информацию об измерительном эксперименте и его метрологическом уровне. Эти требования в равной мере относятся к методикам аттестации стандартных образцов (далее СО) всех категорий. Необходимо отметить, что в методиках аттестации СО следует предусматривать использование аттестованных в установленном порядке эталонов, либо поверенных средств измерений.

Как эталонные звенья такие СО не могут быть аттестованы независимо и в случае обнаружения неконтролируемых расхождений результатов потребуются дополнительные меры к выяснению причин и их устранению.

Общие рекомендации по содержанию и оформлению программ и методик аттестации СО рассматриваются в самостоятельном нормативном документе.

Для аттестации стандартных образцов применяются следующие подходы:

1. Метод сравнения с единичным стандартом: стандартный образец сравнивается с единичным стандартом, который не предполагает возможности распространения результатов аттестации на другие анализаторы или места проведения измерений.

2. Метод межлабораторной сравнительной аттестации: стандартные образцы аттестуются путем сравнения результатов их анализа в разных независимых лабораториях. Производится анализ погрешностей и оценка достоверности результатов.

3. Метод математической модели: данные по результатам измерений стандартных образцов используются для разработки математической модели измерительной системы. После этого стандартные образцы аттестуются с использованием этой математической модели.

4. Метод эталона: стандартный образец аттестуется путем сравнения с эталоном – наилучший достигнутый на определенном уровне развития измерительной системы стандарт.

Общим обоснованием метрологической прослеживаемости будет являться демонстрация соответствия анализатора качества молока признанным метрологическим требованиям и нормам, которые доказывают надежность и точность результатов измерений, полученных с помощью данного устройства.

Нужно отметить, что и поверочная схема играет важную роль в обеспечении точности и надежности результатов анализов молока. Она включает



в себя проведение регулярных проверок и калибровку анализаторов, а также сравнение результатов с эталонными значениями.

Наличие государственной поверочной схемы позволяет обеспечить единые стандарты и требования к анализаторам, а также гарантирует их соответствие международным и национальным нормативам.

Отсутствие государственной поверочной схемы для анализаторов качества молока является серьезной проблемой, которая может отрицательно сказываться на качестве продукции и безопасности потребления. Отсутствие такой схемы означает, что не существует надежного механизма контроля качества анализов молока. Это создает риск получения неточных результатов, которые могут привести к неправильным решениям в области производства и потребления молочных продуктов.

Поскольку молоко является одним из основных продуктов питания, его качество и безопасность являются важными аспектами для защиты здоровья потребителей. Государственная поверочная схема поможет обеспечить соответствие анализаторов качества молока высоким стандартам и минимизировать риски некачественной продукции.

Для устранения этой проблемы необходимо разработать и внедрить государственную поверочную схему для анализаторов качества молока. Это может включать создание специальной организации, ответственной за проверку и сертификацию анализаторов, а также разработку соответствующих стандартов и процедур поверки.

Введение государственной поверочной схемы позволит повысить доверие к результатам анализов молока, улучшить качество продукции и обеспечить безопасность потребления. Это будет полезно как для производителей, так и для потребителей и способствует развитию отрасли молочного производства.

Таким образом, обеспечение и доказательство метрологической прослеживаемости результатов поверки и калибровки анализаторов качества молока является важным этапом в обеспечении точности и надежности измерений. Это позволяет обеспечить сопоставимость результатов измерений, а также уверенность в достоверности и надежности данных, полученных с помощью анализаторов качества молока.

#### **Библиографический список**

1. МВИ 2007.24.01/2 «Методика выполнения измерений показателей качества молока и других молочных продуктов на ультразвуковых анализаторах молока «Клевер-2» и «Клевер-2М».
2. РМГ 52-2002. Аттестация стандартных образцов.
3. РМГ 29-2013. ГСИ Метрологи. Основные термины и определения.
4. Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С. Методы и инструменты контроля качества сельскохозяйственной продукции. – М., 2017. 292 с.
5. ИАС Р10:01/2013 «Политика ИАС по прослеживаемости результатов измерений».

© Мусина Г.Р., 2023

А.А. НЕСТЕРОВА  
*nstrv.aa@gmail.com*

Науч. руковод. – заведующий кафедрой, канд. техн. наук Э.В. САФИН

*Уфимский университет науки и технологий*

## **СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

*Аннотация:* В статье рассматривается последовательность этапов по обеспечению качества как характеристики необходимой точности результатов химического анализа, а также современные тенденции в решении проблем области аналитического процесса.

*Ключевые слова:* химический анализ, точность, качество, неопределенность

Аналитическая химия занимается установлением химического состава, которое следует выполнять с заданной точностью, являющейся результатом комплекса мер по обеспечению качества анализа. Поэтому чрезвычайно важно оценивать вклад неопределенности на каждом его этапе.

Показатель точности может быть оценен как экспериментально, так и по априорной информации о характеристиках погрешности, оказывающих существенное влияние на результат. Исследования проводятся с применением образцов веществ и материалов – объектов, необходимых для установления показателей качества методики анализа [1].

Методами количественного анализа называют химические, физические и физико-химические. К первым относят такие анализы, как гравиметрический, титриметрический и газовольметрический.

Первый из перечисленных методов базируется на принципах по определению непосредственно массы вещества. Очевидно, есть два способа: вещество методом отгонки переводится в газообразное состояние или же подвергается осаждению в растворе [2].

В качестве подготовительного этапа из вещества отбирают среднюю пробу по правилам, предусмотренным стандартами или ТУ. Принцип данной операции прост: средняя проба составляется из сравнительно большого числа порций из разных мест материала, что делает состав пробы максимально приближенным к среднему составу исследуемого материала. Для сокращения объемов пробы рекомендуют прибегать к квартованию: материал рассыпают в виде фигуры (квадрата или круга), делят на сектора, содержимое двух противоположных секторов соединяют вместе, а остальное отбрасывают.

Титриметрический (объемный) анализ – метод анализа простой и более быстрый, чем гравиметрический. Его принято осуществлять при точном

измерении объемов растворов-реагентов, т.е. концентрация задана максимально точно. В ходе реакции реактив подливают в раствор до полной реакции аналитического раствора. Зафиксированную временную точку называют точкой эквивалентности и находят при помощи индикаторов или инструментальными способами [3].

Газовольнометрический анализ строится на том, что объемно измеряются компоненты в газовой смеси, вступающие в реакции с уникальными реактивами в ходе прохождения через измерительную установку. Такой метод обрел применение в качестве контролирующего действия для технологических и управляющих процессов.

Так как отбор проб в большинстве случаев предваряет химический анализ, проведение оценки неопределенности пробоотбора становится первой задачей. Ее осуществляют косвенно – оценивая суммарную неопределенность, куда входят компоненты вклада аналитического контроля и непосредственно аналитической стадии  $S^2_{п.о.} = S^2_{\Sigma} - S^2_{ан}$ , где  $S^2_{п.о.}$  – неопределенность по стадии пробоотбора;  $S^2_{\Sigma}$  – суммарная неопределенность,  $S^2_{ан}$  – неопределенность по стадии анализа [4].

Данной проблеме уделяют внимание различные организации. К слову, в Руководстве «Вклад в неопределенность измерений стадии опробования: методы и подходы» [5] иллюстрировано с документально-доказательной базой, что на результат анализа оказывает влияние процесс пробоотбора (а стало быть, и на его неопределенность), поэтому его будет правильно изучать в концепции системного подхода как элемент процесса измерения.

Допустимый подход наблюдений и опытов имеет обоснование по повторному отбор проб и аналитическим процедурам в непостоянных условиях для оценки эффектов по их количеству, обусловленных неоднородностью анализа и вариациями при применении методик отбора проб. Наглядный и современный модельный подход идентифицирует составляющие неопределенности, оценивает вклад компонентов (затрагивая эффект суммирования) при формировании обобщенной оценки.

Закономерным последующим этапом закрепляют выбранный метод и/или методику. Приоритет в этом случае сохраняют именно те, что стандартизованы на одном из уровней (международном, региональном, национальном) [6].

Нередко лаборатории разрабатывают нестандартную методику (или, как частный случай, модифицируют стандартизованную). В свою очередь данная сфера имеет определенные тонкости в подходах к валидации [7] или аттестации методик и верификации. Заключаются они в планировании и реализации процедур (по валидации), в подготовке отчета (о верификации). Дополнили Руководство по валидации [8] такие документы, как «Планирование и подготовка отчета о валидационном исследовании» [9] и «Холостые пробы, используемые при валидации методов» [10].

Сложность проведения так называемого холостого опыта, ставшая толчком к написанию руководства [10], объясняется тем, что метрологические

характеристики в процессе валидации преимущественно подвергаются оценке с применением холостой пробы, выбор которой не всегда очевиден.

Таблица 1

Классификация холостых проб

Вид холостой пробы	Цель применения холостой пробы
Калибровочная	Нахождение рабочего измерительного диапазона
Процедурная	Глобальная оценка влияния процедуры измерений
Реагент	Оценка/коррекция влияния используемых реагентов
Растворитель	Наблюдение и фиксация эффекта памяти в приборе
Образцовая	Установление пределов обнаружения и определения; оценка показателей точности

Особый интерес представляет такой способ повышения точности, как симуляция холостой пробы. Сам по себе холостой опыт (иными словами называемый контрольным) является инструментом для нахождения поправки, которую исключают из измеренного при анализе значения, чтобы результат был верным. Его проводят в тех же условиях, что и основной опыт, однако без анализируемого вещества. Совместно с ним широко применяют градуировочные графики (в электрохимии).

Экспрессный метод анализа, получивший распространение в практике проведения анализов, – потенциометрия – будет рассмотрен подробно, как оптимальный, так как он обладает низким порогом обнаружения веществ, точностью, воспроизводимостью и селективностью. Он позволяет не только покомпонентно титровать смеси в пробе, но и автоматизировать данный процесс.

В начале участка титрования пользуются методом Грана в качестве метода обработки данных. Идея ученого основана на том, что при наличии примеси вступают в реакцию при избытке титранта. В конце титрования нет четких скачков графика, поэтому в функции Грана применяют результаты измерения не менее чем за половину промежутка до точки эквивалентности.

Некоторые модернизированные приборы имеют полезную функцию хранения в блоке памяти значения откликов от градуировочных растворов, и последующее соотнесение их со значениями для аналита с расчетом концентрации вещества по внесенному в программу алгоритму позволяет получить значение на дисплее. Подобные средства обладают способностями на ранних этапах выявлять и, более того, исключать грубые погрешности, вносить корректирующие коэффициенты в наклон градуировочной зависимости. Наиболее важно, что они также учитывают поправку холостого опыта. Для усложненных измерений (повышенной точности) используются электронно-вычислительные машины (компьютеры), которые осуществляют обработку данных. Чаще всего ее проводят вышеупомянутым методом Грана. На экране

будет изображена функция погрешностей, вид которой даст возможность рассуждать об отклонении функции Грана от прямой линейной зависимости и для анализа выберут участки, наиболее приближенные к линейности.

Основу валидации методик закладывает оценка неопределенности, формализованная в Руководстве по выражению неопределенности [11, 12], в нормативных источниках [13, 14] и статьях [15].

Еще одно уязвимое место, которое нельзя не упомянуть, представляет демонстрация прослеживаемости результатов анализа. К этой же части можно причислить процессы определения, создания и эксплуатации стандартных образцов. Обеспечить сопоставимость результатов измерений – последняя задача химического анализа, и делать это нужно на международном уровне, что обеспечивается Декларацией, выпущенной Международным бюро мер и весов BIPM, Международной организацией законодательной метрологии OIML, Международной организацией по аккредитации лабораторий ILAC и Международной организацией по стандартизации ISO [16].

Итак, хотя химические методы гарантируют достаточно высокую точность, удовлетворяющую для классических задач количественного анализа, их чувствительность ограничена и недостаточна для нахождения определенных примесей в очищенных материалах, а сама процедура весьма энергоемка и требует длительных временных затрат (применительно к гравиметрии). В силу этих особенностей на сегодняшний день чаще прибегают к разработке новых и улучшенных методов анализа. Тут зарекомендовали себя перспективные физико-химические и физические методы.

### **Библиографический список**

1. РМГ 61-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки.

2. Комова, В.И. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа. Количественный анализ: учебно-методическое пособие для высшего профессионального образования. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», 2014. – 78 с.

3. Ткаченко С.В., Соколова С.А. Аналитическая химия. Химические методы анализа: учебное пособие. – Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГАУ, 2015. – 188 с.

4. Карпов Ю.А., Савостин А.П. Методы пробоотбора и пробоподготовки. М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2018. 243 с.

5. Ramsey M.H., Ellison S.L.R., Roston P. Measurement uncertainty arising from sampling: a guide to methods and approaches. Second Edition, Eurachem. 2019. 120 p.

6. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – М., 2021. 32 с.

7. Барановская В.Б., Медведевских М.Ю. Валидация методик химического анализа: международные требования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84, № 12. С. 25-31.

8. Валидация аналитических методик: пер. с англ. яз. 2-го изд. под ред. Г.Р. Нежиховского. Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях: пер. с англ. яз. 3-го изд. под ред. Р.Л. Кадиса. Руководства для лабораторий. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2016. 312 с.

9. Barwick V. Planning and Reporting Method Validation Studies – Supplement to Eurachem Guide on the Fitness for Purpose of Analytical Methods. First Edition, Eurachem. 2019. 32 p.

10. Cantwell H. Blanks in Method Validation - Supplement to Eurachem Guide The Fitness for Purpose of Analytical Methods. First Edition, Eurachem. 2019. 15 p.

11. Валидация аналитических методик: пер. с англ. яз. 2-го изд. под ред. Г.Р. Нежиховского. Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях: пер. с англ. яз. 3-го изд. под ред. Р.Л. Кадиса. Руководства для лабораторий. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2016. 312 с.

12. Ellison S. L. R., Williams A. Eurachem/CITAC guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Third edition, Eurachem. 2012. 138 p.

13. ГОСТ Р 54500.3-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – М., 2012. 107 с.

14. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. М., 2006. 33 с.

15. Кадис Р.Л. Неопределенность измерений и химический анализ // Журнал аналитической химии. 2008. Т. 63, № 1. С. 104-110.

16. Совместная BIPM, OIML, ILAC и ISO декларация по метрологической прослеживаемости (13 ноября 2018 г.) // Перевод Ассоциации аналитических центров России. <https://aac-analitica.ru/dokumenty-ilac-i-aplac.htm>.

© Нестерова А.А., 2023

А.И. НИГМАТУЛЛИНА

*nigmatullina.ayguzel@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук Э.В. САФИН

*Уфимский университет науки и технологий*

## **АНАЛИЗ ОПЫТА МЕЖДУНАРОДНОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ В СФЕРЕ СТАНКОСТРОЕНИЯ**

*Аннотация:* В статье рассмотрены вопросы стандартизации в сфере станкостроения. Проведен анализ деятельности технического комитета ИСО/ТС 39 «Станки» международной организации по стандартизации ИСО и его подкомитетов за весь период функционирования.

*Ключевые слова:* стандартизация, станкостроение, ИСО, технический комитет

Усовершенствование технологий и проникновение инноваций во все сферы экономики требуют модернизации системы стандартизации.

Международная организация по стандартизации ИСО является независимой неправительственной международной организацией, которая занимается выпуском стандартов. Членами ИСО являются национальные органы по стандартизации, которые представляют интересы своей страны в ИСО. На данный момент в работе в ИСО участвуют 169 стран. Разработка стандартов ИСО осуществляется техническими комитетами. В настоящее время в составе ИСО более 250 технических комитетов.

В 1947 году был сформирован технический комитет по стандартизации ИСО/ТС 39 «Станки», отвечающий за разработку и утверждение стандартов в сфере станкостроения.

Область деятельности данного комитета является стандартизация всех станков для обработки металла, дерева и пластмасс, работающих путем удаления материала или под давлением.

ISO/TC 39 обеспечивает станкостроительную промышленность, как производителей, так и пользователей, современными стандартами: для тестирования станков; для определения размеров компонентов; для обеспечения безопасности станков и так далее.

В структуру технического комитета ИСО/ТС 39 входят 5 подкомитетов:

1. ISO/TC 39/SC 2 Test conditions for metal cutting machine tools («Условия испытаний металлорежущих станков»);
2. ISO/TC 39/SC 4 Woodworking machines («Деревообрабатывающие станки»);
3. ISO/TC 39/SC 6 Noise of machine tools («Шумы от станков»);

4. ISO/TC 39/SC 8 Work holding spindles and chucks («Шпиндели и зажимы устройства»);

5. ISO/TC 39/SC 10 Safety («Безопасность»).

Согласно информационному сайту iso.org всего техническим комитетом ИСО/ТС 39 опубликован 161 стандарт (из них 45 стандартов находятся в прямой ответственности ИСО/ТС 39) и 24 проектов стандартов на данный момент находятся в разработке. Количество опубликованных стандартов и проектов стандартов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Количество опубликованных стандартов и проектов стандартов

Подкомитеты ИСО/ТС 39	Опубликованные стандарты ИСО	Проект стандартов ИСО
ISO/TC 39/SC 2	72	7
ISO/TC 39/SC 4	19	13
ISO/TC 39/SC 6	3	-
ISO/TC 39/SC 8	11	-
ISO/TC 39/SC 10	11	4
<b>Итого:</b>	<b>116</b>	<b>24</b>

**Краткий анализ деятельности подкомитетов ИСО/ТС 39 за весь период функционирования:**

ISO/TC 39/SC 2 «Условия испытаний металлорежущих станков» организован в 1985 году. За последние 10 лет работы подкомитет опубликовал 35 стандартов, что является хорошим результатом, так как до 2013 года, то есть за 27 лет, всего было опубликовано 37 стандартов.

ISO/TC 39/SC 4 «Деревообрабатывающие станки» сформирован в 1980 году и до 2013 года опубликовал только 2 стандарта, но за последние годы подкомитет смог опубликовать – 17.

ISO/TC 39/SC 6 «Шумы от станков» сформирован в 1980 году, за всё время своей деятельности разработал 3 стандарта, за последние 10 лет подкомитет не занимался разработкой новых стандартов.

ISO/TC 39/SC 8 «Шпиндели и зажимы устройства» сформирован в 1982 году. За последние 10 лет нет новых опубликованных стандартов, за всё время работы подкомитетом было разработано 11 стандартов.

ISO/TC 39/SC 10 «Безопасность» сформирован в 2003 году. До 2013 года подкомитетом был разработан один стандарт, а за последние 10 лет – 10 стандартов.

Количество опубликованных стандартов подкомитетами по годам приведены в таблице 2.



Количество опубликованных стандартов подкомитетами по годам

Подкомитеты ИСО/ТС 39	1980-е	1990-е	2000-е	2010-е	2020-е
ISO/TC 39/SC 2	3	5	13	14	35
ISO/TC 39/SC 4	-	2	-	-	17
ISO/TC 39/SC 6	-	-	2	1	-
ISO/TC 39/SC 8	-	-	-	11	-
ISO/TC 39/SC 10			-	1	10

Динамика разработки стандартов подкомитетами ИСО/ТС 39 приведена на рисунке 1.

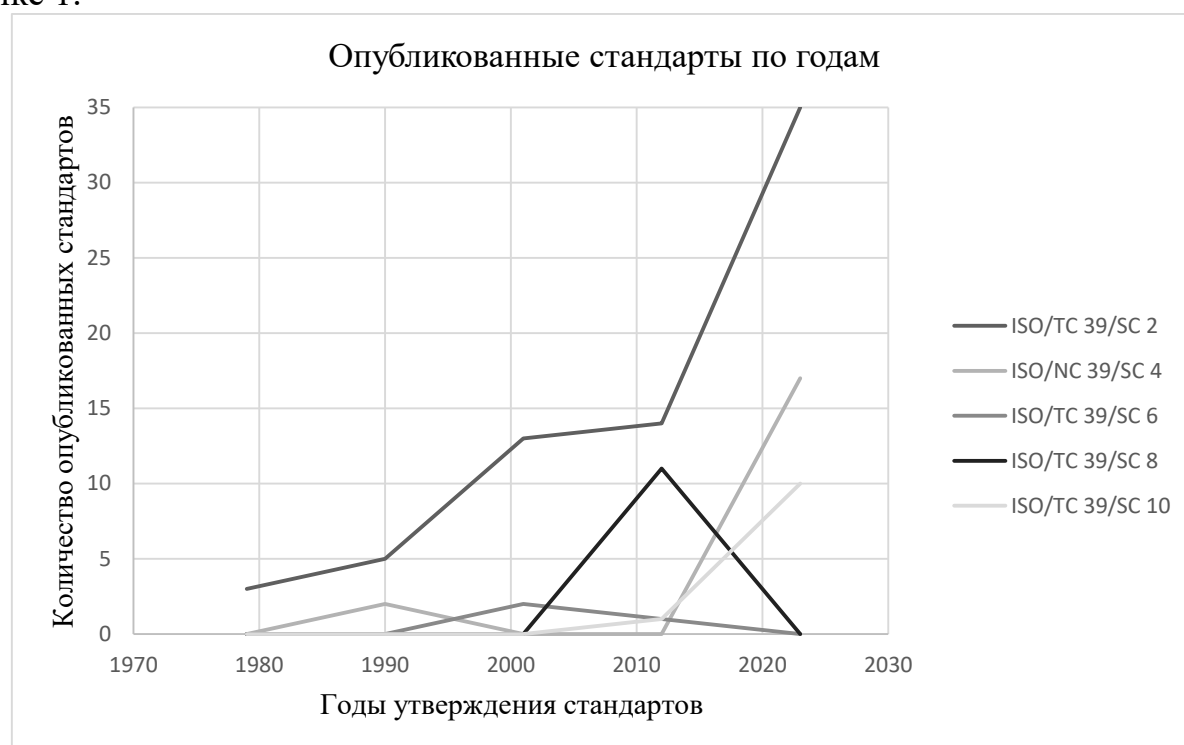


Рис. 1. Динамика разработки стандартов подкомитетами ИСО/ТС 39 по годам

Таким образом, результаты работы подкомитетов показывают, что на международном уровне сложилось понимание, что наиболее актуальными вопросами стандартизации в сфере станкостроения на сегодняшний день являются:

- условия испытаний металлорежущих станков;
- деревообрабатывающие станки;
- безопасность.

В последние годы практически не издавались стандарты, разрабатываемые подкомитетами ISO/TC 39/SC 6 «Шумы от станков» и ISO/TC 39/SC 8

«Шпиндели и зажимы устройства», которые касаются вопросов технической совместимости и взаимозаменяемости.

В целом международные стандарты ИСО служат основой для разработки аналогичных межгосударственных (ГОСТ) и национальных стандартов Российской Федерации (ГОСТ Р) в сфере станкостроения.

### **Библиографический список**

1. Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ (ред. от 30.12.2020) «О стандартизации в Российской Федерации».
2. ГОСТ Р 1.1-2020 «Стандартизация в РФ. Технические комитеты по стандартизации и проектные технические комитеты по стандартизации. Правила создания и деятельности».
3. Международная организация по стандартизации : сайт. – Женева, Швейцария , 2023. – URL: <https://www.iso.org/> (дата обращения: 12.10.2023).

© Нигматуллина А.И., 2023

УДК 006.91

М.Д. НУРМУХАМИТОВ

*marsnyrn@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Э.В. САФИН

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ПОВЕРКА СЧЕТЧИКА ГАЗОВОГО ДИАФРАГМЕННОГО BG-G6T**

*Аннотация:* Нормативные документы, описание счетчика, описание поверки счетчика, результаты поверки.

*Ключевые слова:* поверка, диафрагменный бытовой счетчик, методика, описание, безопасность

На сегодняшний день в Российской Федерации, поверка газовых приборов на соответствие метрологическим требованиям является обязательной, которая установлена статьей 13 ФЗ № 102 от 26.06.2008 и предусмотренная Постановлением Правительства РФ № 354 от 06.05.2011, а также Постановлением Правительства РФ от 21.07.2008 №549.

Во время данной процедуры определяется, как точно счетчик измеряет объем потребляемого газа. Поверка газового счетчика позволяют потребителям оплачивать сумму, только за потребленный ими газ. Если поверка счетчиков не была произведена в установленные сроки, то в течение последующих трех

месяцев оплата будет рассчитываться по среднему расчётному показателю за последние полгода. Вышеуказанные процедуры исполняются на основании Правил предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов, утвержденный постановлением Правительства РФ от 06.05.2011 №354.

Мероприятие по поверке устройства имеют право проводить работники, которые прошли специальное обучение, направленное на разрешение эксплуатации поверочного счетчика, прошедшие аттестацию в установленном порядке, которые изучили инструкцию по эксплуатации устройств и эксплуатационную документацию используемых СИ.

Диафрагменный бытовой счетчик газа ВК-G6Tс механической температурной компенсации изобретен для того, чтобы измерить количество природного газа по ГОСТ 5542-87 и других неагрессивных газов, которые применяются в бытовых и производственных целях.

Счетчик имеет измерительный механизм с температурным компенсатором, корпус и отчетного устройства. Измерительное устройство в свою очередь состоит из двух камер со встроенными мембранами. Кривошипно-шатунный механизм изменяет поступательную динамику мембран во вращательное, которое через магнитную муфту передается отсчетному устройству. Прибор оснащен устройством, ограничивающее обратному ходу счетчика механизма.

Общий вид счетчика газового диафрагменного ВК-G6T представлен на рис. 1.



*Рис. 1. Диафрагменный бытовой счетчик газа ВК-G6T*

Процедура поверки вышеуказанного счетчика осуществляется по документу МП 208-017-2016 «ГСИ. Счетчики газа диафрагменные ВК-G, ВК-GT. Методика поверки», утвержденному ФГУП «ВНИИМС» 15.12.2016г.

Основные элементы осмотра проверяемого устройства:

– рабочий эталон объемного расхода газа 1-го разряда по ГОСТ Р 8.618-2014 в диапазоне значений от 0,016 до 40 м<sup>3</sup>/ч с погрешностью не более ±0,5% (регистрационный номер в Федеральном информационном фонде 56748-14).

Возможно использование схожих средств поверки, обеспечивающих определение метрологических характеристик, проверяемых СИ с требуемой точностью.

Знак пройденной поверки покрывают на пломбу, которая, установлена на корпус отсчетного устройства.

Ниже перечислим нормативные и технические документы, которые устанавливают требования:

- ГОСТ Р 8618-2014 ГСИ Государственная поверочная схема для средств измерений объемного и массового расхода газа;

- ГОСТ Р 52931-2008 Приборы контроля и регулирования технологических процессов, Общие технические условия;

- Техническая документация фирмы «ElsterGmbH», Германия.

Во время процедуры поверки счетчика газового диафрагменного ВГ-Г6Т необходимо соблюдать требования безопасности, которые перечислены ниже:

- правилами безопасности труда, работающими на установке для поверки счетчиков газа;

- правилами безопасности при эксплуатации используемых средств поверки, приведенные в их эксплуатационных актах;

- правилами пожарной безопасности, действующими на предприятии.

Во время проведения внешнего осмотра устройства обращают внимания на такие элементы, как отсутствие ярких и заметных механических повреждений и дефектов, включая покрытия, ухудшающего внешний вид счетчика, и мешающий его применению; наличие на счетчике четких и хорошо читаемых надписей и обозначений.

Окончанием процедуры внешнего осмотра считают положительно пройденным, если отсутствуют видимые механические повреждения и дефекты, надписи отчетливо видны и читаемы. В конце процедуры поверки оформляют документ в виде протокола.

Определение метрологических характеристик проводят при использовании электромагнитного устройства съема сигнала или при использовании индукционного, оптического или емкостного устройства съема сигнала

Относительную погрешность счетчика определяют при следующих значениях объёмного расхода:  $Q_{\text{мин.}} + 5\%$ ;  $0,2Q_{\text{макс.}} \pm 5\%$ ;  $Q_{\text{макс.}} - 5\%$ , где  $Q_{\text{мин.}}$ ;  $Q_{\text{макс.}}$  это минимальный и максимальный измеряемый объёмный расход счётчика соответственно.

Объем воздуха при рабочих условиях (условиях поверки), проходящий через проверяемый счетчик ( $V_{\text{сч}}$ , м<sup>3</sup>), определяет по формуле

$$V_{\text{сч}} = \frac{N_{\text{сч}}}{C_{\text{рсч}}},$$

где  $N_{\text{сч}}$  – количество импульсов поверяемого счетчика, соответствующее объему воздуха, прошедшего через счетчик, зафиксированное датчиком для съема импульсов;

$C_{p\text{сч}}$  – коэффициент преобразования поверяемого счетчика, определяемый по формуле (2),  $\text{имх/м}^3$ .

$$C_{p\text{сч}} = \frac{1}{T_p},$$

где  $T_p$  – цена оборота младшего ролика счетного механизма,  $\text{м}^3$ .

Значение объема воздуха, который прошел через ПУ, приводят к условиям поверки счётчика в соответствии с инструкцией по эксплуатации на ПУ.

Сравнительную погрешность поверяемого устройства при измерении объема воздуха определяется по формуле:

$$\delta = \frac{V_{\text{сч}} - V_{\text{эт}}}{V_{\text{эт}}} \times 100\%,$$

где  $V_{\text{сч}}$  – объем воздуха при рабочих условиях (условиях поверки), измеренный счетчиком,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{эт}}$  – объем воздуха, измеренный ПУ, приведённый к рабочим условиям счетчика (условиям поверки),  $\text{м}^3$ .

Эффективность поверки считают положительным, если пределы допускаемой относительной погрешности устройства при нормальной температуре измеряемого воздуха ( $20 \pm 5$ ) °С при первичной поверке не должны превышать:

$$\begin{aligned} Q_{\text{мин}} \leq Q < 0,1 Q_{\text{ном}} \pm 3\%, \\ 0,1 Q_{\text{ном}} \leq Q \leq Q_{\text{макс}} \pm 1,5\%. \end{aligned}$$

Счетчики, не удовлетворяющие требованиям, к эксплуатации не допускаются.

Таким образом, поверка счетчика газового диафрагменного ВГ-Г6Т, является обязательным. Данная процедура регулируется и контролируется на основании нормативно правовых актов различных уровней. Главной целью поверки газового устройства (счетчика) является, в удостоверении в его правильной работе. Исправное устройство фиксирует действительные данные, вследствие чего, обеспечивает правильную оплату и начисления потребляемого ресурса и экономию финансов граждан. В тот момент, когда устройство работает неверно или испорчено, собственнику помещения необходимо платить за коммунальные услуги по нормам, которые в свою очередь бывает гораздо выше реального потребления.

### Библиографический список

1. ФЗ «Об обеспечении единства измерений» № 102 от 26.06.2008.
2. Постановлением Правительства РФ «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов» № 354 от 06.05.2011.
3. Постановлением Правительства РФ «О порядке поставки газа для обеспечения коммунально-бытовых нужд граждан» от 21.07.2008 № 549.
4. Исаев, И.А. Исследование метрологических характеристик ультразвукового счетчика газа на эталонных расход измерительных установках /

И.А. Исаев, Д.Р. Хакимов, А.И. Горчев, Р.И. Ганиев // Вестник Казанского технологического университета. - 2016. - Т.15, № 18. – С. 239-244.

5. Лебедев, А.В. Метрологические аспекты производства поверочных установок типа УПГ [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <http://www.gaselectro.ru/stati/metrologicheskie-aspekty-proizvodstva-poverochnyh-ustanovok-tipa-upg.html>.

© Нурмухамитов М.Д., 2023

УДК 621.9.08

А.А. ОСИНСКАЯ

*sashaosinskaya@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. Э.В. САФИН

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ОЦЕНКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТОЧНОСТЬ СТАНКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

*Аннотация:* В статье рассматривается функциональная схема координатно-измерительной машины, ее основные элементы, правила испытаний и рекомендации по определению измерительных характеристик машин.

*Ключевые слова:* зондирование; координатно-измерительная машина; измерительные характеристики

Координатно-измерительная машина предназначена для измерения геометрических характеристик объекта. Главное преимущество КИМ – абсолютная автоматизация на этапах измерений и их обработки.

КИМ – станок с рабочим столом (для движения детали по двум осям), портом, прижимами (используются для закрепления детали на рабочем столе) и измерительным датчиком (для движения по одной оси).

Плата управления – это драйвер и два микроконтроллера. Шаговый двигатель нужен для точного перемещения детали, а шариково-винтовая передача для изменения вращательного движения в поступательное. На портале крепится измерительный датчик и совершает вертикальное движение. Датчик измерения – контактный триггерный датчик с оптической передачей сигналов в пределах 360 градусов, повторяемостью 1 микрон. Энкодер используется для считывания шагов двигателя, он помогает устранить пропущенные шаги (установлен на валу двигателя).

Управление КИМ осуществляется двумя режимами:

1. Ручным – персональным компьютером с помощью программного обеспечения LabVIEW. Датчик измерения подносится к измеряемой детали.

2. Автоматическим – выполняется выбранный алгоритм из библиотеки.

Для управления двигателями, по алгоритму через интерфейс USART передается код, плата считывает его и решает, какой двигатель должен двигаться, так же импульсы энкодеров, срабатывание датчиков, которым передаются данные на персональный компьютер для обработки и расчета, рисунок 1.

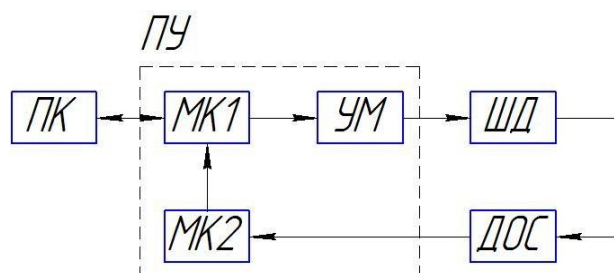


Рис. 1. Функциональная схема привода координатно-измерительной машины

Станок, оснащенный системой зондирования, как определено в ISO 230-10, технически можно рассматривать как КИМ, которая способна выполнять сложные и автоматизированные измерительные задачи. Мотивация выполнения измерительных задач на станках может быть разной. Это может зависеть от необходимости установки заготовки в производственном объеме (в этом случае можно рассматривать как часть процесса обработки) до проведения контроля размеров во время или в конце производства заготовок. Другой мотивацией может быть проведение быстрых проверок, чтобы определить, соответствуют ли изменения качества обработки техническим характеристикам.

Измерительные характеристики станка в качестве КИМ, определяются для заданного набора условий, которые расположены в пределах заданного диапазона.

Точность координатно-измерительных машин (КИМ) зависит от температурных условий окружающей среды, в которой работает машина. Колебания температуры, воздействуя на шкалы, элементы конструкции машины и измеряемые объекты, вызывают их расширение, сжатие и, в некоторых случаях, искажения нелинейного характера.

Испытание проводят путем сравнения указанных значений пяти различных испытательных длин относительно калиброванных значений используемых эталонов длины. Каждую калиброванную испытательную длину измеряют три раза в указанном порядке. Указанные значения рассчитываются путем измерения длины от точки к точке, спроецированной на направление выравнивания. Калиброванные испытательные длины измеряются как минимум в семи различных положениях измерительного объема. Процедура показана на рисунке 2.

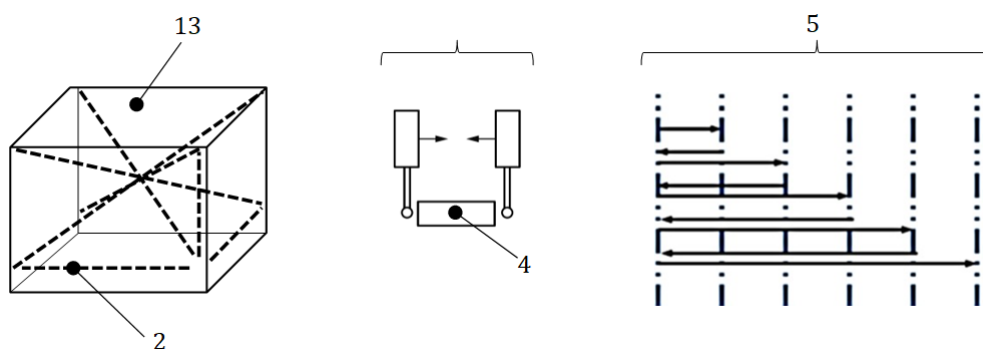


Рис. 2. Измерение калиброванных испытательных длин

1. измерение объема
2. один вариант из семи положений длины теста (с разным расположением и ориентацией)
3. двунаправленное измерение «точка-точка»
4. калиброванная испытательная длина, например, мерный блок
5. порядок измерения для пяти различных испытательных длин

Для выполнения двунаправленного измерения калиброванной испытательной длины возможно использование нескольких испытательных установок, которые показаны на рисунке 3.

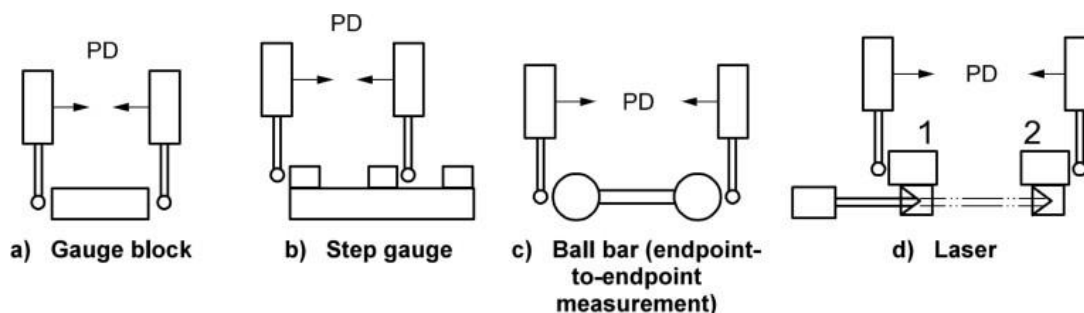


Рис. 3. Двунаправленные измерения калиброванной испытательной длины

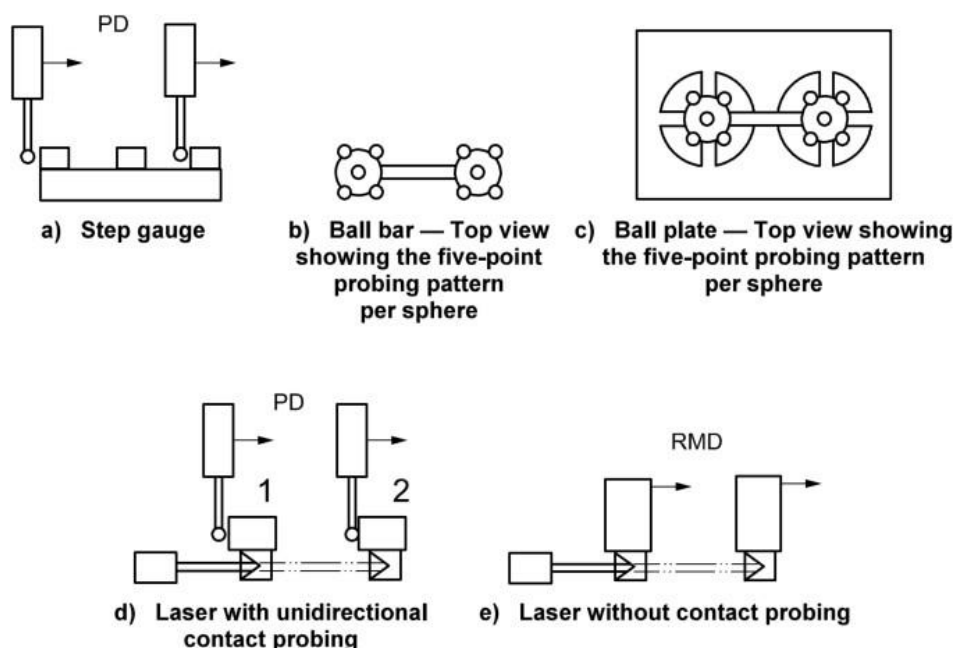
Всякий раз, когда измерение выполняется однонаправленным образом (например, рис. 4 а, е) или когда оно не включает в себя контактное зондирование (например, рис. 4 д), его необходимо дополнить двунаправленным измерением с помощью зондовой системы.

Установка, показанная на рисунке 4 е, дополненная двунаправленным измерением с помощью зондовой системы, может быть выполнена на короткой калиброванной испытательной длине, например, концевом калибре и испытательной сфере. В ISO 10360-2 указано, что ориентация этой короткой калиброванной испытательной длины (направление зондирования) должна быть такой же, как ориентация соответствующей испытательной длины.

Однако некоторые ориентации могут оказаться невозможными для данной системы зондирования, например, из-за столкновений валов. В этом случае дополнение зондированием также можно выполнить, добавив ко всем



измерениям перемещения ошибку формы зондирования и ошибку размера зондирования, что приводит к более консервативной оценке.



*Рис. 4.* Однонаправленные измерения калиброванной испытательной длины

### Библиографический список

1. Трегубович В.А., Сивов И.А., Королёва Т.А., Праздников М.Е., Басаргин А.А. Разработка координатно измерительной машины. — Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева.
2. ISO/TC 39/SC 2 «Условия испытаний металлорежущих станков».

© Осинская А.А., 2023

Р.Р. ШАВАЛЕЕВ

*ShavaleevRR@uust.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Э.В. САФИН

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ВЛИЯНИЕ СТАНДАРТОВ ОРГАНИЗАЦИИ НА УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ В ПРОЦЕССЕ ОСВОЕНИЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Аннотация:* В статье рассматривается роль стандартов организации (СТО) в повышении показателей компании, а также вопрос внедрения новых стандартов организации. Особое внимание уделено проблеме освоения изделий при внедрении нового СТО.

*Ключевые слова:* стандарт организации, система менеджмента качества, показатели качества, дефект

Стандарты организации (СТО) – это набор требований и рекомендаций, установленных организацией для достижения единообразия и качества работы внутри организации.

СТО играют важную роль в повышении эффективности и надежности работы компании. Они помогают достичь единообразия в процессах и обеспечивают гарантию качества продукции или услуг. Стандарты определяют требования к проектированию, производству и контролю, включая методики испытаний и измерений.

Применение СТО позволяет улучшить взаимодействие между отделами компании и обеспечить эффективное использование ресурсов, а также способствует рационализации процессов и повышению конкурентоспособности организации на рынке. Стандарты позволяют легче адаптироваться к изменениям внешней среды и находить оптимальные решения в сложных ситуациях.

Являясь важной составляющей успешного функционирования и развития организации, СТО способствуют повышению эффективности работы, минимизации ошибок и сбоев, улучшению качества продукции или услуг, а также созданию благоприятной рабочей среды и повышению удовлетворенности сотрудников и клиентов организации.

Стандарты играют большую роль на организацию, а именно:

– позволяют улучшить взаимодействие между сотрудниками и подразделениями организации;

– способствуют повышению эффективности и производительности организации, так как они оптимизируют процессы и упрощают выполнение задач;

– обеспечивают согласованность и единообразие работы внутри организации, что позволяет достичь высокого качества продукции или услуг;

– являются основой для контроля и управления процессами в организации, позволяют оценить соблюдение правил и норм, а также принять меры по улучшению работы;

– позволяют организации быть конкурентоспособной на рынке и расширять свои возможности за счет установления высоких стандартов качества.

Новые СТО могут влиять на организацию как положительно, так и отрицательно.

Положительное влияние СТО:

– обеспечение единого качества. Стандарты определяют минимальные требования к качеству продукции или услуг, что позволяет установить единые стандарты и ожидания со стороны потребителей. Это способствует улучшению доверия к продукции или услугам;

– снижение возможности появления дефектов. Благодаря стандартам, организации могут применять универсальные методы и процессы производства, что позволяет снизить вероятность возникновения дефектов и повысить качество продукции или услуг;

– улучшение конкурентоспособности. Стандарты организации являются одним из факторов, влияющих на конкурентоспособность компании. Соответствие стандартам позволяет организации доказать свою способность производить продукцию или оказывать услуги на высоком уровне и быть конкурентоспособной на рынке.

Отрицательное влияние СТО:

– ограничение инноваций. В некоторых случаях, стандарты могут ограничивать возможности организаций внедрять новые технологии и методы производства, что может стать препятствием для инноваций и развития;

– переизбыток требований. Иногда стандарты могут содержать излишнее количество требований, которые не относятся напрямую к качеству продукции или услуг и могут привести организацию к излишним тратам времени и ресурсов;

– высокие затраты на соответствие стандартам. Организациям могут потребоваться значительные ресурсы, чтобы соответствовать стандартам организации, такие как дополнительное оборудование, обучение персонала и сертификация. Это может привести к увеличению себестоимости продукции или услуг и ограничить конкурентоспособность.

Имея опыт работы на промышленном предприятии, была собрана статистика за 6 месяцев влияния внедрения нового СТО «Методы контроля и устранения дефектной продукции» при освоении серийной продукции изделия «статор». Информация представлена в Таблица

Таблица 1

## Показатели качества изделия «статор» при освоении серийного производства на промышленном предприятии

Показатели качества	Расчетный месяц					
Процент брака	2	2	0			
Процент дефектной продукции	3	9	0	0	8	5
Процент выхода годной продукции	5	9	0	4	6	0
Процент сдачи продукции с первого предъявления	4	0	3	1	2	5
Время сдачи партии, дней	4	8	4	2	1	

Так, опытным путем, выяснилось, что введение новых СТО положительно влияют на качество производимой продукции, доля дефектной продукции и невосполнимых потерь падает. Расход материала сокращается, соответственно себестоимость также дешевеет, что положительно повлияет либо на выручку организации, либо на конечную стоимость продукта. Также из-за реорганизации производства и оптимизации производственных процессов, время производства изделия сокращается, тем самым затраты на освоение также сокращаются.

В то же время новые СТО требуют время на переподготовку персонала, что влечет дополнительные расходы на аттестацию. Застой производства на начальных этапах внедрения СТО также отрицательно влияет на производственную мощность предприятия. Но спустя некоторое время, когда СТО начинают работать в полной мере, предприятие в короткий срок наверстывает затраченные ресурсы за счет выигрыша на дистанции в расходах на материалы и себестоимости изделия.

### Библиографический список

1. Управление качеством машин и технологий: учебник / А.И. Вальтер. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 248 с.
2. Обеспечение качества изделия в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 248 с.
3. Метрология, стандартизация и сертификация: учебное пособие / К.Г. Земляной, А.Э. Глызина; М-во науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 235, [1] с.

© Шавалеев Р.Р., 2023

Д.И. ШВЕЦОВА

*daariiaashvetsova@mail.ru*

Науч. руковод. – ст. преп. Е.А. ФИЛОНИНА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СЧЕТЧИКОВ ХОЛОДНОЙ И ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*Аннотация:* Рассматривается точность счетчиков холодной и горячей воды в различных условиях использования. Исследование дает представление о потенциальных ошибках при влиянии различных факторов и предлагает рекомендации по оптимизации.

*Ключевые слова:* метрология; стандартизация; счетчики воды; точность измерений; условия эксплуатации; водоснабжение

В последние годы точное измерение потребления воды становится все более важным в различных промышленных, коммерческих и жилых помещениях. Счетчики холодной и горячей воды имеют первостепенное значение для обеспечения прозрачности выставления счетов и справедливого распределения водных ресурсов. Однако на их точность может влиять целый ряд условий эксплуатации, таких как колебания температуры, расход и качество воды. Чтобы решить эту проблему и обеспечить точность измерений, необходимо провести метрологический анализ счетчиков воды в различных условиях эксплуатации. Цель работы – проанализировать метрологические особенности счетчиков холодной и горячей воды, подчеркнув влияние различных условий эксплуатации на их точность. Такой анализ позволит повысить надежность данных о потреблении воды и внести свой вклад в более эффективное управление ресурсами.

Важность понимания точности работы счетчиков воды в различных условиях рассматривается в научной литературе. Так, в работе Степанова содержится информация о метрологическом анализе точности счетчиков холодной и горячей воды, а также о технической эксплуатации этих приборов [1].

Счетчики воды, независимо от того, измеряют ли они холодную или горячую воду, в своей повседневной работе подвергаются воздействию широкого спектра условий. Колебания температуры могут повлиять на свойства измеряемой воды, а изменения давления могут повлиять на точность счетчиков. Кроме того, для обеспечения точности измерений необходимо учитывать различные модели водопользования, от сценариев с низким расходом до сценариев с высоким расходом. Так же, влияние различных условий окружающей среды, например, в чрезвычайно холодных или жарких регионах, требует комплексного анализа точности счетчиков воды в этих обстоятельствах.

Мониторинг качества воды также должен быть неотъемлемой частью систем учета, поскольку примеси в системе водоснабжения могут поставить под угрозу точность счетчиков. Регулярное обслуживание и чистка счетчиков могут помочь решить эту проблему.

Метрологический анализ счетчиков воды включает в себя лабораторные испытания и эксперименты, моделирующие реальные условия и нагрузки на счетчики. При этом учитываются такие факторы, как линейность измерений, повторяемость, чувствительность и устойчивость к внешним воздействиям. Основываясь на экспериментальных данных, определяются погрешности счетчиков воды при различных условиях эксплуатации и сравнивают их с нормативными значениями. Эти данные дают представление о том, как различные переменные влияют на точность счетчиков, и служат основой для разработки стандартов и правил, регулирующих точность и производительность счетчиков воды.

Также хотелось бы отметить исследование Синютина. [2]. В данной работе были представлены следующие условия влияния на точность счетчиков воды:

1. Изменение давления:

– *Воздействие на объем*: Перепады давления в системе водоснабжения могут приводить к изменениям в скорости потока воды через счетчик. Высокое давление может увеличивать объем воды, зарегистрированный счетчиком, в то время как низкое давление может снижать его.

– *Утечки и повреждения*: Повышенное давление может приводить к утечкам или повреждению счетчика, что также вызывает неточности.

2. Качество воды:

– *Загрязнения*: Примеси, частицы и загрязнения в воде могут привести к засорению или повреждению деталей счетчика, что снижает его точность. Например, осадки и ржавчина могут блокировать датчики и механизмы счетчика.

– *Коррозия*: Коррозия материалов счетчика может происходить из-за агрессивных химических компонентов в воде, что также влияет на его надежность и точность.

3. Срок службы и уход:

– *Износ*: По мере течения времени механические счетчики могут подвергаться износу. Трение может вызвать изменения в точности счетчика.

– *Обслуживание*: Регулярное обслуживание и калибровка счетчика могут помочь удерживать его точность. Необслуженные счетчики часто теряют точность с течением времени.

4. Условия установки:

– *Неправильная установка*: Некорректная установка счетчика, например, с недостаточным уровнем горизонтальности, может вызвать ошибки в измерениях.

5. Эксплуатационные условия:

– *Поломки и аварии*: Аварии, и механические повреждения могут существенно влиять на точность счетчиков.

Эти факторы имеют большое значение для обеспечения корректного учета и эффективного управления расходом воды, важно учитывать вышеперечисленное и регулярно проводить метрологическую поверку счетчиков воды, а также на важно сделать правильный выбор счетчиков в зависимости от конкретных условий эксплуатации. Результаты анализа могут быть применены для повышения эффективности и надежности счетчиков, что, в свою очередь, способствует более точному учету водных ресурсов и сокращению потерь воды.

Метрологический анализ точности счетчиков воды — это актуальная проблема, которая привлекла внимание исследователей в области метрологии и стандартизации. Результаты предшествующих исследований показали, что точность счетчиков может сильно варьировать в зависимости от условий эксплуатации и других факторов. Наша дальнейшая работа основана на тщательном обзоре литературы по этой теме, всестороннюю оценку предыдущих исследований, их достоинств и недостатков.

Работы указанных авторов посвящены метрологическим аспектам счетчиков воды, не углубляясь во влияние различных температур воды на точность счетчиков, что является ключевым отличием в планировании наших исследований.

### **Библиографический список**

1. Степанов, О.С. Разработка и исследование научно-технических основ метрологического обеспечения производства и эксплуатации счетчиков воды: специальность 05.11.15 «Метрология и метрологическое обеспечение»: Диссертация на соискание кандидата технических наук / Степанов О.С.; Южный федеральный университет. – Москва, 2004. – 147 с.

2. Синютин, Е.С., Ланько Д.И. Обзор существующих приборов учета расхода холодной воды и подходов к повышению точности измерения расхода воды / Е.С. Синютин, Д.И. Ланько // Электронный журнал "Инженерный вестник Дона". – 2017. – № 4.

3. ГОСТ Р 8.820-2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение».

© Швецова Д.И., 2023

## СЕКЦИЯ 2.3. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.923.5

С.Ф. ХАЛИЛОВ

*samir.khalilov.2001@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук С.Х. ХАДИУЛЛИН

*Уфимский университет науки и технологий*

### ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ В ХОНИНГОВАНИИ

*Аннотация:* В данной статье затронута тема показателей качества при хонинговании цилиндров двигателей внутреннего сгорания, а также методы их измерения.

*Ключевые слова:* хонингование, методы измерения, параметры шероховатости, активный контроль, профилометр

В современном мире автомобиль является неотъемлемой частью жизни человека. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС), практически каждого автолюбителя, при капитальном ремонте проходит процесс хонингования. С первого взгляда этот процесс выглядит достаточно просто, однако, хонингование – это не просто микронеровности различного размера на поверхности цилиндра, а довольно непростой вид обработки со своими показателями.

Хонингование – вид абразивной обработки цилиндрических поверхностей, который позволяет устранять шероховатости на поверхности заготовок, корректировать их геометрическую форму и повышать точность их габаритных размеров, а при обработке цилиндров ДВС еще и получать требуемый угол хонинговальной сетки.

Говоря о шероховатости поверхности цилиндра при хонинговании многие специализированные мастерские, выполняющие такие услуги, оценивают качество работ визуально, либо на ощупь, ссылаются на свой опыт, что носит субъективный характер, а те мастерские, где есть профилометр, в основном ориентируются на такие показатели, как  $R_a$  и  $R_z$ . Но стоит сказать, что это довольно усредненные параметры, по которым не в полной мере можно оценить качество обработанного цилиндра ДВС. На исправную работу современных ДВС, их ресурс, расход топлива и масла влияют в большей мере другие показатели, такие как  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $R_k$ ,  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$ . На данные параметры в большей мере ссылаются всезарубежные, а также некоторые отечественные производители современных моторов. Расшифровка показателей шероховатости представлена на кривой Аббота-Файерстоуна (рис. 1).



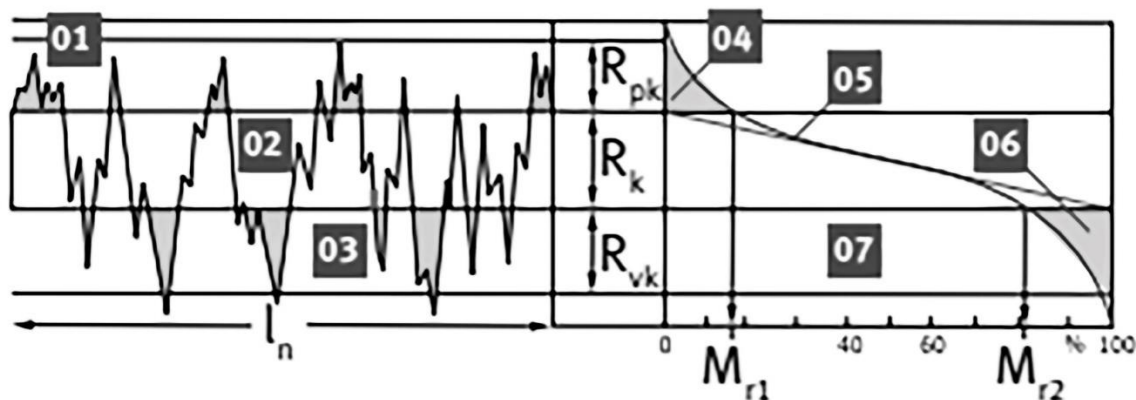


Рис. 1. Расшифровка показателей шероховатости на основе кривой Аббота-Файрстоуна

- 01 Приведённая высота пиков ( $R_{pk}$ );
- 02 Глубина сердцевины профиля ( $R_k$ );
- 03 Приведенная глубина впадин ( $R_{vk}$ );
- 04 Объем пиков ( $M_{r1}$ );
- 05 Кривая соотношения материалов (кривая Аббота-Файрстоуна)
- 06 Объем впадин ( $M_{r2}$ );
- 07 Соотношение материалов.

Для удобства анализа параметров шероховатости строится кривая Аббота-Файрстоуна. Кривая показывает профиль поверхности цилиндра.

Кривая Аббота-Файрстоуна была представлена Эрнестом Джеймсом Абботтом и Флойдом Олберном Файрстоуном в 1933 году. Она обычно полезна при проектировании и производстве отверстий для поршневых цилиндров ДВС. Форма кривой определяется несколькими параметрами шероховатости поверхности, особенно семейством параметров  $R_k$ .

К основным параметрам кривой относятся:

1.  $R_{pk}$  – вершины, которые сносятся поршневыми кольцами в первые минуты работы двигателя после пуска (мкм);
2.  $R_k$  – средние значения параметров шероховатости, данная область обеспечивает основной ресурс эксплуатации двигателя (мкм);
3.  $R_{vk}$  – нижние значения параметров шероховатости, области с данными значениями показывают глубину маслоудерживающих канавок. Обычно закладываются с черновых операций (мкм);
4.  $M_{r1}$  – наименьшее соотношение материала (%);
5.  $M_{r2}$  – наибольшее соотношение материала (%).

Рекомендуемые показатели шероховатости цилиндров ДВС указаны в таблице 1.

Таблица 1

## Примерные рекомендуемые показатели шероховатости цилиндров ДВС

Измеренное значение	Единица	Рекомендуемое значение	
		Бензин/дизель легковой автомобиль	Дизельный внедорожник
Среднеарифметическая шероховатость $R_a$	мкм	0,15-0,40	0,30-0,50
Приведённая высота пиков $R_{pk}$	мкм	0,10-0,40	0,20-0,60
Глубина сердцевины профиля $R_k$	мкм	0,20-0,60	0,50-1,50
Приведенная глубина впадин $R_{vk}$	мкм	0,5-1,00	0,50-1,50
Наименьшее соотношение материала $M_{r1}$	%	4-12	4-10
Наибольшее соотношение материала $M_{r2}$	%	75-90	80-90
Угол хонингования $\alpha$	°	25-45	40-60

Методы измерения шероховатости и варианты оценки поверхности:

### 1. Микроскоп

Поверхность цилиндров может быть оценена визуально с помощью электронного микроскопа. При 200-кратном увеличении можно определить угол хонингования, глубину профиля, величину и расположение зерен графита.

### 2. Профилометр

Качество шероховатости поверхности цилиндра можно определить с помощью прибора под названием «профилометр». Профилометр для измерения микропрофиля поверхности цилиндров – это специальное устройство, которое используется для измерения микротопографии поверхности цилиндрических и плоских деталей. Измерение производится с высокой точностью и позволяет определить параметры микропрофиля поверхности.

Профилометры бывают разных типов контактные и бесконтактные, а также портативные с выносным механизмом измерения, который можно расположить прямо внутри цилиндра. Например, MITOTOYOSURFTESTSJ-210. Данный тип профилометров предпочтительней при измерении шероховатости цилиндров ДВС.

Для достижения требуемых параметров шероховатости и точных размеров цилиндра целесообразно производить хонингование на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ). Станок с ЧПУ, который имеет систему активного контроля и коррекции формы цилиндра позволяет автоматически управлять процессом финишной обработки для получения

требуемой геометрии размеров обрабатываемого цилиндра и шероховатости обрабатываемой поверхности. Также позволяет контролировать и поддерживать заданные режимы обработки такие как: частота вращения шпинделя, давление на режущий инструмент (хонинговальный брусок), угол хонинговальной сетки и переход с основного режима обработки на чистовой режим для получения необходимой шероховатости поверхности стенки цилиндра. Например, Rottler(США), Sunnen(США) или станок AsgardHM15, разработанный компанией HONMASTERг. Уфа.

Таким образом, стоит сказать, что показатели  $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$  и  $R_a$  нужно считать основными показателями шероховатости при хонинговании цилиндров ДВС. Нужно отметить важность следования данным параметрам для достижения высокого ресурса цилиндра-поршневой группы ДВС, а так же необходимость периодического контроля качества микрорельефа поверхности цилиндра после обработки хонингованием такими приборами, как профилометр и микроскоп.

### Библиографический список

1. Кудояров, Р.Г. Влияние динамических сил на работу алмазных хонинговальных брусков / Р.Г. Кудояров // Станки и инструменты. – 2006. – № 7. – С. 33–35.
2. Кудояров, Р.Г. Повышение качества деталей при алмазном хонинговании / Р.Г. Кудояров // Станки и инструменты. – 2006. – № 5. – С. 35–37.
3. Кудояров, Р.Г. Повышение эффективности процесса алмазного хонингования отверстий деталей машин / Р.Г. Кудояров // Сб. статей междунаучно-техн. конф. «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы». – Волжский: Волжский инженерно-строительный институт филиал Волг-ГАСА. – 2001. – С. 130-133.
4. Куликов С.И. Прогрессивные методы хонингования / С.И. Куликов, Ф.Ф. Ризванов, В.А. Романчук, С.А. Ковалевский. – М.: Машиностроение, 1983. – 135 с. (40).
5. Dave, R. New process Simultaneously plates and honens parts quickly and economically / R. Dave // Machinery (USA). – 1972. – Vol. 78, № 9. – P. 37–41.
6. Buj-Corral I. Effect of grain size and density of abrasive on surface roughness, material removal rate and acoustic emission signal in rough honing processes / I. Buj-Corral, J. Alvarez-Flórez, A. Dominguez-Fernández // Metals 9(8). – 2019. – P. 850 (2.6.1 – [5]).

© Халилов С.Ф., 2023

Д.П. КРАСНИКОВ

*danya.krasnikov02@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент С.Х. ХАДИУЛЛИН

*Уфимский университет науки и технологий*

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ

*Аннотация:* В данной статье описываются основные методы и средства измерения при контролях износа режущего инструмента. Каждый из методов и средств измерений имеет свои преимущества и недостатки, выбор конкретного метода или же средства измерения зависит от требуемой точности условий процесса точения.

*Ключевые слова:* режущий инструмент; методы измерения; износ при точении

В то время, когда происходит точение заготовки на токарном станке, происходит износ режущего инструмента, из-за этого инструмент перестаёт быть надлежащего качества и детали, которые могли обрабатываться долгое время уходят в брак. Используются методы и средства измерения износа режущих инструментов для предотвращения брака.

Существуют два основных метода, которые применяются для контроля и определения дефекта режущей части: прямой и косвенный. При определении деформации режущей кромки рассматривается прямой метод измерения, который осуществляется путем определения различных параметров, таких как расстояние от режущей кромки до центра образовавшейся лунки, ширина ленточки износа по задней поверхности, глубина лунки. Прямые методы, которыми можно определить геометрические параметры износа режущего инструмента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Прямые методы измерения износа режущих инструментов

Метод				
Радио-активный	Оптический	Пневматический	Электромеханический	Ультразвуковой

Эффективный и надежный способ контролировать износ режущего инструмента при точении – это радиоактивный метод, базирующийся на использовании радиоактивных датчиков. Для определения степени износа, режущая пластина подвергается облучению нейтронами, что приводит к отделению радиоактивных частиц во время обработки. Затем эти частицы вместе

со стружкой проходят через измерительную головку, где осуществляется измерение уровня радиоактивности.

Электромеханический метод определяет степень износа инструмента в рабочей зоне с помощью контактных датчиков. Основной подход заключается в размещении данного устройства непосредственно на станке и проведении измерительного цикла, когда станок работает в качестве координатно-измерительной машины. В данной системе измерение износа производится при подводе инструмента к датчику, датчик преобразует в электрический сигнал перемещение щупа, который движется к инструменту [1]. Износ определяется по разности зафиксированных сигналов до и после прохождения обработки.

Таким образом, данный метод является одним из наиболее эффективных и точных способов контроля качества производства. Он обеспечивает высокую надежность, удобство использования. Недостатками можно с уверенностью назвать то, что не на каждом станке этот способ измерения подойдет, из-за того, что снижается универсальность станка и уменьшается его надежность.

Основой ультразвукового метода контроля при износе режущего инструмента во время точения является использование ультразвуковых волн. Этот метод позволяет определить степень износа путем измерения изменений во времени прохождения ультразвуковых волн через инструмент.

Принцип работы ультразвукового метода состоит в следующем: ультразвуковой излучатель устанавливается на одной стороне режущего инструмента, а датчик располагается на другой стороне. Излучение, испускаемое излучателем, проходит через инструмент и попадает на датчик. После этого осуществляется измерение времени, требуемого для прохождения ультразвуковых волн с помощью датчика.

При износе режущего инструмента его геометрия изменяется, что может приводить к изменению скорости распространения ультразвуковых волн. Путем сравнения измеренных значений с эталонными значениями можно определить степень износа инструмента.

Кроме того, ультразвуковой метод является экономически эффективным. Благодаря своей высокой чувствительности и точности, он позволяет снизить расходы на замену инструмента и увеличить срок его службы. Это в свою очередь снижает общую стоимость производства.

Косвенный метод контроля износа режущего инструмента при точении – это способ определения степени дефекторежущей части с помощью анализа изменений параметров процесса точения или обработки. В отличие от прямых методов, которые напрямую измеряют и контролируют износ, косвенные методы позволяют оценить состояние инструмента непосредственно в процессе обработки по параметрам процесса резания.

Один из косвенных методов – это силовые измерения. Для выполнения работы, изношенный инструмент требует больших усилий, что приводит к увеличению силы резания. Мониторинг силы резания во время процесса точения может помочь выявить изменения и давать показания о износе инструмента [2].

Также косвенные методы контроля износа могут основываться на изменении частоты вибрации инструмента или обработанной детали. Такой метод называется виброакустическим. Изношенный инструмент вызывает изменение амплитуд сигнала акустической эмиссии, которые могут быть измерены для определения степени износа [2].

Другой косвенный метод – измерение тепловых характеристик в зоне резания. Данный метод основан на взаимосвязи между температурой резания и износом инструмента при определенных сочетаниях материала инструмента и обрабатываемой детали, а также при требуемых условиях и режимах обработки.

Косвенные методы являются полезными при отсутствии возможности непосредственно измерять износ инструмента. Они позволяют оператору раньше обнаружить признаки износа и принять решение по замене или обслуживанию инструмента, чтобы поддерживать эффективность процесса точения.

Основные средства измерения, используемые для определения и контроля износа режущего инструмента:

1. Динамометры (магнитострикционные, пьезоэлектрические, тензометрические): данные средства измерения измеряют силу резания, производимую инструментом, и позволяют оператору контролировать силу резания во время процесса точения. Чтобы была более эффективная реализация, необходимо снабжать каждый режущий инструмент собственным датчиком, что в производстве сложно выполнимо. При установке общего силоизмерительного датчика всё будет приводить к снижению точности контроля. При размещении динамометров важную роль играет расположение, чем ближе датчик к зоне резания, тем точнее происходит измерение и повышается надежность системы контроля[2].

2. Измерительные инструменты: классические инструменты измерения, такие как штангенциркуль, микрометр, отвертки, позволяют измерять размеры деталей и контролировать их изменение из-за износа инструмента.

3. Вибрационные датчики: специальные датчики вибрации могут быть установлены на станках или режущих инструментах для контроля уровня и изменения вибраций. В промышленности используют пьезоэлектрические акселерометры, которые могут удовлетворить требования в производстве и имеют достаточно низкую стоимость. Главным недостатком этих устройств является недостаточная помехозащищенность, из-за периодических влияний случайных и периодических помех.

4. Термокамеры: термокамеры основаны на использовании инфракрасных изображений для измерения температуры поверхности инструмента. Они могут быть использованы для наблюдения за изменениями в температуре инструмента во время работы и выявления износа.

5. Оптические системы: оптические системы могут быть применены для измерения геометрических параметров инструмента, таких как радиус или угол заточки. Изменение параметров может указывать на износ инструмента. Важно отметить, что оптические системы измерения обеспечивают оперативное и точное определение износа, что позволяет предотвратить дорогостоящие

повреждения оборудования и инструмента, и снизить риск производственный аварий.

6. Акустический анализ: использование акустического анализа позволяет обнаружить изменения в звуке, создаваемом режущим инструментом. Износ инструмента может изменить звуковые характеристики, что помогает оператору определить степень износа.

Подводя итоги, можно сказать, что износ режущего инструмента при точении можно контролировать и измерять с помощью различных методов и средств измерений. Измерение геометрических параметров режущего инструмента, параметры резания, измерение размеров деталей, а также использование динамометров, вибрационных датчиков, термокамер, оптических систем и других средств измерений - всё это является важным инструментом для определения степени износа и контроля качества процесса точения. Это позволяет обеспечить оптимальное использование режущих инструментов и повысить производительность процесса, уменьшая производственный брак.

### **Библиографический список**

1. Диагностика режущего инструмента на станках с ЧПУ по акустическому сигналу: Методические рекомендации / Козочкин И.У. – М.: ВНИИМС, 2001. – С. 59.

2. Методы диагностики состояния режущего инструмента в станочных системах Латыпов Р.Р., Постнов В.В., Хадиуллин С.Х. учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150400 "Технологические машины и оборудование", специальности 150401 "Проектирование технических и технологических комплексов" / Уфа, 2009.

3. Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Контроль состояния режущих инструментов. Наука и техника. 2002.

4. Чувькин метод контроля износа режущего инструмента // Проблемы управления точностью автоматизированных производственных систем: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 1996.

5. Оценка эффективности эксплуатации твердосплавного инструмента на основе прогнозирования его режущей способности Постнов В.В., Старовойтов С.В., Хадиуллин С.Х. СТИН. 2013. № 5. С. 15-19.

6. Повышение эффективности изготовления деталей ГТД на основе прогнозирования режущих свойств инструментальных твердых сплавов Постнов В.В., Хадиуллин С.Х., Старовойтов С.В. СТИН. 2015. № 11. С. 20-26.

© Красников Д.П., 2023

С.Е. КУЛЕШОВ

*kuleshovsemn@rambler.ru*

Науч. руковод. – д.п.н., проф. Л.К. МАЗУНОВА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*Аннотация:* В статье рассматриваются перспективы использования средств радиочастотной идентификации на производстве, приводится сравнительная характеристика технологий радиочастотной идентификации.

*Ключевые слова:* радиочастотная идентификация, RFID

Сложность производственных процессов, таких как например, производство авиационных двигателей и приборов, возрастает с каждым днем из-за повышающихся требований к уровню качества. Кроме того, сложность возрастает из-за нового оборудования и технологий, предлагаемых персоналу, начиная от станков и заканчивая электронным хранилищем данных. В последние годы активно разрабатываются новые системы радиочастотной идентификации (RadioFrequencyIdentification), определяющие местоположение, которые используют различные технологии Интернета вещей.

Основная цель этих новых технологий идентификации, применительно к производству – дать возможность персоналу и руководству точно определять местоположение и отслеживать активы или даже людей внутри производственного процесса. Среди других сценариев, в которых можно использовать радиочастотную идентификацию, можно выделить поиск оборудования и других устройств внутри склада, что часто является сложной и трудоемкой задачей, а также включение радиочастотной идентификации в систему пожарной сигнализации и противоаварийной защиты. Кроме того, концепция состоит в том, чтобы создать интеллектуальную систему вызова обслуживающего персонала для предотвращения аварийных ситуаций, которая сможет определить местонахождение ближайшего специалиста для оперативного устранения неисправностей. Это лишь несколько примеров того, как радиочастотная идентификация может улучшить внутренние функциональные возможности производства.

В литературе [1] предложены различные системы и технологии, и некоторые из них доступны на рынке для удовлетворения потребности в локализации внутри помещений, включая системы, использующие камеры или другие комбинации датчиков.



Наиболее перспективными беспроводными технологиями для высокоточной локализации внутри помещений являются WLAN, UWB, RFID, BLE, включая комбинации сGPS.

На рисунке 1 представлен обзор наиболее используемых беспроводных технологий локализации внутри помещений с некоторыми ключевыми параметрами, такими как дальность действия, точность и энергоэффективность при питании от батарей.

Технология	Точность	Дальность	Автономность
Wi-Fi	 < 15 m	 < 150 m	 days
BLE 4.2	 < 3 m	 < 75 m	 years
BLE 5.2	 < 1 m	 < 75 m	 years
UWB	 < 10 cm	 < 30 m	 weeks
RFID (passive)	 < 5 cm	 < 1 m	 N/A

Рис. 1. Сравнение технологий радиочастотной идентификации

Многие исследователи [1,2] изучали возможность использования беспроводной сетиWLAN, в частности WI-FI, из-за того, что она широко распространена во всех зданиях и обладает большим радиусом действия, однако основными недостатками являются высокое энергопотребление системы, работающей от батареи, и не очень высокая точность обнаружения.

Благодаря сверхширокополосности и характеру технологии, решения, основанные на UWB, обеспечивают очень высокую точность менее 30 см в радиуседесятых долей метра – однако современные BLE-модули по-прежнему имеют слишком высокое энергопотребление, около 55 МВт, что снижает их использование в реальных проектах, где радиочастотной метке требуется работать месяцами с монетной батареей типа CR2032.

Radio FrequencyI Dentification (RFID) является наиболее широко используемой технологией для идентификации. RFID позволяет добиться очень низкого энергопотребления, поскольку многие метки могут работать даже без какого-либо источника питания. Более того, пассивные метки обеспечивают наиболее точную сантиметровую точность. RFID метки обладают низкой стоимостью (порядка 1 доллара). Но радиус действия ограничен к небольшому диапазону менее 2 м, в то время как активные метки для расширения диапазона передачи требуют большого энергопотребления и больших антенн. Это не позволяет применять RFIDдля динамической идентификации положения.

Технология BluetoothLowEnergy (BLE) предлагает оптимальный компромисс между точностью, дальностью действия, энергопотреблением и доступностью во всех современных телефонах. Растущая доступность BLE-пеленгации приводит к созданию энергоэффективных, недорогих и более точных систем локализации.

Из вышесказанного следует, что направление радиочастотной идентификации является перспективным для различных отраслей производства, где есть необходимость точного определения местоположения ресурсов или людей. Используемая технология идентификации должна подбираться в соответствии с требованиями производства: точность определения местоположения объекта, дальность отметки и длительность автономной работы метки.

### **Библиографический список**

1. Fonseka, P.; Sandrasegaran, K. Indoor localization for IoT applications using fingerprinting. In Proceedings of the 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Singapore, 5–8 February 2018; pp. 736–741.
2. Cortesi, S.; Vogt, C.; Magno, M. Comparison between an RSSI and an MCPD-Based BLE Indoor Localization System. Computers 2023.

© Кулешов С.Е., 2023

УДК 621.91.01

А.А. САЗАНОВ

*aasazan23@gmail.com*

Т.Р. ИСМАГИЛОВ

*ismagilov.tagir@bk.ru*

Л.Р. КИЛЬМЕТОВА

*Kilmetovalr@gmail.com*

Науч. руковод. – доц. каф. АТП С.Х. ХАДИУЛЛИН

доц. каф. АТП П.П. ЧЕРНИКОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ТОЧЕНИЯ**

*Аннотация:* В работе описаны причины возникновения внутренних напряжений в металле при обработке точением, их зависимость от сил резания, проблематика контроля сил резания и предлагаемое решение.

*Ключевые слова:* остаточные напряжения; обработка резанием; влияние сил резания, методы определения остаточных напряжений, методы определения сил резания

## **Ведение**

С появлением новых материалов и технологий в различных отраслях машиностроения, включая атомное машиностроение, горнодобывающую промышленность и производство транспортных газо- и нефтепроводов, возникает необходимость учитывать все большее количество физико-механических параметров при оценке прочности и надежности производимой продукции.

Одним из важных факторов, указываемых в конструкторско-технологической документации, является уровень остаточных напряжений 1-го рода по классификации Н.Н. Давиденкова. Исследования и практический опыт показывают, что остаточные напряжения 1-го рода имеют существенное влияние на надежность, долговечность и эксплуатационные характеристики техники. Они также влияют на характеристики деталей, такие как износостойкость, усталостная прочность и другие [1-3].

Остаточные напряжения 1-го рода возникают в конструкциях по разным причинам, таким как деформации при нагреве и охлаждении, неоднородное напряженное состояние материала, взаимодействие компонентов конструкции и особенностями метода обработки материалов, таких как температурно-силовых факторов.

При повышении сил резания увеличиваются остаточные напряжения, наибольший же вклад в показатель остаточных напряжений, как было выявлено в многочисленных исследованиях, вносит подача. [2-4] Скорость резания же в свою очередь в меньшей степени влияет как на остаточные напряжения, так и на силу резания, но оказывает сильное влияние на температуру в зоне обработки, при повышении скорости вращения обрабатываемой детали, это приводит к увеличению нагрева материала, что способствует возникновению пластической деформации [2-4].

Все известные методы определения остаточных напряжений (кроме расчетных) предполагают разрушение детали. так же имеется нюанс того, что нет возможности определить показатель остаточных напряжений в тонких элементах деталей, например, таких, как проточка, фаска и т.д. По мимо этого, если при анализе выясняется, что остаточные напряжения в детали отклонились от требуемых, то вся партия уходит в утиль, что в свою очередь приносит убытки.

Способы контроля температурно-силовых параметров резания являются основополагающими, при прогнозировании и обеспечении необходимого уровня остаточных напряжений.

## **Методы измерения сил резания**

При анализе процесса резания в механической обработке необходимо учитывать различные силы, действующие между резцом и заготовкой. Эти силы

состоят из тангенциальной  $P_z$ , радиальной  $P_y$  и осевой  $P_x$  составляющие силы резания. Во время точения можно рассмотреть всю систему сил как одну равнодействующую  $R$  (см. рис. 1) - силу резания. Точка приложения которой находится на рабочей части режущей кромки. [7,8]

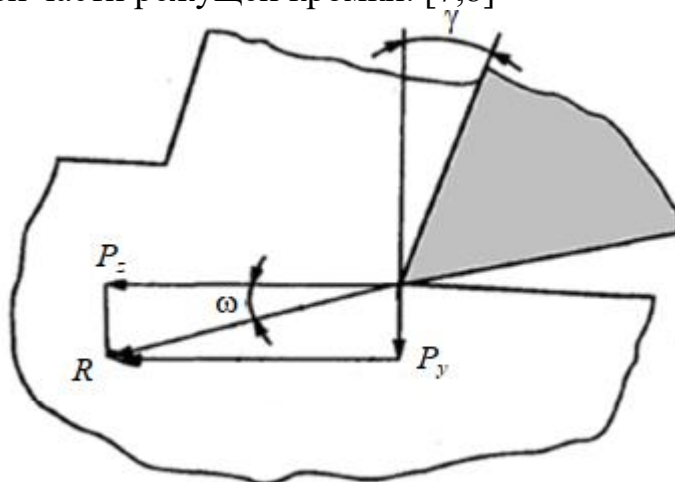


Рисунок 1. Схема распределения сил резания в точке приложения режущего инструмента

В инженерных расчетах для определения силы резания в процессе механической обработки используются эмпирические зависимости между этой силой и параметрами режимов резания. Путем проведения серии экспериментов была выведена специальная формула, которая традиционно используется в справочниках по механической обработке для определения силы резания. Эта формула позволяет оценить силу резания в зависимости от различных режимов обработки, таких как скорость резания, скорость подачи и глубина резания, и может быть применена для разных типов материалов и инструментов:

$$P_i = C_{Pi} t^f s^g V^h K_{qi}$$

где  $P_i$  — составляющая силы резания;  $C_{Pi}$  — постоянный коэффициент, отражающий влияние условий обработки, поддерживаемых постоянными в ходе эксперимента;  $t$  — глубина резания (мм);  $s$  — подача (мм/об);  $V$  — скорость резания (м/мин); показатели  $f$ ,  $g$ ,  $h$  характеризуют интенсивность влияния соответствующего элемента режима резания на  $P_i$ ;  $K_{qi}$  — коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала, геометрию инструмента, износа и других факторов, не учитываемых коэффициентом  $C_{Pi}$  [9,10].

Большая часть измерений силы резания выполняется с использованием динамометров, которые могут быть гидравлическими, механическими или электрическими. Однако гидравлические и механические динамометры не очень популярны из-за своей неспособности эффективно измерять быстро протекающие процессы. В свою очередь электрические динамометры лишены этого недостатка, так как мало инерционны, обладают высокой точностью измерений и способны работать в широком диапазоне условий и с помощью осциллографа способны записывать изменения быстропротекающих процессов

за 10-5 доли секунды, и преобразовывать механический сигнал воздействия сил резания в удобный для обработки электрический.

Существует несколько способов перевода механического сигнала в электрический (см. рис. 2): емкостной, индуктивный, пьезоэлектрический, магнито-упругий и с помощью тензодатчика,

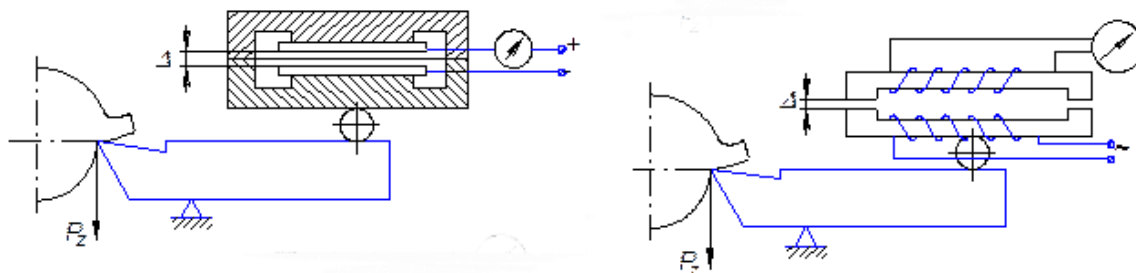


Рисунок 2. Пример датчиков: емкостной(слева), индуктивный(справа)

Примером электрических динамометров может служить универсальная динамометрическая установка (рис. 3)

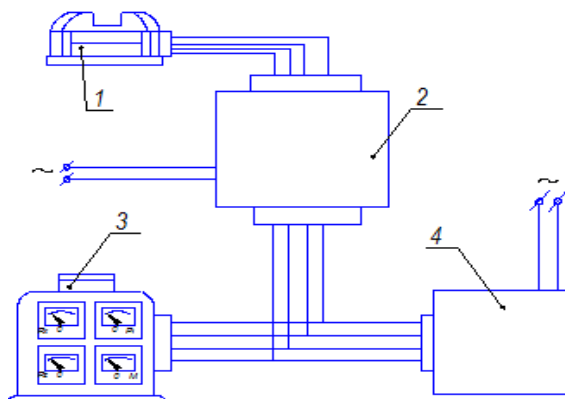


Рисунок 3. Схема динамометрической установки: 1 – датчик динамометра; 2 – усилитель электрических сигналов; 3 – приборный щит; 4 – осциллограф

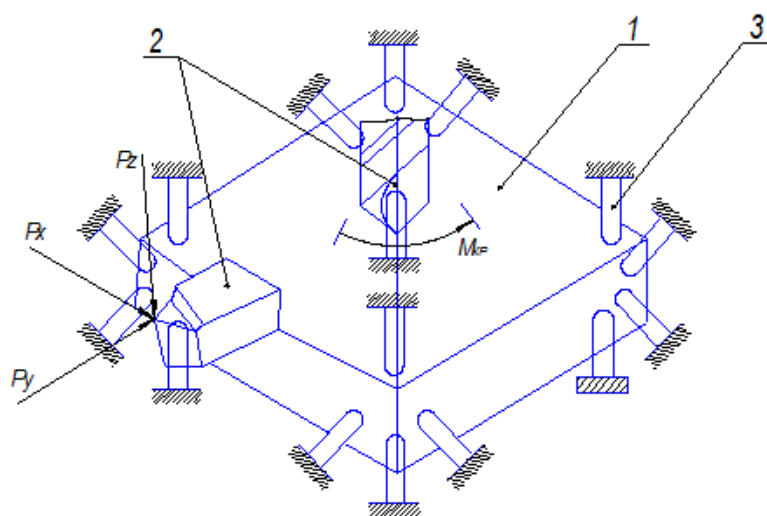


Рисунок 4. Схема тензометрического динамометра: 1 – жесткая плита; 2 – держатель инструмента; 3 – опоры (16 штук), представляющие собой тонкостенные втулки на ножках-шарнирах

Такая конструкция опор обеспечивает восприятие нагрузки только вдоль оси опоры, а их количество и расположение позволяют фиксировать составляющие силы резания  $R_x$ ,  $R_y$ , крутящий момент в горизонтальной плоскости и составляющую  $R_z$  в вертикальной плоскости. На втулки-опоры наклеены тензодатчики, соединенные в соответствующие электрические схемы и имеющие выводы на усилитель, приборный щит и осциллограф (см. рис. 3).

Наиболее распространенным динамометром является УДМ-600, который дополнительно устанавливают на станки. Однако, его недостатком является то, что из-за особенностей конструкции некоторых станков не всегда возможно установить подобные датчики. Кроме того, в случае выхода из строя датчиков, станок также придется останавливать, что приводит к простоям производства.

Известно, что с возрастанием сил резания, возрастает потребляемая мощность двигателя. Это означает, что сила резания, а также ее производные, такие как мощность, крутящий момент и силы тока главного движения или движения подачи, могут быть использованы в качестве сигнала для диагностики (см. рис. 5) [11].

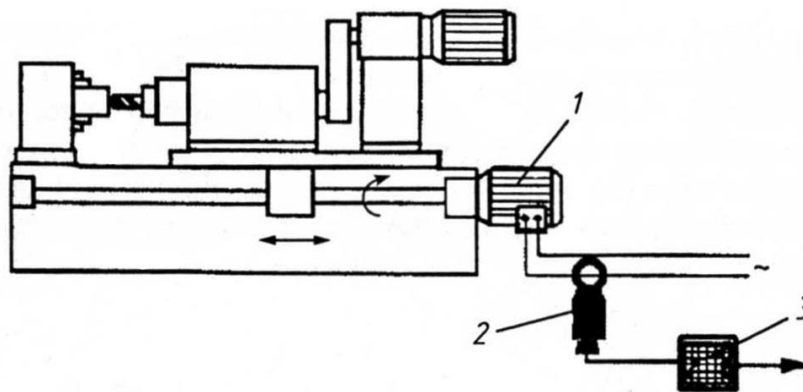


Рисунок 5. Схема измерения мощности привода подачи: 1 – двигатель; 2 – датчик тока; 3 – регистратор сигнала

Устройства контроля мощности резания работают путем измерения силы тока и напряжения в двигателе главного движения или движения подачи. Эти устройства просты и недороги, их использование не требует изменений в конструкции станка.[11]

### Вывод

Анализ различных методов контроля выявил необходимость создания способа контроля и регулирования сил резания без использования дополнительного оборудования, которое бы не устанавливалось непосредственно в контакте с изготавливаемой деталью, и не требовало отдельного технического обслуживания, а также без необходимости отдельного контроля поверхностных свойств деталей.

Предлагаемое решение состоит в том, чтобы по показателям электропривода определять параметр силы, который в свою очередь

использовать для контроля и регулирования остаточных напряжений первого рода, через регулирования параметров режима резания.

Цель дальнейших работ это создании системы автоматического контроля и регулирования остаточных напряжений, с помощью изменения подачи и скорости резания, на основе показателей силы резания, измеряемых по показателям электропривода. Задача дальнейших работ состоит в создании системы телеметрии, для нахождения зависимостей показателей, выдаваемых машиной, от сил резания, и приведение к зависимости остаточных напряжений от внутренних показателей двигателя. В качестве инструмента с помощью которого будут сниматься силы резания, был взят динамометр УДМ-600, остаточные напряжения будут определяться с помощью механических испытаний.

### **Библиографический список**

1. Макаров А.Д. Оптимизация режимов резания. – М., «Машиностроение», 1976. – С. 147–156.
2. Р.Р. Башаров, Л.Р. Кильметова, С.В. Старовойтов, С.Х. Хадиулин, П.П. Черников «Анализ причин и источников возникновения остаточных напряжений» ГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ), НПП Технопарк Авиационных Технологий, Уфа, 2018 г.
3. Л.Р. Кильметова, С.Х. Хадиуллин, П.П. Черников «Анализ исследований влияния элементов режимов резания на возникновение остаточных напряжений при механообработке» ГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ), Уфа, 2019 г.
4. О.Ю. Александрова, А.А. Ширяев, А.В. Снегирева, В.Н. Трофимов, В.В. Карманов «Влияние режимов механической обработки стали 38хн3мфа на величину остаточных напряжений». Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 2018 г.
5. Влияние износа реза и режимов резания на параметры качества и температуру обрабатываемой поверхности при тонком точении / В.Г. Круцило, Л.П. Ситкина, И.Н. Разумова [и др.] // Изв. Самар.науч. центра РАН. 2016. С. 331–335.
6. Исаев Р.М., Любимый А.В. Способы определения сил резания, возникающих в процессе обработки заготовок // Приборостроение. 2015.
7. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Жигалко Н.И. Основы резания материалов и режущий инструмент. – Мн.: Высш. школа, 1981. 560 с.
8. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Мн.: Новое знание, 2006. 512 с.
9. Косилова А.Г., Мещерякова Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1986. 656 с.
10. Малов А.Н. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1973. 311 с.

11. Р.Р. Латыпов, В.В. Постнов, С.Х. Хадиуллин «Методы диагностики состояния режущего инструмента в станочных системах» ГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ), Уфа, 2009.

© Сазанов А.А., 2023

УДК 621.9.048.4

М.Р. ХАБИБУЛЛИН  
*habibullin.2001yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент С.И. ФЕЦАК

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПЕРФОРАЦИИ ЛОПАТОК ТУРБИН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

*Аннотация:* Рассмотрены требования, предъявляемые к рабочим лопаткам турбин высокого давления. Проведен анализ современных способов охлаждения лопаток. Рассмотрен метод электроэрозионной обработки для прожига отверстий перфорации лопаток. Описаны основные дефекты, возникающие при электроэрозионной обработке.

*Ключевые слова:* электроэрозионная обработка, рабочая лопатка, турбина высокого давления, обрабатываемость, отверстия, охлаждение лопаток, отверстия перфорации

В аэрокосмической сфере, а в частности, в турбинах высокого давления (ТВД), все чаще находят применение жаропрочные сплавы на основе таких тугоплавких металлов, как никель, молибден, вольфрам и титан. Для деталей и узлов авиационной техники, выполненных из жаропрочных сплавов на основе жаропрочных сплавов, предъявляются следующие требования: высокая удельная прочность, прочность и пластичность при низких (криогенных) температурах, сопротивление эрозии и коррозии. Также важна технологичность изделий из сплава, характеризующаяся пригодностью материала для обработки под действием разных факторов с минимальной трудоемкостью [1].

В процессе эксплуатации ТВД наибольшие нагрузки и воздействие внешней среды оказывается на рабочие лопатки турбины: растягивающее напряжение достигает 140 Мпа, материал лопаток нагревается до 980 °С; помимо этого лопатки должны обладать достаточной пластичностью, сопротивлением усталостной деформации, коррозионной стойкостью, а также иметь приспособленность для прочного соединения с диском. Главенствующие требования к материалу рабочих лопаток – сопротивление ползучести при



высоких температурах, сопротивление к усталости, стойкость в условиях газовой коррозии и эрозии, высокая ударная вязкость [1, 2].

В настоящий момент в аэрокосмической сфере широко применяются жаропрочные сплавы на никелевой основе с добавлением легирующих элементов, что обусловлено их высокой жаропрочностью и коррозионной стойкостью[2].

Скорость коррозии поверхностного материала пропорционально росту температуры. В современных ТВД температура лопатки первой ступени достигает до 1200 °С. Остро стоит вопрос естественного охлаждения лопаток, в связи с чем ранее был разработан ряд конструкторских решений [2, 3]:

1. Конвективное охлаждение, предусматривающее прокачку воздуха по выполненным на этапе литья внутренним каналам лопатки, что позволяет понизить температуру лопаток на 220–260 °С при рабочей температуре газовой среды до 1200 °С; толщина стенок между каналами и профилем сечения лопатки составляет порядка 0,7–1 мм.

2. Пленочное охлаждение, применяется вместе с конвективным охлаждением. Вокруг лопатки потоком холодного воздуха формируется заградительная пленка, препятствующая передаче тепла от горячего газа. Критическим недостатком является быстрое разрушение пленки и снижение конструктивной прочности лопатки отверстиями.

3. Пористое охлаждение, отличается от пленочного охлаждения тем, что отверстия в профиле лопатки имеют существенно меньший диаметр (0,2–1,0 мм) и расположены менее упорядочено, перфорационной сеткой. Проходя через перфорацию, воздух способен одновременно забирать тепло от профиля лопатки и формировать защитный слой, аналогичный пленочному. Стоит отметить, что на пористое охлаждение расходуется значительно меньше воздуха, чем при конвективном и пленочном охлаждении.

На рис. 1 приведено сравнение интенсивности охлаждения пера лопатки.  $\Theta$  – коэффициент температурной интенсивности охлаждения, или коэффициент глубины охлаждения, выражающийся в отношении снижения температуры лопатки относительно максимальной температуре газа к разности температур газа и охлаждающего воздуха. Коэффициент  $\Theta$  можно выразить в формуле (1):

$$\Theta_{\text{ср}} = \frac{T_{\Gamma}^* - T_{\text{л}}}{T_{\Gamma}^* - T_{\text{охл}}^*}, \quad (1)$$

где  $T_{\Gamma}^*$  – температура газа перед ступенью;  $T_{\text{л}}$  – температура материала лопатки;  $T_{\text{охл}}^*$  – температура охлаждающего воздуха.

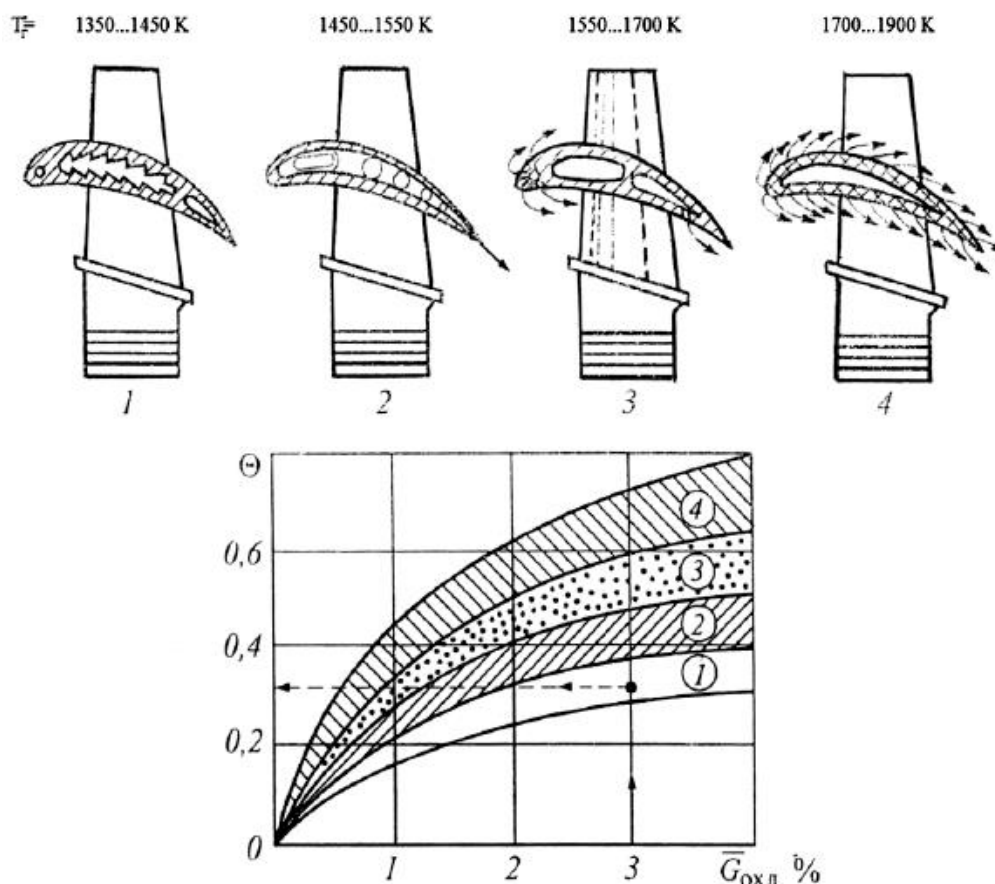


Рис. 1. Зависимость глубины охлаждения  $\Theta$  рабочей лопатки турбины от относительно расхода охлаждающего воздуха  $\bar{G}_{\text{охл}}$  [3]:

- 1 – лопатка с конвективной охлаждением, выполненным схемой радиальных каналов;
- 2 – лопатка с конвективным охлаждением со вставным дефлектором;
- 3 – лопатка с конвективно-пленочным охлаждением со вставным дефлектором;
- 4 – пористое охлаждение лопатки

Наиболее широкое распространение на текущем технологическом уровне имеет конвективно-пленочное охлаждение, обеспечиваемое перфорацией в профиле лопатки. Использование перфорации существенно повышает стабильность и уменьшает турбулентность защитной пленки лопатки и совершенно необходимо для развития ТВД нового поколения, способных работать на температурах свыше 1500 °С, что рассматривается авторами следующих работ [4, 5].

Однако изготовление лопаток с перфорацией остается осложнено несколькими технологическими факторами. Первый из них – обрабатываемость – это отношение массы снятого материала заготовки к снятой массе материала эталонного образца при одинаковых условиях. Жаропрочный сплав ЖС32-ВИ, из которого выполнены лопатки, обладает низкой обрабатываемостью резанием К. Для сплава ЖС32-ВИ коэффициент К – 0,4 по отношению к сплаву ХН77ТЮР, и  $\approx 0,1$  по отношению к конструкционной стали [6].

Вторым фактором выступает практическая невозможность применения классических методов сверления глубоких отверстий малого диаметра (менее 1 мм). Отвод тепла тем эффективнее, чем плотнее расположены отверстия и меньше их диаметр. Конструктивно обосновано сверление отверстий диаметром 0,2...0,8 мм.

По выше озвученным причинам для сверления (прожига) отверстий в профиле лопатки ТВД представляется рациональным использование высокоэффективного технологического процесса электроэрозионной обработки (ЭЭО).

Метод электроэрозионной (ЭЭ) размерной обработки – это совокупность процессов, сопровождающих электрический разряд в жидкой диэлектрической среде, совместное протекание которых приводит к изменению геометрических свойств твердого электропроводного тела. На рис. 2 изображена схема протекания физико-химических процессов в зоне ЭЭО. При этом электродами становятся инструмент (проволока, пресс-форма) и обрабатываемая заготовка. В прямой полярности подводимый инструмент выступает катодом, а заготовка – анодом.

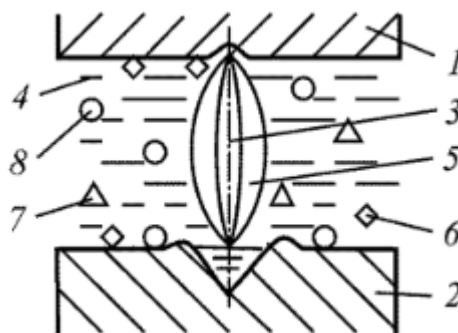


Рис. 2. Эрозия электродов при воздействии электрического разряда [7]:  
1, 2 – электроды; 3 – канал разряда; 4 – рабочая среда (диэлектрик); 5 – газовый пузырь; 6 – пузырек пара; 7 – твердая частица; 8 – продукты пиролиза

Механизм снятия припуска, основанный на многократном наложении единичных эрозионных лунок, является специфической особенностью метода ЭЭО. На нем базируются существующие модели ЭЭ формообразования, формирования макро- и микрогеометрии обработанной поверхности.

ЭЭО в первую очередь применяется для обработки деталей из твердых сплавов и жаропрочных сталей, обработка которых традиционными механическими способами сопряжена с технологическими сложностями; наряду с этим ЭЭО используется для изготовления деталей со сложной геометрией или небольшими глубокими отверстиями.

Прожиг отверстий перфорации лопаток ТВД, изготавливаемых из сплава на никелевой основе, методом ЭЭО обоснован низкой обрабатываемостью материала традиционными методами механообработки и большой глубиной сверления, недостижимой микросвёрлами.

Прожиг отверстий в профиле лопатки производится в несколько заходов. Эскиз обрабатываемой лопатки приведен на рис. 3.

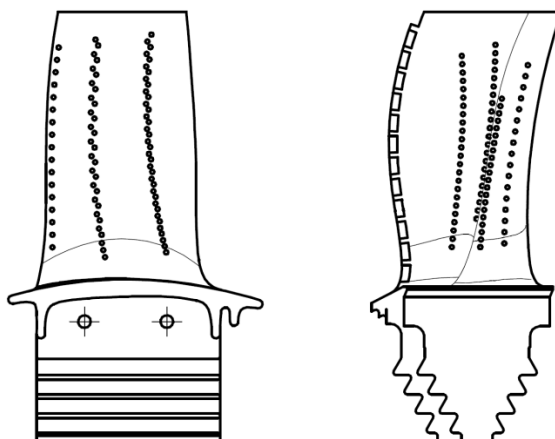


Рис. 3. Отверстия перфорации в наружном и внутреннем профилях рабочей лопатки

Для ЭЭО при любых режимах работы оборудования и типов обработки характерно появление измененного (дефектного) слоя в результате термического воздействия на материал.

В дефектном слое, обладающим специфическим микрорельефом, формируются зоны остаточного напряжения. В некоторых случаях в нём могут образовываться микропоры, микротрещины и раковины, простирающиеся за пределы дефектного слоя. Однако микротвёрдость белого слоя, формирующегося на деталях из жаропрочного никелевого сплава, на 25–35% выше твердости остального материала заготовки.

Образование дефектного слоя связано со множеством факторов, в первую очередь от энергии импульсов и их длительностью, в меньшей степени от характеристик рабочей среды и обрабатываемостью материала заготовки. На рис. 4 приведена фотография дефектного слоя, полученная при металлографическом анализе микрошлифа.

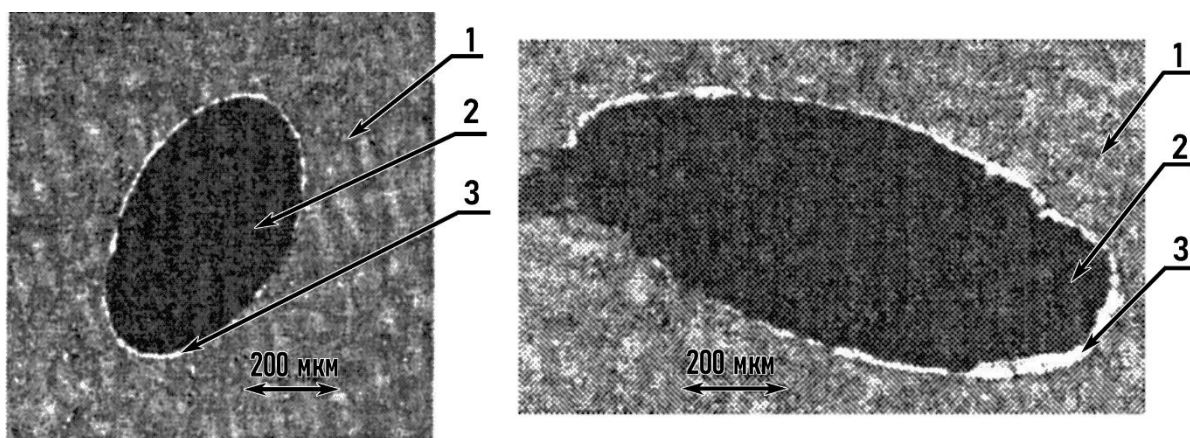


Рис. 4. Изображения отверстий перфорации с дефектным слоем: 1 – профиль пера лопатки; 2 – отверстие перфорации; 3 – дефектный слой

Другим источником дефектов при ЭЭО является неконтролируемость прожига заготовки. Согласно технологии отверстия перфорации методом прошивочной ЭЭО прожигаются до внутренних воздушных каналов лопатки, формируя сквозные отверстия. Однако в ряде случаев отверстия перфорации могут быть прожжены электродом не на всю глубину внутреннего профиля сечения, из-за чего возникает потребность в индивидуальной доработке заготовки. Недопустимым является и врезанием электрода в противоположную стенку лопатки. Подобные дефекты ввиду малых размеров отверстий не могут быть выявлены внешним осмотром или контролем специальными калибрами, поэтому определяются рентгеном либо разрезанием заготовки.

Таким образом необходимо детально проанализировать влияние технологических факторов на возникновение дефектов, изучить примеры применения технологии ЭЭО на предприятиях, подобрать оборудование и рассчитать режимы обработки, минимизирующие появление дефектов.

### **Библиографический список**

1. Тугоплавкие металлы: применение и свойства тугоплавких металлов: курс лекций / В.С. Челноков, И.В. Блинков, В.Н. Аникин, А.О. Волхонский. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 114 с.

2. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.

3. Сайтов Э.Н. Эффективность различных систем воздушного охлаждения лопаток газотурбинной установки / Э.Н. Сайтов, Я.О. Николаева, А.М. Бикбулатов // Вестник науки и образования. – 2019. – № 3. – С. 5–9.

4. Тихонов А.С. Анализ использования профилированных отверстий перфорации для повышения качества пленочного охлаждения спинки сопловых лопаток турбин / А.С. Тихонов, Н.Ю. Самохвалов // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 5. – С 20–27.

5. Влияние перфорации и теплозащитных покрытий на эффективность охлаждения турбинной лопатки / В.А. Трушин [и др.] // Вестник УГАТУ. – 2019. – Т. 23, № 1. – С. 82–96.

6. Елисеев Ю.С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю.С. Елисеев, Б.П. Саушкин; под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 437 с.

7. Жидков И.С. Электрофизические методы обработки материалов: учебное пособие / И.С. Жидков, А.И. Кухаренко, С.О. Чолах. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 195 с.

© Хабибуллин М.Р., 2023

С.Ф. ХАЛИЛОВ

*samir.khalilov.2001@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук С.Х. ХАДИУЛЛИН

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ В ХОНИНГОВАНИИ**

*Аннотация:* В данной статье затронута тема показателей качества при хонинговании цилиндров двигателей внутреннего сгорания, а также методы их измерения.

*Ключевые слова:* хонингование, методы измерения, параметры шероховатости, активный контроль, профилометр

В современном мире автомобиль является неотъемлемой частью жизни человека. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС), практически каждого автолюбителя, при капитальном ремонте проходит процесс хонингования. С первого взгляда этот процесс выглядит достаточно просто, однако, хонингование – это не просто микронеровности различного размера на поверхности цилиндра, а довольно непростой вид обработки со своими показателями.

Хонингование – вид абразивной обработки цилиндрических поверхностей, который позволяет устранять шероховатости на поверхности заготовок, корректировать их геометрическую форму и повышать точность их габаритных размеров, а при обработке цилиндров ДВС еще и получать требуемый угол хонинговальной сетки.

Говоря о шероховатости поверхности цилиндра при хонинговании многие специализированные мастерские, выполняющие такие услуги, оценивают качество работ визуально, либо на ощупь, ссылаются на свой опыт, что носит субъективный характер, а те мастерские, где есть профилометр, в основном ориентируются на такие показатели, как  $R_a$  и  $R_z$ . Но стоит сказать, что это довольно усредненные параметры, по которым не в полной мере можно оценить качество обработанного цилиндра ДВС. На исправную работу современных ДВС, их ресурс, расход топлива и масла влияют в большей мере другие показатели, такие как  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $R_k$ ,  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$ . На данные параметры в большей мере ссылаются всезарубежные, а также некоторые отечественные производители современных моторов. Расшифровка показателей шероховатости представлена на кривой Аббота-Файерстоуна (рис. 1).

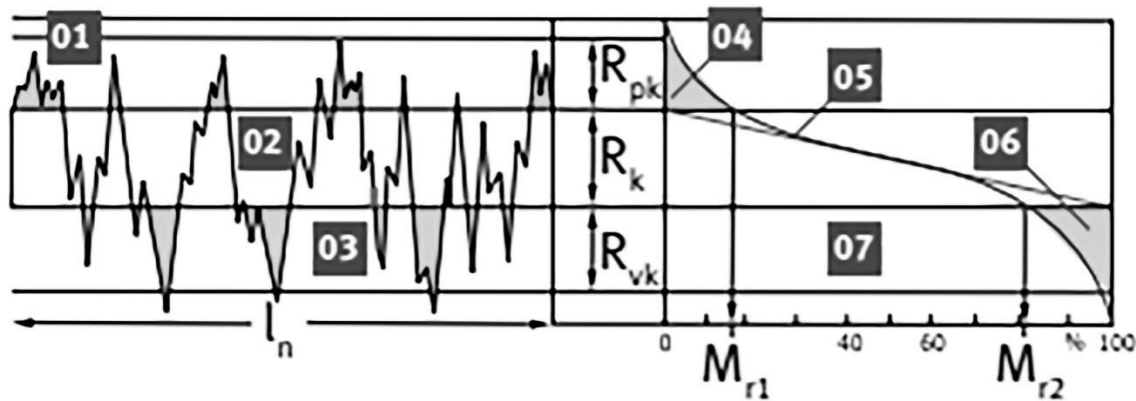


Рис. 1. Расшифровка показателей шероховатости на основе кривой Аббота-Файрстоуна

- 01 Приведённая высота пиков ( $R_{pk}$ );
- 02 Глубина сердцевины профиля ( $R_k$ );
- 03 Приведенная глубина впадин ( $R_{vk}$ );
- 04 Объем пиков ( $M_{r1}$ );
- 05 Кривая соотношения материалов (кривая Аббота-Файрстоуна)
- 06 Объем впадин ( $M_{r2}$ );
- 07 Соотношение материалов.

Для удобства анализа параметров шероховатости строится кривая Аббота-Файрстоуна. Кривая показывает профиль поверхности цилиндра.

Кривая Аббота-Файрстоуна была представлена Эрнестом Джеймсом Абботтом и Флэйдом Олберном Файрстоуном в 1933 году. Она обычно полезна при проектировании и производстве отверстий для поршневых цилиндров ДВС. Форма кривой определяется несколькими параметрами шероховатости поверхности, особенно семейством параметров  $R_k$ .

К основным параметрам кривой относятся:

6.  $R_{pk}$  – вершины, которые сносятся поршневыми кольцами в первые минуты работы двигателя после пуска (мкм);

7.  $R_k$  – средние значения параметров шероховатости, данная область обеспечивает основной ресурс эксплуатации двигателя (мкм);

8.  $R_{vk}$  – нижние значения параметров шероховатости, области с данными значениями показывают глубину маслоудерживающих канавок. Обычно закладываются с черновых операций (мкм);

9.  $M_{r1}$  – наименьшее соотношение материала (%);

10.  $M_{r2}$  – наибольшее соотношение материала (%).

Рекомендуемые показатели шероховатости цилиндров ДВС указаны в таблице 1.

Таблица 1

## Примерные рекомендуемые показатели шероховатости цилиндров ДВС

Измеренное значение	Единица	Рекомендуемое значение	
		Бензин/дизель легковой автомобиль	Дизельный внедорожник
Среднеарифметическая шероховатость $R_a$	мкм	0,15-0,40	0,30-0,50
Приведённая высота пиков $R_{pk}$	мкм	0,10-0,40	0,20-0,60
Глубина сердцевины профиля $R_k$	мкм	0,20-0,60	0,50-1,50
Приведенная глубина впадин $R_{vk}$	мкм	0,5-1,00	0,50-1,50
Наименьшее соотношение материала $M_{r1}$	%	4-12	4-10
Наибольшее соотношение материала $M_{r2}$	%	75-90	80-90
Угол хонингования $\alpha$	°	25-45	40-60

Методы измерения шероховатости и варианты оценки поверхности:

### 3. Микроскоп

Поверхность цилиндров может быть оценена визуально с помощью электронного микроскопа. При 200-кратном увеличении можно определить угол хонингования, глубину профиля, величину и расположение зерен графита.

### 4. Профилометр

Качество шероховатости поверхности цилиндра можно определить с помощью прибора под названием «профилометр». Профилометр для измерения микропрофиля поверхности цилиндров – это специальное устройство, которое используется для измерения микротопографии поверхности цилиндрических и плоских деталей. Измерение производится с высокой точностью и позволяет определить параметры микропрофиля поверхности.

Профилометры бывают разных типов контактные и бесконтактные, а также портативные с выносным механизмом измерения, который можно расположить прямо внутри цилиндра. Например, MITOTOYOSURFTESTSJ-210. Данный тип профилометров предпочтительней при измерении шероховатости цилиндров ДВС.

Для достижения требуемых параметров шероховатости и точных размеров цилиндра целесообразно производить хонингование на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ). Станок с ЧПУ, который имеет систему активного контроля и коррекции формы цилиндра позволяет автоматически управлять процессом финишной обработки для получения



требуемой геометрии размеров обрабатываемого цилиндра и шероховатости обрабатываемой поверхности. Так же позволяет контролировать и поддерживать заданные режимы обработки такие как: частота вращения шпинделя, давление на режущий инструмент (хонинговальный брусок), угол хонинговальной сетки и переход с основного режима обработки на чистовой режим для получения необходимой шероховатости поверхности стенки цилиндра. Например, Rottler (США), Sunnen(США) или станок AsgardHM15, разработанный компанией HONMASTERг. Уфа.

Таким образом, стоит сказать, что показатели  $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$  и  $R_a$  нужно считать основными показателями шероховатости при хонинговании цилиндров ДВС. Нужно отметить важность следования данным параметрам для достижения высокого ресурса цилиндра-поршневой группы ДВС, а так же необходимость периодического контроля качества микрорельефа поверхности цилиндра после обработки хонингованием такими приборами, как профилометр и микроскоп.

### Библиографический список

7. Кудояров, Р.Г. Влияние динамических сил на работу алмазных хонинговальных брусков / Р.Г. Кудояров // Станки и инструменты. – 2006. – № 7. – С. 33–35.

8. Кудояров, Р.Г. Повышение качества деталей при алмазном хонинговании / Р. Г. Кудояров // Станки и инструменты. – 2006. – № 5. – С. 35–37.

9. Кудояров, Р.Г. Повышение эффективности процесса алмазного хонингования отверстий деталей машин / Р.Г. Кудояров // Сб. статей междунаучно-техн. конф. «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы». – Волжский: Волжский инженерно-строительный институт филиал Волг-ГАСА. – 2001. – С. 130-133.

10. Куликов С.И. Прогрессивные методы хонингования / С.И. Куликов, Ф.Ф. Ризванов, В.А. Романчук, С.А. Ковалевский // -М.: Машиностроение, 1983. – 135 с. (40).

11. Dave, R. New process Simultaneously plates and honens parts quickly and economically / R. Dave // Machinery (USA). – 1972. – Vol. 78, № 9. – P. 37–41.

12. Buj-Corral I. Effect of grain size and density of abrasive on surface roughness, material removal rate and acoustic emission signal in rough honing processes / I. Buj-Corral, J. Alvarez-Flórez, A. Dominguez-Fernández // Metals 9(8). – 2019. – P. 850 (2.6.1 – [5])

© Халилов С.Ф., 2023

С.Е. КУЛЕШОВ

*kuleshovsemn@rambler.ru*

Науч. руковод. – д.п.н., проф. Л.К. МАЗУНОВА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*Аннотация:* В статье рассматриваются перспективы использования средств радиочастотной идентификации на производстве, приводится сравнительная характеристика технологий радиочастотной идентификации.

*Ключевые слова:* радиочастотная идентификация, RFID

Сложность производственных процессов, таких как например, производство авиационных двигателей и приборов, возрастает с каждым днем из-за повышающихся требований к уровню качества. Кроме того, сложность возрастает из-за нового оборудования и технологий, предлагаемых персоналу, начиная от станков и заканчивая электронным хранилищем данных. В последние годы активно разрабатываются новые системы радиочастотной идентификации (RadioFrequencyIdentification), определяющие местоположение, которые используют различные технологии Интернета вещей.

Основная цель этих новых технологий идентификации, применительно к производству – дать возможность персоналу и руководству точно определять местоположение и отслеживать активы или даже людей внутри производственного процесса. Среди других сценариев, в которых можно использовать радиочастотную идентификацию, можно выделить поиск оборудования и других устройств внутри склада, что часто является сложной и трудоемкой задачей, а также включение радиочастотной идентификации в систему пожарной сигнализации и противоаварийной защиты. Кроме того, концепция состоит в том, чтобы создать интеллектуальную систему вызова обслуживающего персонала для предотвращения аварийных ситуаций, которая сможет определить местонахождение ближайшего специалиста для оперативного устранения неисправностей. Это лишь несколько примеров того, как радиочастотная идентификация может улучшить внутренние функциональные возможности производства.

В литературе [1] предложены различные системы и технологии, и некоторые из них доступны на рынке для удовлетворения потребности в локализации внутри помещений, включая системы, использующие камеры или другие комбинации датчиков.

Наиболее перспективными беспроводными технологиями для высокоточной локализации внутри помещений являются WLAN, UWB, RFID, BLE, включая комбинации сGPS.

На рисунке 1 представлен обзор наиболее используемых беспроводных технологий локализации внутри помещений с некоторыми ключевыми параметрами, такими как дальность действия, точность и энергоэффективность при питании от батарей.

Технология	Точность	Дальность	Автономность
Wi-Fi	 < 15 m	 < 150 m	 days
BLE 4.2	 < 3 m	 < 75 m	 years
BLE 5.2	 < 1 m	 < 75 m	 years
UWB	 < 10 cm	 < 30 m	 weeks
RFID (passive)	 < 5 cm	 < 1 m	 N/A

Рис. 1. Сравнение технологий радиочастотной идентификации

Многие исследователи [1,2] изучали возможность использования беспроводной сети WLAN, в частности WI-FI, из-за того, что она широко распространена во всех зданиях и обладает большим радиусом действия, однако основными недостатками являются высокое энергопотребление системы, работающей от батареи, и не очень высокая точность обнаружения.

Благодаря сверхширокополосности и характеру технологии, решения, основанные на UWB, обеспечивают очень высокую точность менее 30 см в радиусе десятых долей метра – однако современные BLE-модули по-прежнему имеют слишком высокое энергопотребление, около 55 МВт, что снижает их использование в реальных проектах, где радиочастотной метке требуется работать месяцами с монетной батареей типа CR2032.

Radio Frequency IDentification (RFID) является наиболее широко используемой технологией для идентификации. RFID позволяет добиться очень низкого энергопотребления, поскольку многие метки могут работать даже без какого-либо источника питания. Более того, пассивные метки обеспечивают наиболее точную сантиметровую точность. RFIDметки обладают низкой стоимостью (порядка 1 доллара). Но радиус действия ограничен к небольшому диапазону менее 2 м, в то время как активные метки для расширения диапазона передачи требуют большого энергопотребления и больших антенн. Это не позволяет применять RFID для динамической идентификации положения.

Технология BluetoothLowEnergy (BLE) предлагает оптимальный компромисс между точностью, дальностью действия, энергопотреблением и доступностью во всех современных телефонах. Растущая доступность BLE-пеленгации приводит к созданию энергоэффективных, недорогих и более точных систем локализации.

Из вышесказанного следует, что направление радиочастотной идентификации является перспективным для различных отраслей производства, где есть необходимость точного определения местоположения ресурсов или людей. Используемая технология идентификации должна подбираться в соответствии с требованиями производства: точность определения местоположения объекта, дальность отметки и длительность автономной работы метки.

### **Библиографический список**

1. Fonseka, P.; Sandrasegaran, K. Indoor localization for IoT applications using fingerprinting. In Proceedings of the 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Singapore, 5–8 February 2018; pp. 736–741.
2. Cortesi, S.; Vogt, C.; Magno, M. Comparison between an RSSI and an MCPD-Based BLE Indoor Localization System. *Computers* 2023.

© Кулешов С.Е., 2023

## СЕКЦИЯ 2.4. СВАРОЧНЫЕ, ЛИТЕЙНЫЕ И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.74

Ж.Ф. ЗАРИФЖОНОВ

*zhavlon1@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, проф. О.Б. ДЕМЕНОК

*Уфимский университет науки и технологий*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОТЛИВКИ «ПЛИТА» В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ PROCAST

*Аннотация:* Для уменьшения времени разработки технологии на производстве достаточно эффективно применяют различные программы для моделирования литейных процессов. Рассмотрим, насколько эффективно можно применять программу ProCAST для моделирования напряженно-деформированного состояния отливки.

*Ключевые слова:* газотурбинный двигатель, термобарьерные плитки, литье, технология, оптимизация, моделирование, ProCAST

Изделия, входящие в состав газотурбинных установок, создаются из жаропрочных сплавов, которые несут очень большие механические и температурные нагрузки. Коробление считается одним из самых распространенных видов брака при производстве термобарьерной плитки. Процесс коробления термобарьерной плитки происходит в пределах высоких температур и зависит от большого числа факторов: химического состава сплава, геометрической особенности детали, технологических режимов предварительной прокали формы перед заливкой.

Для оптимизации процесса производства термобарьерной плитки активно применяется математическое моделирование литейных процессов. Одной из ведущих программ в этой области является ProCAST. Это мощное программное обеспечение предлагает широкий спектр возможностей для расчета и создания различных типов отливок, а также обеспечивает обширные данные моделирования, включая оценку напряженно-деформированного состояния отливок [1].

Давайте рассмотрим возможности модуля расчета напряжений в программе ProCAST на примере простой отливки – «Плитки» из Inconel 738, используя метод литья по выплавляемым моделям. При литье температура заливки металла составляет 1420°C, а начальная температура формы - 1000°C. Материал формы, который мы используем, - керамика.

Процесс моделирования литья в программном обеспечении ProCAST можно разделить на четыре этапа:

На первом этапе мы строим трехмерную геометрию в CAD-пакете и подготавливаем расчетную конечно-элементную сетку (рис. 1). Затем на втором этапе мы выбираем материалы, граничные условия и начальные условия процесса, а также задаем параметры для расчета. После этого мы запускаем расчет в программе ProCAST [2]. На четвертом этапе мы просматриваем и анализируем результаты расчета. Этот этап позволяет нам получить информацию о напряжениях, возникающих в отливке.

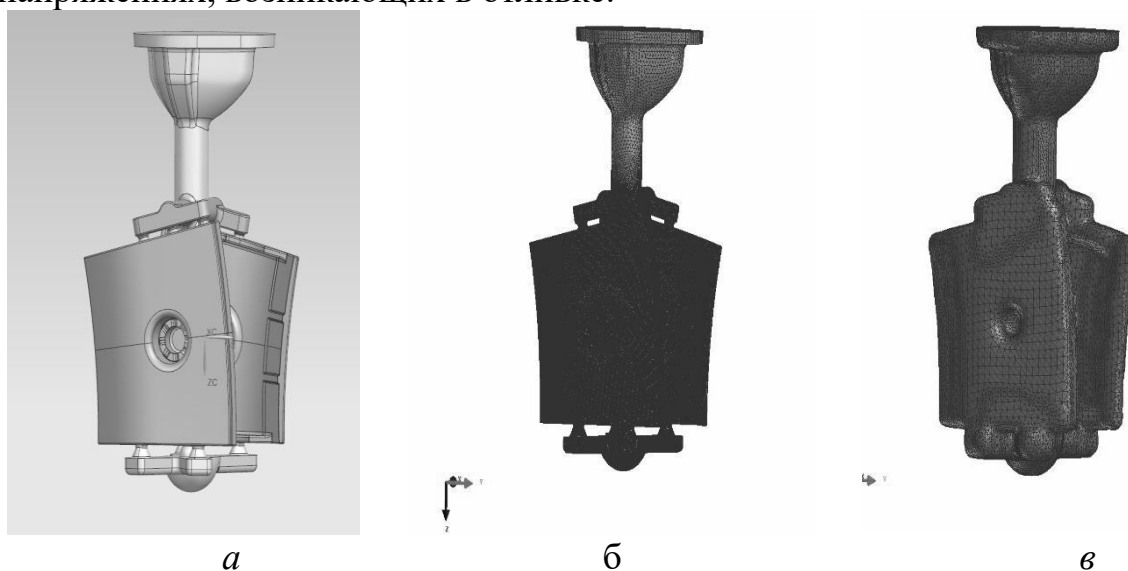


Рис. 1. Общий вид геометрии отливки и формы:

*а* – трехмерная модель отливки;

*б* – расчетная сетка отливки;

*в* – расчетная сетка отливки и формы

Оценка напряженно-деформированного состояния отливки позволяет определить наличие высокой концентрации напряжений в области соединения отливки и литниково-питающей системы (рис. 2).

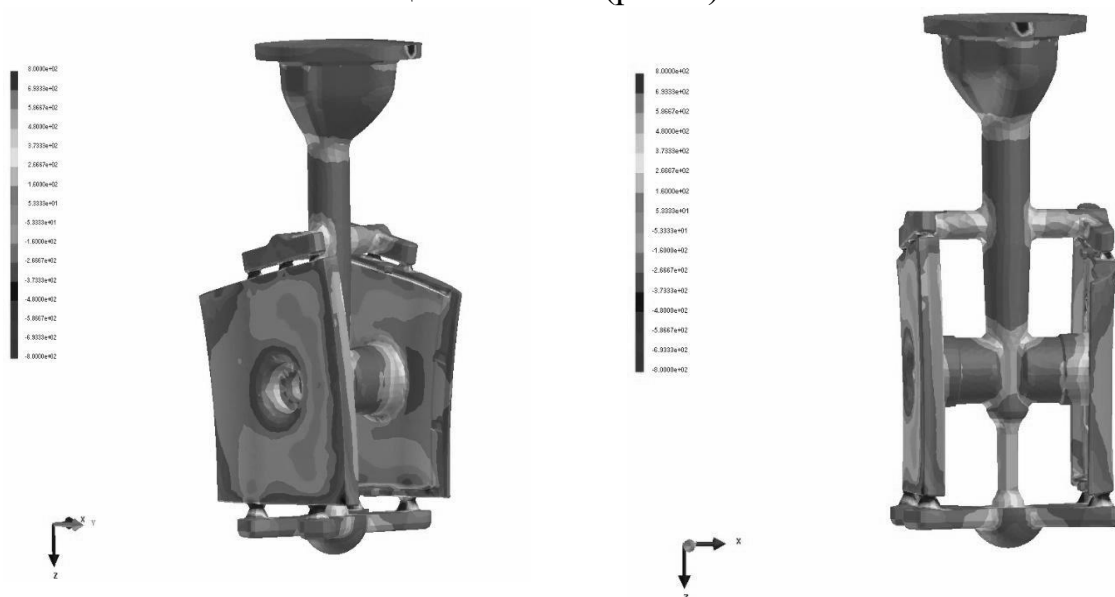


Рис. 2. Распределение средних нормальных напряжений отливки в форме

Эти напряжения обусловлены механическими факторами: при усадке отливка поднимается вверх, но форма создает препятствия для этого движения, что приводит к возникновению растягивающих напряжений в питателях [3].

Для определения возможных мест возникновения горячих трещин при кристаллизации отливки используется индикатор, показанный на рисунке 3. Этот индикатор отображает рост напряжений и помогает выявить потенциальные дефекты в отливке. В случае отливки "Плитка" горячие трещины образуются именно в питателях. Программа ProCAST позволяет моделировать процесс литья и выявлять основные дефекты, связанные с напряженно-деформированным состоянием, на этапе разработки технологии. Благодаря этому подходу значительно сокращается время, необходимое для разработки технологии, и экономятся ресурсы, поскольку создание опытных партий отливок становится необязательным для оптимизации процесса.



Рис. 3. Места образования горячих трещин в отливке

Таким образом, использование оценки напряженно-деформированного состояния и программы ProCAST в разработке технологии литья позволяет эффективно и точно выявлять потенциальные дефекты и оптимизировать процесс производства отливок. Это в свою очередь способствует повышению качества продукции и снижению затрат.

© Зарифжонов Ж.Ф., 2023

УДК 666.3

Р.Р. МУСТАЕВ

Науч. руковод. – ст. препод. Р.Р. ГАНИЕВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

*Аннотация:* Статья посвящена изучению аддитивных технологий на основе керамики. В тексте приводится небольшая информация об аддитивных технологиях, её видах и используемых керамических материалов. Мы так же рассмотрим особенности, основные преимущества и недостатки этих технологий.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, керамика, материалы, производство, 3D печать

Развитие и совершенствование вычислительной техники и 3D-моделирования позволило реализовать аддитивные технологии не только в создании прототипов и уменьшенных моделей, но и получении полноценных деталей и объектов которые ни чем не хуже реальных их прототипов по многим свойствам.

Повышенный интерес изучения аддитивных технологий заключается в том, что данная технология затронула многие сферы деятельности человека: культуру, здравоохранение, многие отрасли производства (включая производство керамических изделий). Последнее же косвенно и частично прямо затрагивает аддитивные технологии. Ведь некоторые технологии связанные с производством тех или иных деталей из керамики в чём-то имеют небольшую схожесть. Производство керамических изделий с помощью аддитивных технологий крайне не простое и имеет ряд своих особенностей, а именно: высокие температуры плавления керамики, высокие требования предъявляемые к готовому материалу (прочность, химическая инертность, пористость, и т.д.) [4][6].

### *Аддитивное производство*

Как и говорилось ранее «Аддитивное производство» – это процесс выращивание детали (или объекта) путём послойного нанесения сырья (материала) на изготавливаемый объект. Этот процесс непрерывный и требует намного меньше времени чтобы изготовить деталь и оценить специалистам визуально с точки зрения технически правильного решения, для последующего производства основных изделий на производстве.

Главной особенностью данного производства является её экономичность, по сравнению с другими видами производства, если сравнивать изготовления одних и тех же деталей [4].



Затрагивание тех или иных сфер жизни, делают аддитивное производство одним из популярных и востребованных в наше время технологий.

Виды аддитивных технологий использующих керамику как сырьё:

Стереолитография (SLA) – это технология является одной из первых и доступных технологий 3D печати. Для данной технологии характерна жидкое сырьё, керамика тоже может в виде сырья являться жидкой. Сырьё подается на специальную платформу, далее модель нарезается слоями и на её поверхность избирательно воздействует ультрафиолетовый свет, тем самым подвергая термической обработке сырьё и дальнейшему отверждению, после того как слой будет построен, все выше описанные действия повторяются и так до окончания процесса печати.

Так же к технологиям 3D печати с использованием жидкого сырья, можно отнести технологию Multi-Jet Modeling – его особенность от предыдущего заключается в том, что там применяется несколько сопел, которые так же выделяют и распределяют ультрафиолетовый свет по подаваемому материалу. После построения слоя, программа повторяет те же действия.

Robocasting – эта технология печати отличается от предыдущих двух технологий тем, что она использует увлажненные керамические пасты для изготовления слоёв вместо жидкого слоя. Стоит отметить, что керамическая паста экструдируется через сопло оборудования, тем самым попадая на поверхность предыдущего слоя и отвердевая при воздействии тепла через несколько секунд.

Одна из популярных и широко распространенных технологий аддитивного производства – это селективное лазерное спекание (SLA). Суть её заключается в использовании лазерного луча для спекания подаваемого керамического материала в виде порошка на стенки объекта слой за слоем.

Менее популярные и менее используемые с керамикой это технологии:

1) Лазерно-сетчатое проецирование (LENS) или лазерная обработка материала (LOM) – это процесс при котором подаваемый порошок на последующий слой полностью расплавляется под воздействием лазерного луча, в результате чего образуются плотные детали.

2) Трёхмерная печать (3DP) – этот аддитивный процесс связан с распылением жидкого биндинга в построенный порошковый слой используя струйную печатающую головку. Благодаря нанесению данным способом, слои затвердевают за счёт связующего и последующие слои выполняются аналогичным способом.

Ниже приведена обобщающаяся таблица по выше приведенным аддитивным технологиям которые в одного из сырья используют керамические материалы [1][3].

Таблица 1

Технологии аддитивного производства	Тип сырья	Способ создания слоя	Способ изменения фазы	Исходное сырьё
Стереолитография (SLA)	Смола	Лазерное сканирование	Фото-полимеризация	УФ-отверждаемая смола, керамическая суспензия
Multi-Jet Modeling	Полимер	Струйная печать	Фото-полимеризация	Акриловый пластик, воск, керамическая суспензия
Robocasting	Паста	Непрерывная экструзия	Удаление связующего	Керамическая паста
Селективное лазерное спекание (SLS)	Порошок	Лазерное сканирование	Частичное плавление	Термопласты, воски, керамические и металлические порошки

Используемое керамическое сырьё для разных видов аддитивного производства [2][5]:

Таблица 2

Материалы	Технологии				
	3DP	SLS	SLA	Material extrusion	LOM
Структурные керамики	ZrO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Ti <sub>3</sub> S <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> TiC-TiO <sub>2</sub> SiC	ZrO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> TiC- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiC SiSiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> SiC Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> / муллит/ZrSiO <sub>4</sub>	ZrB <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Муллит SiC Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ZrO <sub>2</sub> WC-ZrO <sub>2</sub> ZrC Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> SiC/C Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> TiC/Ni керамики, полученные из полимеров, SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - RO-стекло
Функциональные керамики	BaTi <sub>3</sub> PZT TiO <sub>2</sub>	PZT BaTi <sub>3</sub>	PZT SiCN Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe(C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )*2H <sub>2</sub> O	BaTiO <sub>3</sub> PZT PMN LiFePO <sub>4</sub> Li <sub>3</sub> Ti <sub>4</sub> O <sub>12</sub> BaZrO <sub>3</sub> ZnO TiO <sub>2</sub>	LZSA- стекло PZT
Биокерамики	Гидрокси- апатит	Апатит- муллит	HA HA-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> HA	HA, TCP

	(НА) ТСР, ТТСР ZrO <sub>2</sub>	НА- HDPE НА-РА BCP	ТСР	ТСР фосфор биостекла	
--	--	-----------------------------	-----	----------------------------	--

Преимущества и недостатки керамического сырья в аддитивном производстве:

1. Проблема при 3D печати. При нанесении керамической пасты на поверхность области построения появляются такие явления как:

а) Псевдопластичность – вязкость пасты понижается при увеличении сдвиговых напряжений.

б) Механическое удаление пузырьков воздуха из пасты в процессе нанесения нового слоя.

с) Сдвиговые напряжения в уже нанесенных слоях передающиеся от вновь наносимого слоя.

2. Проблемы при отжиге связки. Изделия с толстыми сечениями растрескиваются и нарушают свою структуру ещё на стадии термического удаления связки из тела. Остаточные мех.напряжения появляющиеся в органическом связующем в процессе полимеризации, приводит к разрушительному эффекту изделия еще во время самой 3D печати объекта.

3. Проблемы при спекании керамического материала. При моделировании и изготовлении изделий путём 3D печати, необходимо учитывать усадку изделия для получения необходимых и точных размеров детали. Особенно это нужно учитывать при изготовлении сложной формы.

4. Прочностные свойства детали на этапах печати и отжига полностью зависят от выбранного размера и формы исходного керамического сырья.

Конечно же все выше упомянутые проблемы решаются и уже некоторые научные сообщества имеют ряд своих решений:

1) Уменьшение остаточных напряжений путём равномерного распределения степени полимеризации и равномерного послойного распределения материала на предыдущие слои. Обязательно необходимо контролировать данные процессы.

2) Проблема возникновения трещин – это газы которые образуются при разложении связки которая находится в составе керамического сырья. Распределяя равномерно давление, можно избежать разрывов и трещин готовой детали.

3) Вероятность образования трещин – это быстрое охлаждение изделия. Необходимо равномерно и медленно охлаждать образец, для уменьшения возникновений напряжений и образования трещин.

4) Необходимость расчёта пористости и усадки готового изделия до начала его изготовления путём 3D печати. [4][6]

Преимущества использования аддитивных технологий с керамическим сырьем:

1. Возможность получения изделий с высокой относительной плотностью после спекания.

2. Возможность получения тонкостенных элементов, некоторые технологии например, SLA обладают высокой точностью построения.

3. в) Небольшое количество сырья для изготовления изделия, по сравнению с другими материалами.

4. г) Керамические материалы намного дешевле металлических и доступнее на рынке. [2][3]

И всё же если на конечный результат совокупности свойств изделия конечно же влияет подобранный основной состав, а данные преимущества и недостатки аддитивных технологий с использованием керамических материалов относятся так или иначе не ко всем существующим технологиям.

Имеет и место быть к научным исследованиям и разработкам в области 3D печати из керамического сырья, на сегодняшний день уже имеется достаточное количество полезных научных исследований и разработок для выбора керамики в виде сырья без сомнения.

Так как керамика имеет обширную область применения, аддитивные технологии будут дорабатываться и развивать новые методы получения изделий из керамики.

### **Библиографический список**

1. В.С. Глазунов, М.В. Черепанова «Применение аддитивных технологий в производстве керамических изделий» [Электронный курс] – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-additivnyh-tehnologiy-v-proizvodstve-keramicheskikh-izdeliy/viewer>

2. Керамические материалы для аддитивных технологий [Электронный курс] – URL: <https://extxe.com/3737/keramicheskie-materialy-dlja-additivnyh-tehnologij/>

3. Аддитивные технологии и аддитивное производство [Электронный курс] – URL: <https://extxe.com/5864/additivnye-tehnologii-i-additivnoe-proizvodstvo/>

4. М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина «Аддитивные технологии в машиностроении» Издательство политехнического университета Санкт-Петербург, 2013 – 210 с.

5. Современные материалы для аддитивного производства [Электронный ресурс] – URL: <https://viam.ru/review/5942>

6. Антонова В.С., Осовская И.И. Аддитивные технологии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2017. – 30 с.

© Мустаев Р.Р., 2023

УДК 621.791

В.С. НАЗАРОВА

*nvs11-12@yandex.ru*

Науч. руковод. – доктор техн. наук, доцент А.Ю. МЕДВЕДЕВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ И ЭФФЕКТИВНОГО КПД ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ КАЛОРИМЕТРИРОВАНИЯ**

*Аннотация:* В статье описан разрабатываемый метод оценки энергозатрат и эффективного коэффициента полезного действия (КПД) процесса роботизированной сварки листовых заготовок толщиной 2 мм из жаропрочного сплава на никелевой основе.

*Ключевые слова:* сварка роботом, жаропрочные никелевые сплавы, эффективный коэффициент полезного действия, калориметрирование

Длительное воздействие больших нагрузок и высоких температур, а также агрессивная рабочая среда узлов газотурбинных двигателей (ГТД), относящихся к горячей части, обуславливает частое применение для их производства жаропрочных сплавов на основе никеля. Однако, с увеличением жаропрочности, снижается возможность сваривания сплавов данной категории, увеличивается вероятность образования горячих трещин как в сварном шве, так и в околошовной зоне.

Эффективная энергия дуги является одной из главнейших характеристик процесса сварки и зависит от параметров режима сварки, она напрямую влияет на качество сварного шва, величину остаточных напряжений и, как следствие, деформацию свариваемой детали. Выбранный режим сварки условно энергоэффективен и не ведет к образованию внутренних и поверхностных дефектов. Значение эффективности тепловой дуги является расчетным, что ставит нас перед необходимостью применения опытного метода по расчету вложенных энергозатрат. Для оценки эффективного КПД дуги выбран метод калориметрирования.

Рассматриваемые образцы – пластины из сплава ЭП 718 толщиной 2 мм и размером 50×100 мм<sup>2</sup> с симметричной разделкой кромок под 30°.

Оборудование (рис.1) – сварочный полуавтомат *ESAB Aristo Mig 5000i*, подающий механизм *Aristo RoboFeed 3004w*, промышленный робот *IRB1600*.

Для проведения эксперимента выбран импульсный режим сварки при  $I_{ср}=70-75$  А и  $U_{ср}=16,5-17$  В [1],  $\eta_{и}=0,75$ [2].

Объем водяного калориметра выбран экспериментально, чтобы нагрев воды не превышал 5° С. Масса воды  $m_{в}$  определяется взвешиванием с контейнером перед каждым опытом.

$$m_B = m + m_K$$

(1)

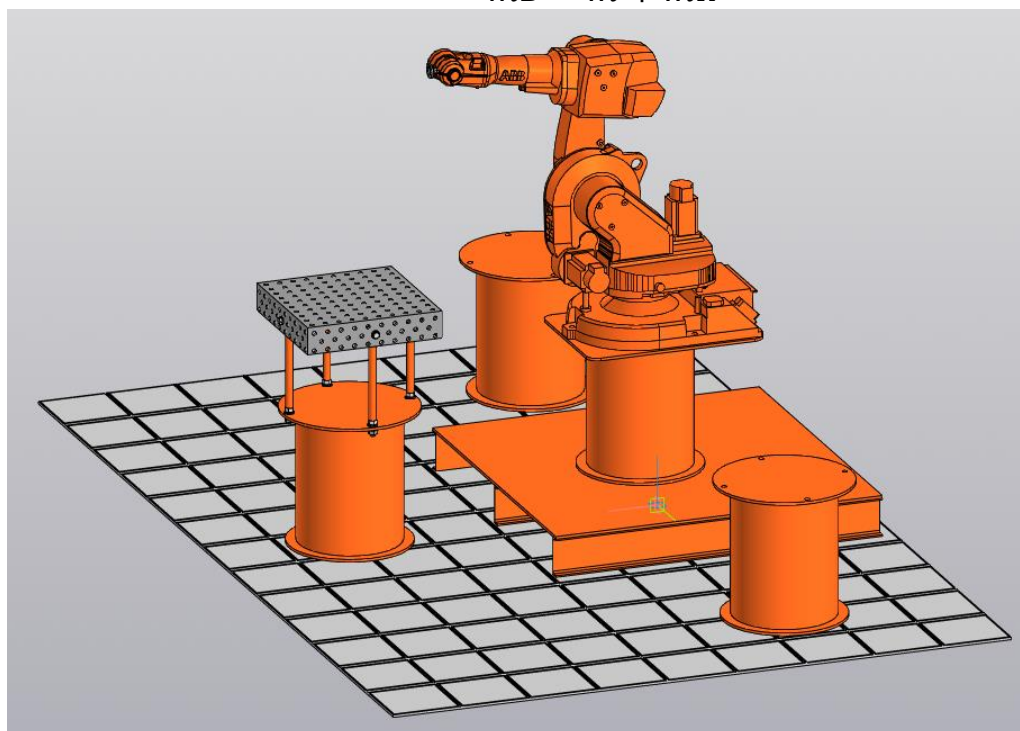


Рис. 1. Общий план опытного оборудования

Опытная модель водяного калориметра приведена на рис. 2.

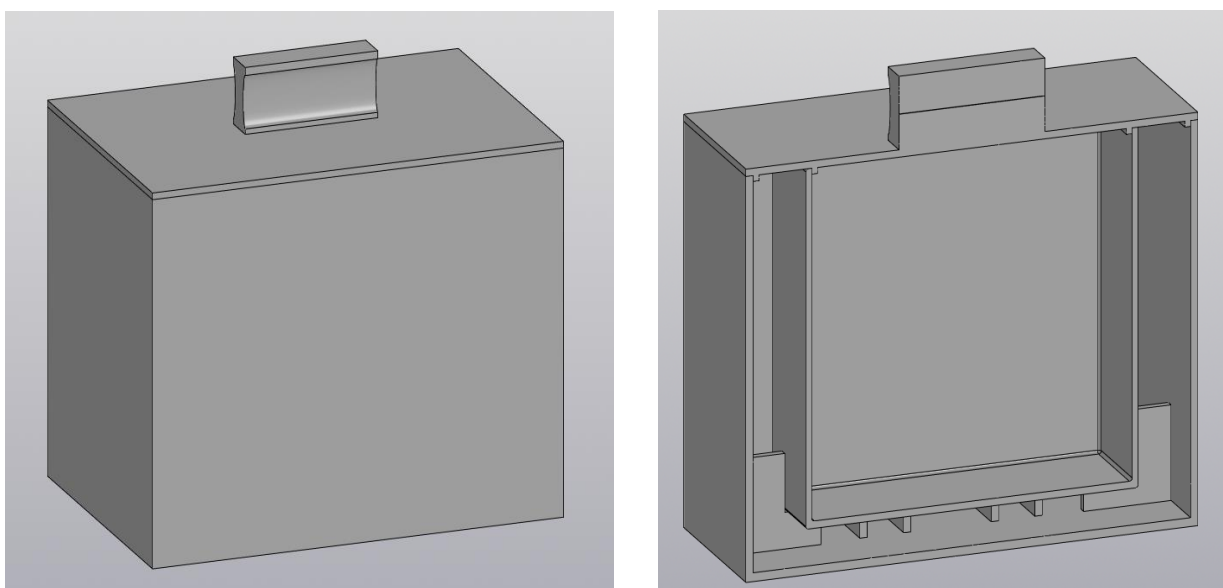


Рис. 2. Опытная модель водяного калориметра

Эффективная тепловая энергия дуги:

$$En = Q_{\text{в}} + Q_{\text{к}}, \quad (2)$$

где

$$Q_{\text{в}} = C_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} \cdot \Delta t_{\text{в}}, \quad (3)$$

$Q_{\text{в}}$  – теплота, потраченная на нагрев воды массой  $m_{\text{в}}$ , на температуру  $\Delta t_{\text{в}}$  с удельной теплотой нагрева  $C_{\text{в}}$ ;

$$Q_{\text{к}} = C_{\text{к}} \cdot m_{\text{к}} \cdot \Delta t_{\text{к}}, \quad (4)$$

$Q_{\text{к}}$  – теплота, потраченная на нагрев внутреннего контейнера калориметра массой  $m_{\text{к}}$ , с теплосодержанием  $C_{\text{к}}$  на температуру  $\Delta t_{\text{к}}$

$$Q_{\text{к}} = C_{\text{к}} \cdot m_{\text{к}} \cdot \Delta t_{\text{к}}, \quad (5)$$

Разница температур  $\Delta t_{\text{в}}$ :

$$\Delta t_{\text{в}} = t_1 - t_0, \quad (6)$$

где  $t_1$  – температура системы после выравнивания температур после получения сваренного образца;

$t_0$  – температура системы до погружения сваренного образца.

Для компенсации тепловых потерь в ходе калориметрирования предусмотрены быстросъемные зажимы, время после окончания сварки до погружения образца в калориметр - 15с [3][4].

По результатам проведения эксперимента производится сравнение заданных параметров сварки и данных, полученных регистрирующим оборудованием с полученными значениями эффективной тепловой энергии дуги.

### Библиографический список

1. Медведев А.Ю., Галимов В.Р., Никифоров Р.В., Туров А.В. Применение роботизированной сварки плавящимся электродом для сварки узлов газотурбинных двигателей толщиной 3 мм // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 45–50. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.2.05

2. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / В.М. Неровный [и др.]; под ред. В.М. Неровного. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 702 с.

3. Потапьевский А.Г., Райский Е.Е. Эффективная тепловая мощность дуги при сварке в углекислом газе // Автоматическая сварка, №8 (185), 1968.

4. Безбах Д.К. Эффективная тепловая мощность дуги при некоторых способах сварки плавящимся электродом // СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, № 3, 1967.

© Назарова В.С., 2023

УДК 621.791

В.К. ОРЛОВ

*valera.orlov526@gmail.com*

Науч. руковод. – доктор техн. наук, проф. А.Ю. МЕДВЕДЕВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ПОРООБРАЗОВАНИЕ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МЕТОДОМ WAAM**

*Аннотация:* При выращивании алюминиевыми сплавами часто возникают дефекты в виде пор. В данной работе рассмотрены механизмы их образований, определены основные области их локализации в выращиваемом изделии и предложены некоторые методы борьбы с ними.

*Ключевые слова:* WAAM; алюминий, выращивание, многослойная наплавка, валики, поры

WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – способ получения изделий путем многослойного электродугового наплавления сварочной проволоки. В современном производстве большую перспективу представляет внедрение многослойной наплавки (WAAM технология), которая позволяет сократить время изготовления относительно применяемых технологий литья, а также уменьшить потери материала в сравнении с технологиями точения и фрезерования. Кроме того, методы многослойной наплавки находят свое применение в технологии ремонта. [1]. Получение алюминиевых деталей методом WAAM позволяет сократить число технологических операций и трудоемкость, что напрямую влияет на стоимость конечного изделия. В реалиях санкционного режима западных стран спрос на аддитивные технологии и обратный инжиниринг активно растёт. Поэтому данный метод ввиду сравнительно низкой стоимости оборудования и расходуемых материалов имеет высокие потенциал роста и развития.

Методы аддитивного выращивания металлических изделий тесно связаны со сварочными процессами, в связи с этим материалы для 3D печати будь то сварочная проволока или металлические порошки подвержены схожим дефектам, что возникают при сварке. Одним из наиболее частых дефектов, возникающих при сварке и выращивании алюминиевых сплавов – являются поры. Они возникают ввиду резкого падения растворимости водорода при переходе металла из жидкого состояния в твердое. [2]

Цель данной работы – оценить локализацию образования пор при роботизированной многослойной наплавке алюминиевой проволокой диаметром 1 мм.



Было выращено три образца. Выращивание проводилось на режимах, указанных в таблице 1. В качестве материала применялась сварочная проволока ER-5183

Образец № 1:

Прерывание процесса наплавки до полного остывания образца производилось после каждого валика.

Образец № 2:

Прерывание процесса наплавки до полного остывания образца производилось после каждого пятого наплавляемого валика.

Образец № 3:

Прерывание процесса наплавки до полного остывания образца производилось после каждого третьего валика.

В дальнейшем, количество непрерывно наплавляемых валиков за один проход без прерывания процесса на остывание будем называть блоками.

Таблица 1

Режимы выращивания сварочной проволокой ER-5183

$I_{\text{ср}}, \text{А}$	$U_{\text{ср}}, \text{В}$	$V_{\text{н}}, \text{мм/с}$	$V_{\text{пп}}, \text{м/мин}$
75	16	20	7

Для выявления дефектов парообразования были изготовлены макрошлифы.

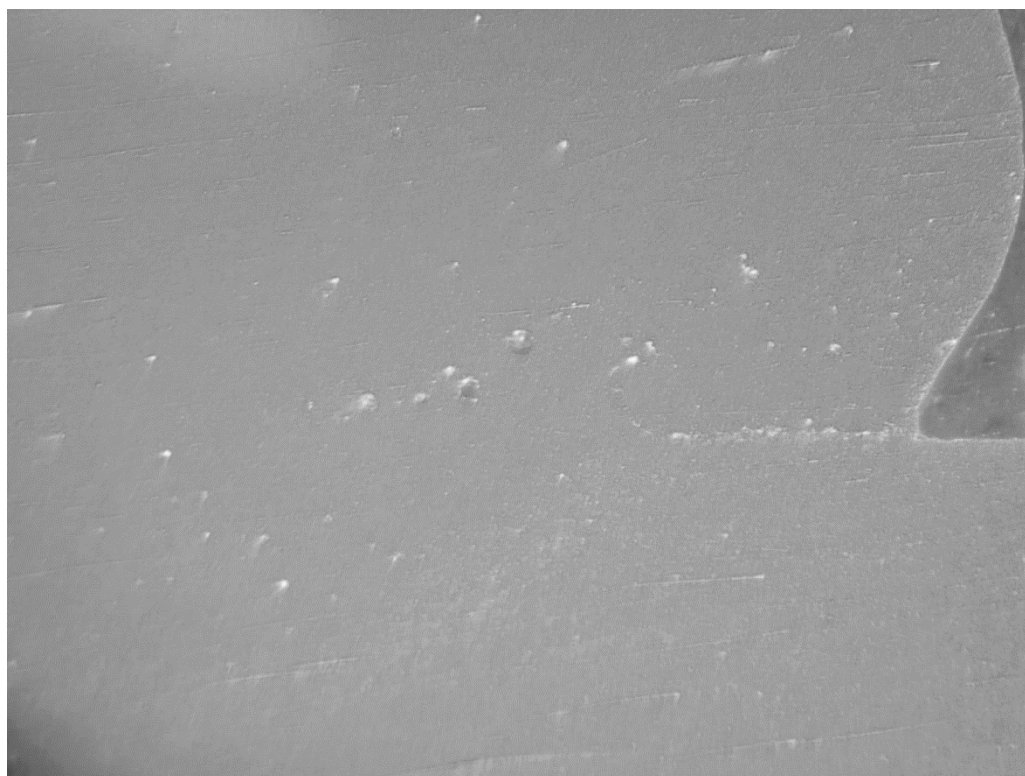
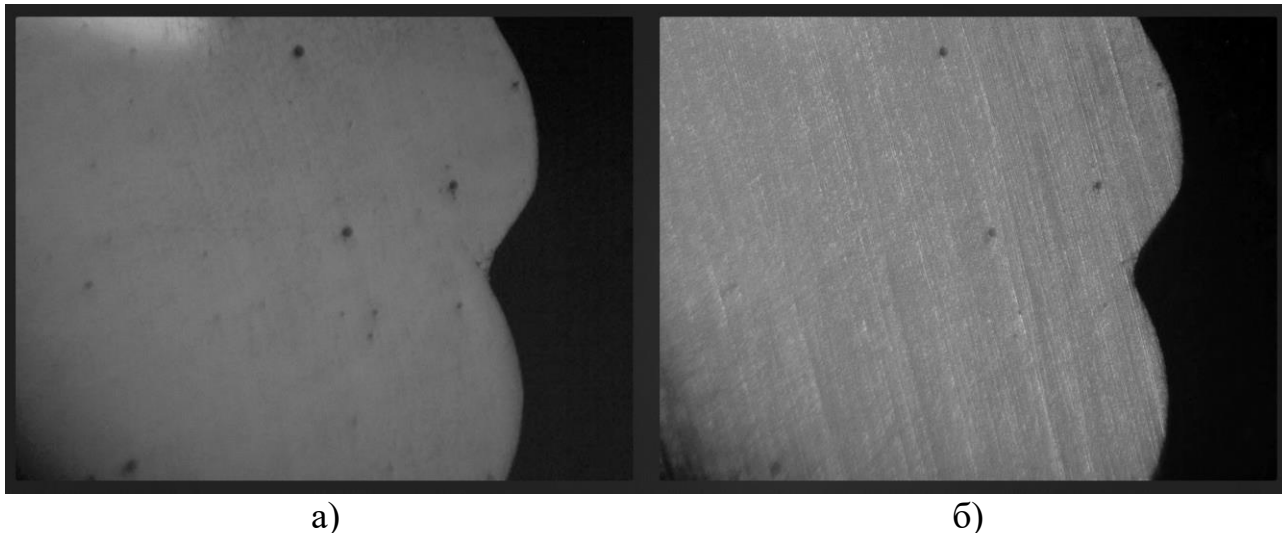


Рис. 1. Образец 2. Сплавление с подложкой

По результатам макроанализа установлено, что наибольшее количество пор образуется на границах сплавления металла с подложкой, что связано с

большим количеством адсорбированной влаги подложкой. А также повышенное количество пор встречается на границе сплавления между блоками, преимущественно ближе к границе металл-воздух, в следствии застывания газовых карманов не успевших удалиться из металла до его окончательного перехода в твердое состояние.



а)

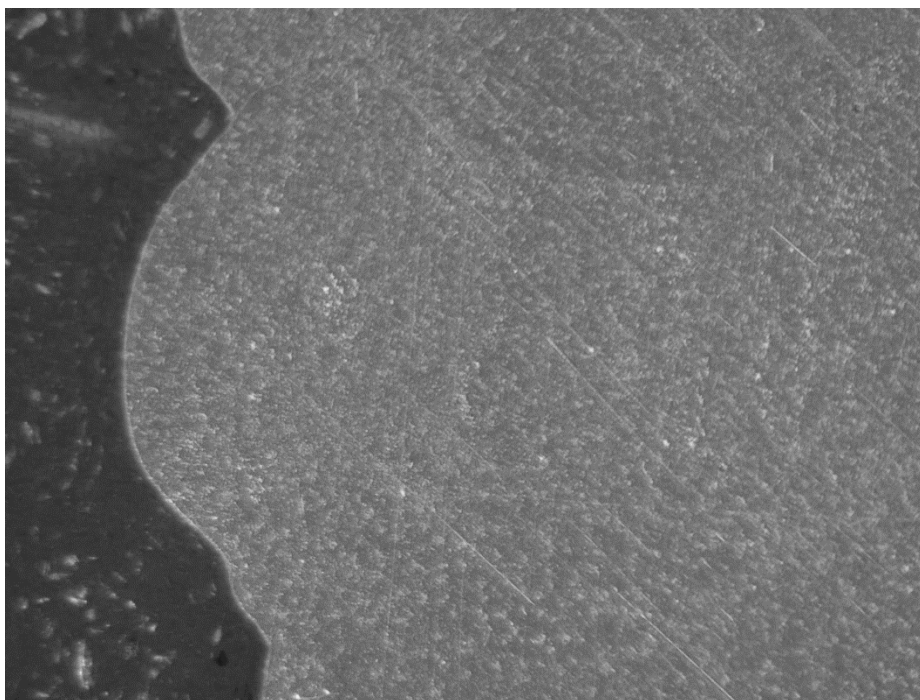
б)

*Рис. 2.* Образец 3 исследуемый методом:

*а)* темного поля в отраженном свете

*б)* светлого поля в отраженном свете

В качестве методов направленных на снижение пор в дальнейшем стоит учитывать дополнительный припуск на удаление изделия с подложки. Также в целях уменьшения пористости при проведении аддитивного выращивания методом WAAM, благосклонно сказываются: повышенная погонная энергия при выращивании слоев; повышенная межслойная температура начала выращивания нового слоя или сниженное время выдержки между последовательно выращиваемыми слоями [10].



*Рис. 3. Образец 1. Сплавление между блоками*

Для аддитивного производства нужно учитывать, что подложка будет выполнять функцию отвода тепла, снижая тем самым температуру наплавленного слоя. По мере увеличения расстояния между наплавленным слоем и подложкой данный эффект уменьшается. Таким образом, чтобы поддерживать заданную межслойную температуру, время выдержки между слоями должно постепенно увеличиваться по мере увеличения накопления тепла в образцах.

Установлено, что в основном, скопление пор наблюдается на границе сплавления с подложкой, а также повышенное количество пор встречается на границе сплавления между блоками, преимущественно ближе к границе металл-воздух. В данном исследовании изучался процесс полного остывания и не рассматривалось влияние неполного остывания образца на величину припусков. Необходимы дальнейшие исследования этого процесса, путем термометрирования и компьютерного моделирования.

### **Библиографический список**

1. Галимов, В.Р. Возможность применения современных аддитивных технологий для выращивания изделий из жаропрочных никелевых сплавов / В.Р. Галимов, Д.И. Мансуров. – 2022. – Т. 4, № 2(8). – С. 14-21. – DOI 10.54708/26587572\_2022\_42814. – EDN QVHWZO.

2. Федосеева Е.М., Ольшанская Т.В. Особенности порообразования в сварных соединениях алюминиевого сплава al-mg-li при сварке с присадочной проволокой амг-6 // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2022. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-poroobrazovaniya-v-svarnyh-soedineniyah-alyuminievogo-splava-al-mg-li-pri-svarke-s-prisadochnoy-provolokoy-amg-6>

3. Karan S. Derekar, Adrian Addison, Sameehan S. Joshi, Xiang Zhang, Jonathan Lawrence, Lei Xu, Geoff Melton, David Griffiths. Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium; The International Journal of Advanced Manufacturing Technology; Received: 5 September 2019 /Accepted: 17 January 2020; <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04946-2>

© Орлов В.К., 2023

УДК 54.03

В.М. ПРЯГАЕВ; И.И. ХАЙРУЛЛИН

*pryagaevvadim@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О.Б. ДЕМЕНОК

*Уфимский университет науки и технологии*

### **ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ СПЕКАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОКОРУНДА**

*Аннотация:* В данной статье рассматривается влияние температуры спекания на прочность керамических стержней, изготовленных на основе электрокорунда с добавкой карбида кремния в качестве катализатора спекания. Представлены результаты исследования прочности и микроструктуры.

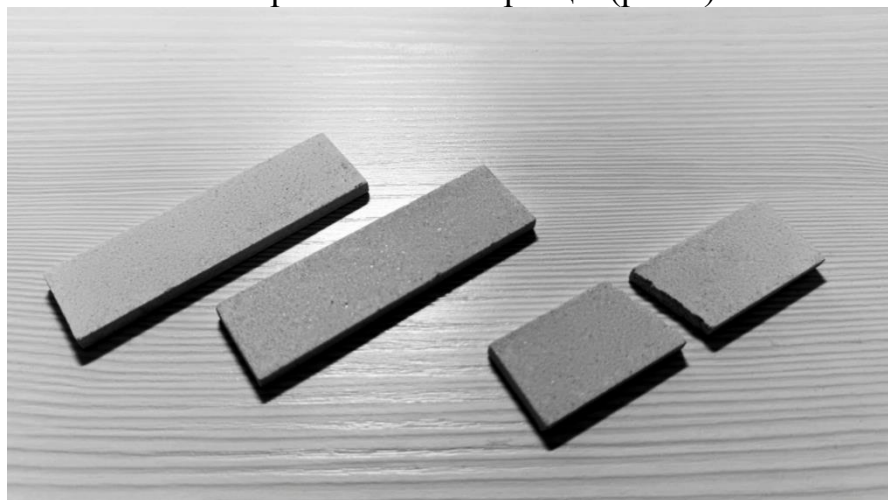
*Ключевые слова:* керамический стержень; спекаемый керамический стержень; прочность; электрокорундовая керамика; микроструктура; оптимизация производства, испытание на прочность

В литейном производстве стержни используются для формирования внутренних полостей отливки, вследствие чего к их материалам возникают повышенные требования к жаропрочности и жаростойкости, так как во время заливки металла большая часть поверхности стержня имеет контакт с расплавом. Для выше поставленных требований хорошо подходит электрокорундовая керамика. Она обладает достаточной прочностью и инертностью при высоких температурах, что идеально для литья жаропрочных сплавов.

Изготовление керамических стержней на основе электрокорунда представляет из себя распространённый технологический процесс – спекание керамической массы. Основная технологическая трудность при спекании корундовой керамики – высокотемпературный обжиг до 1800 °С и высокая твердость корунда, который является абразивным материалом. Температура обжига изделий из корунда технической чистоты ( $A_2O_3$  99–99,5%) и дисперсностью 1-2 мкм без введения интенсифицирующих спекание добавок находится в пределах 1710–1750°С. [1]. Введение примесей существенно

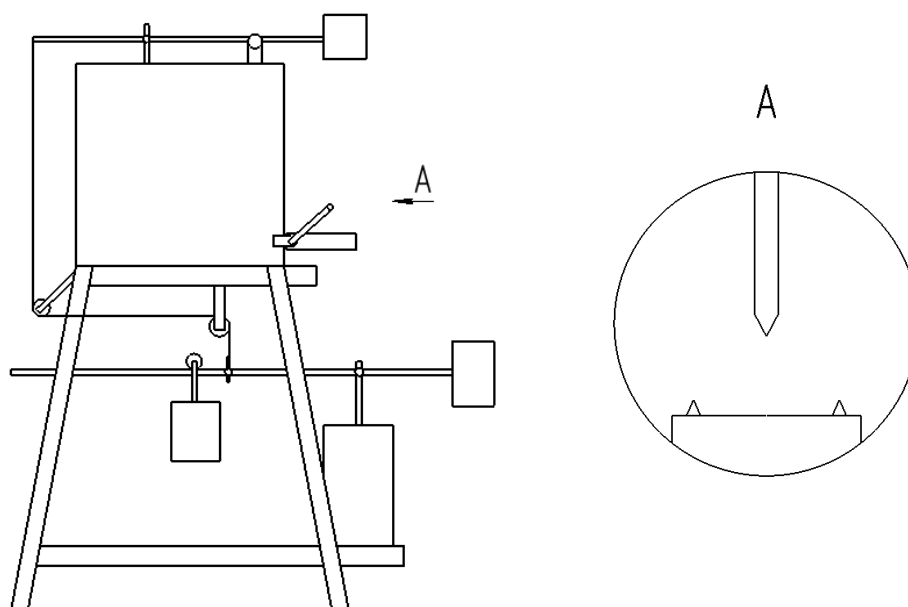
снижает температуру спекания, чем в производстве зачастую и пользуются. Вводят карбиды и оксиды металлов, которые влияют на физические свойства с положительной стороны, в следствие чего удаётся снизить температуру спекания приблизительно до 1400 °С.

Для определения зависимости прочностных характеристик от температуры спекания были изготовлены керамические образцы (рис.1).



*Рис. 1.* Образцы электрокорундовой керамики для проведения испытаний на прочность:  
– слева образцы до испытаний  
– справа образец после испытаний

Для проведения эксперимента используют стенд для проведения испытаний на изгиб с последующим разрушением (рис. 2).



*Рис. 2.* Стенд для проведения испытаний на изгиб с последующим разрушением

Стенд представляет собой печь подогрева с установленным пуансоном внутри. Силу измеряют путём вычисления передвижения груза по рычагу, в

следствии чего возникает эксцентриситет сил и через систему рычагов и тросов усилие передаётся на пуансон [2]. Такая схема позволяет постепенно увеличивать нагрузку на образец до момента его разрушения.

Метод испытания заключается в приложении перпендикулярно к поверхности прямоугольного образца, расположенного на двух опорах. Таким образом мы можем узнать при какой силе сломался образец.

После проведения серий испытаний был построен график зависимости температуры спекания керамических стержней с прочностью на изгиб (рис. 3).

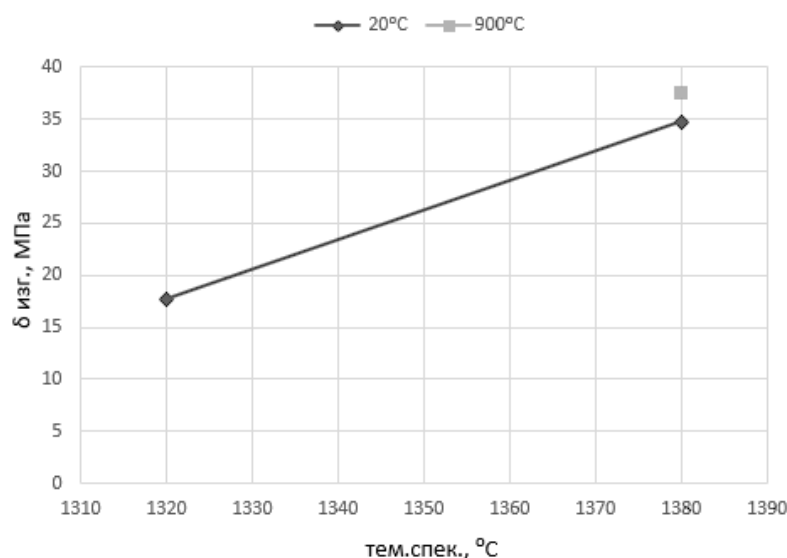
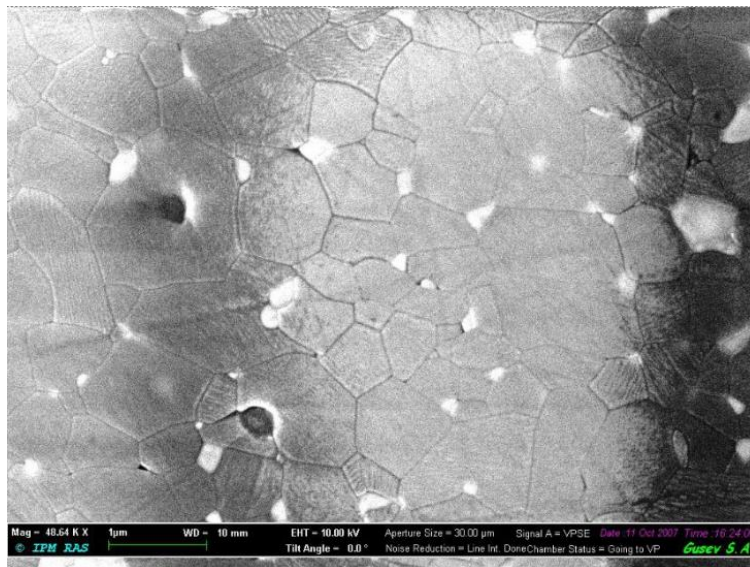


Рис. 3. График зависимости прочности от температуры спекания

На рис. 3 можно заметить, что образцы, спеченные при 1320 °C обладает значительно более низкой прочностью чем при 1380 °C. Это обуславливается тем, что при спекании на более высоких температурах оплавление границ зерен происходит более интенсивно и увеличивается площадь сплавления с соседними зернами и как следствие, увеличивается прочность.

Также было проведено испытание при повышенных температурах... (900 °С отмечен квадратом на Рис. 3). Прочность оказалась выше из-за того, что с повышением температуры повысилась пластичность материала и увеличился прогиб, вследствие чего груз на установке (рис. 2) смог пройти большее расстояние и приложить большее усилие, чем на испытании при 20 °С.



*Рис. 4.* Снимок микроструктуры образца, сделанного из электрокорундовой керамики [3]

На данном снимке (рис. 4) можно заметить высокую плотность структуры что должно положительно сказаться на прочностных характеристиках стержней.

Таким образом можно сделать вывод о том, что температура спекания оказывает значительное влияние на прочность керамических стержней, а благодаря полученным данным можно избежать лишних издержек на прогрев путём подбора температуры спекания на нужную прочность стержня.

### **Библиографический список**

1. Технология керамики для материалов электронной промышленности: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А.С. Толкачева, И.А. Павлова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019.– 124 с.
2. Материалы и свойства разовой литейной формы: Лабораторный практикум по дисциплине «Технология литейного производства» / Уфимск. гос. авиац. техн.ун-т; сост. О.Б. Деменок, А.О. Деменок, И.Р. Мухамадеев, П.В. Аликин. – Уфа, 2015. – 55 с.
3. URL: <https://studfile.net/preview/14964329/>

© Прягаев В.М.; Хайруллин И.И., 2023

УДК 621.791.14

И.Ф. ХУЗИЕВ

*il.khuziev@ya.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. А.В. ЯХИН

*Уфимский университет науки и технологий*

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ МАШИНЫ СВАРКИ ТРЕНИМ МСТ-35**

*Аннотация:* Сварка трением является эффективным процессом соединения материалов, который обеспечивает прочное соединение без использования добавочного материала. В этой статье рассматривается два основных процесса сварки трением – ротационная и инерционная сварка трением. Они отличаются по оборудованию и циклограммам процесса, что ограничивает возможности перехода от одного процесса к другому на уже существующих станках.

*Ключевые слова:* сварка трением, ротационная сварка трением, инерционная сварка трением, система управления, моделирование, оборудование

Требования к повышению производительности, эффективности и качества современных изделий машиностроения, при изготовлении которых используются сварочные технологии, и в частности сварка трением, определяют новые требования к сварочной индустрии. И поиск решений по модернизации технологического оборудования, обеспечивающего его оптимальную эффективность, в рамках усиливающейся санкционной политики в отношении России, является актуальной задачей.

Сварка трением — это современный и эффективный метод соединения металлических заготовок. Он основан на использовании трения и давления для создания сильной молекулярной связи между соединяемыми поверхностями. Сварка трением позволяет достичь высокой прочности и герметичности соединений без необходимости дополнительных добавок или расплавления металла.

Сваркой трением можно сваривать материалы, соединяемые сваркой плавлением (углеродистые стали – Ст3, Низколегированные стали – 09Г2С, 16ГС), так и трудно свариваемые и не свариваемые плавлением материалы (нержавеющие стали – 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, алюминиевые сплавы с повышенной прочностью и жаростойкостью – Д16, АЛ9, инструментальные стали – Р6М5, титановые сплавы – ВТ5Л, ВТ20, медь и ее сплавы – Л96, ЛА77-2), а также сваривать разнородные сочетания материалов (алюминий-медь, сталь-титан, никель-титан, конструкционные и инструментальные стали, алюминий-титан и т.д).

Учитывая многообразие различных способов сварки трением (рисунок 1), в рамках данной работы, акцентируем внимание на широкораспространенных в



производстве способах сварки трением: ротационной (с непрерывным трением) и инерционной.



Рис. 1. Классификация способов сварки трением

Основными параметрами ротационной сварки трением показанные на рисунке 2, являются:  $P$  – Давление нагрева и проковки;  $S$  – осадка;  $\omega$  – частота вращения;  $M_T$  – среднее значение момента трения.

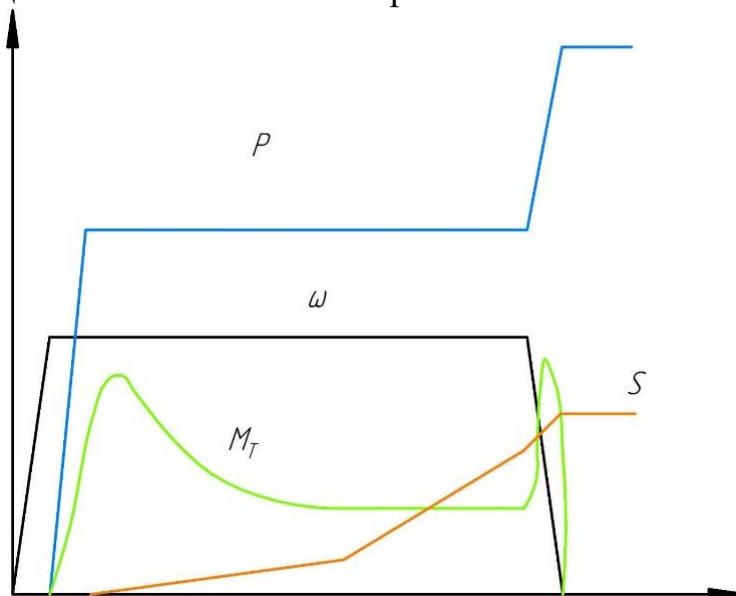


Рис. 2. Параметры сварочного процесса ротационной сварки трением

При данном способе сварки трением нагрев свариваемых деталей осуществляется непосредственно прямым приводом, то есть при сварке двигатель передает крутящий момент постоянно, это видно по циклограмме сварке по показателю  $\omega$ .

В инерционном способе сварки трением основными параметрами процесса являются:  $P$  – Давление нагрева и проковки;  $\omega$  – частота вращения;  $M_T$  – среднее значение момента трения. Параметры схожи с ротационной сваркой трением, но циклограмма и показатели (рисунок 3) отличаются.

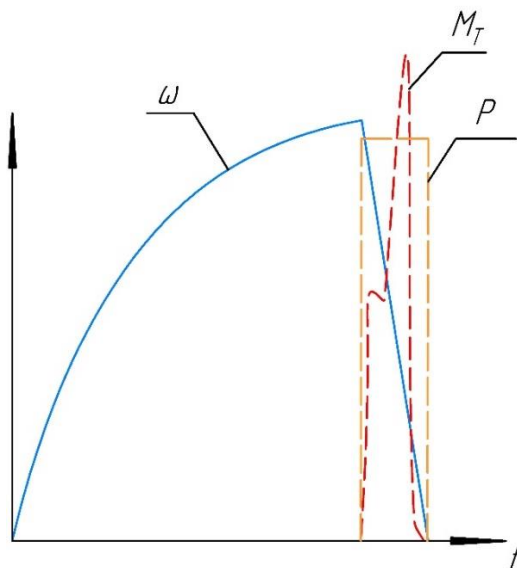


Рис. 3. Параметры сварочного процесса инерционной сварки трением

Из рассмотренных циклограммам процессов сварки видно, что при инерционной сварке частота вращения нарастает постепенно и плавно. В свою очередь в момент соприкосновения деталей возрастает момент трения, давление нагрева и проковки.

Процесс ротационной сварки трением характеризуется, тем что частота вращения весь процесс идет равномерно, при этом давление проковки и момент трения возрастают независимо от частоты вращения.

Выделяются следующие положительные особенности инерционной сварки трением:

- машины инерционной сварки требуют меньше электроэнергии по сравнению с машинами ротационной сварки, однако они обладают большей производительностью благодаря малому времени сварки;

- температуры в сварном шве достигают максимальных значений только на очень короткий промежуток времени, что создает условия, затрудняющие образование хрупких интерметаллидных фаз при сварке различных материалов.

Таким образом отметим, что при всей схожести кинематических схем машин ротационной и инерционной сварки трением имеются существенные отличия, такие как принципиальная схема работы, массо-габаритные показатели и, ключевое, затрачиваемой энергии на сварку. Сварка трением на инерционных машинах достаточно затратный процесс.

В целях реализации поставленной задачи по модернизации существующего технологического оборудования, в порядке исследовательских работ, оптимальным стало решение по разработке системы управления для машины ротационной сварки трением.

Цель работы состоит в разработке системы управления к уже имеющейся машине для ротационной сварки трением модели МСТ-35. Разработка осуществляется под проектом «Разработка станка ротационной сварки трением». В рамках реализации проекта необходимо разработать систему управления, которая будет производить ротационную сварку и позволит моделировать инерционную сварку.

Для разработки электронной системы управления машины сварки трением МСТ-35 формируется техническое задание, основными пунктами которого являются:

- 1) создание интерфейса управления;
- 2) возможность регулировки параметров сварки;
- 3) возможность автоматического анализа и оптимизации данных.

Исходя из перечисленного, системе управления необходимо собирать, отображать и сохранять информацию параметров сварки (скорость вращения двигателя, время сварки, давление в пневмогидравлической системе), а также иметь возможность загрузки и отображения ранее сохранённых параметров.

Рисунок 4 отражает принципиальную схему модернизации машины сварки трением МСТ-35. На схеме представлены основные датчики, которые должны считывать необходимые параметры от их исполнительных устройств.

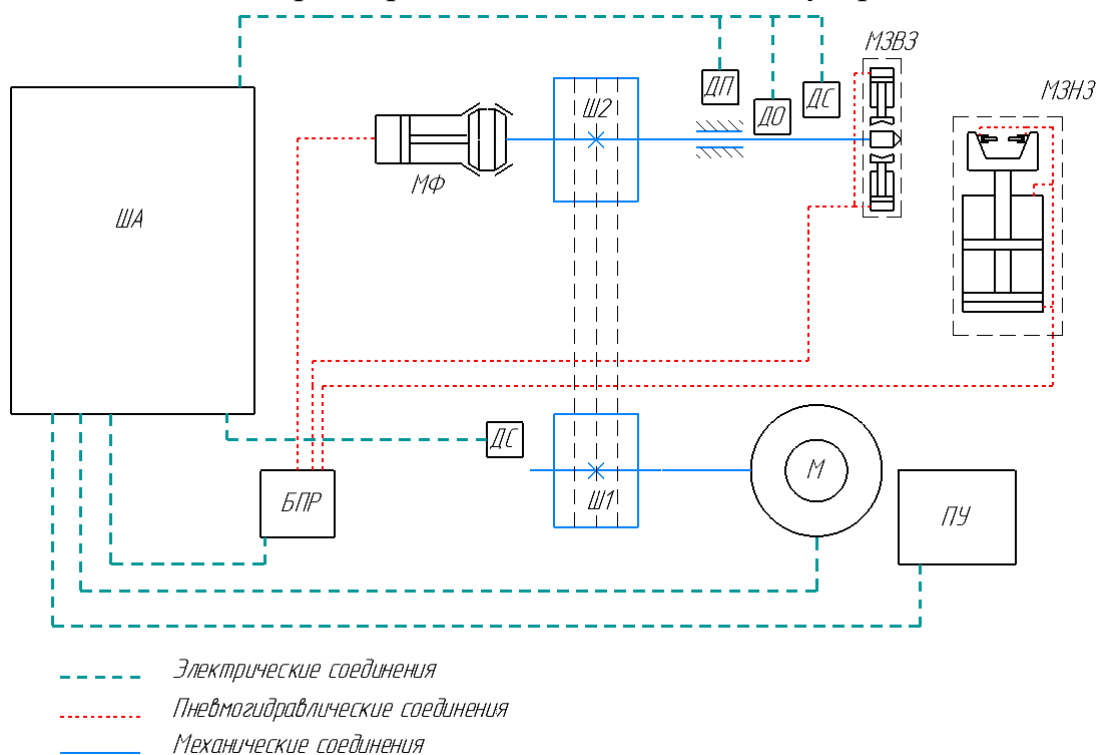


Рис. 4. Принципиальная схема машины сварки трением МСТ-35:

ША – шкаф автоматики; БПР – блок пневмораспределителей; ДС – датчик скорости вращения; Ш1-2 – шкивы электродвигателя и вала передней бабки;

М – электродвигатель; ПУ – пульт управления; МФ – муфта тормозная фрикционная; ДП – датчик усилия проковки; ДО – датчик осевого перемещения (осадки); МЗВЗ – механизм зажима вращающейся заготовки; МЗНЗ – механизм зажима неподвижной заготовки

Таким образом реализация проекта по разработке системы управления и набора данных датчиков позволит, кроме модернизации существующей машины ротационной сварки трением, имитировать на ней процессы инерционной сварки трением и обрабатывать режимы сварки.

### **Библиографический список**

1. Вилль, В.И. Сварка металлов трением [Текст] / В.И. Вилль – 1. – Ленинград: Машиностроение, 1970. – 176 с.
2. Лебедев, В.К., Черненко, И.А. Сварка трением [Текст] / В.К. Лебедев, И.А. Черненко – 1. – Ленинград: Машиностроение, 1987 – 236 с.
3. Яхин А.В., Удалова Е.А. Сварочные технологии в нефтегазовом машиностроении. – Уфа.: Нефтегазовое дело, 2022. С.131.
4. Медведев, А.Ю. Перспективы применения сварных сталетитановых конструкций в авиационном двигателе / А.Ю. Медведев, В.Р. Галимов // Materials. Technologies. Design. – 2021. – Т. 3, № 2(4). – С. 13-19. – DOI 10.54708/26587572\_2021\_32413.

© Хузиев И.Ф., 2023

УДК 621.74

Э.И. ШАФИЕВА

*Shafieva2002elina@gmail.com*

Науч. руковод. – ст. препод. И.И. ШАЙХУТДИНОВА

*Уфимский университет науки и технологий*

### **ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТЛИВОК ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

*Аннотация:* В статье рассматривается метод литья отливок из магниевых сплавов с применением цифровых технологий. Описаны преимущества применения магниевых сплавов при изготовлении отливок современными методами литья.

*Ключевые слова:* Магниевые сплавы; цифровые технологии; отливка; деталь

Литьё в песчано-глинистые наиболее широко распространенный метод литья, применяемый в машиностроении, на долю которого приходится 60-90% общего объема производства литых заготовок. В зависимости от вида сплава, массы и габаритов отливки, а также от типа производства применяют сырые, сухие или подсушенные песчано-глинистые формы. В массовом производстве обычно используются сырые формы.

Сущность получения отливок заключается в том, что расплавленный и перегретый сплав заданного состава заливается в литейную форму, внутренняя полость которой с максимальной. После охлаждения металл затвердевает и в твердом состоянии сохраняет контур полости, в которую он был отлит. Большинство существующих технологий обработки металлов включают этап получения литой заготовки (слитка). Отсюда следует, что наиболее эффективной является литейная технология, позволяющая получать изделия необходимой конфигурации, размеров и свойств непосредственно из расплава с минимальными затратами энергии, материалов и труда.

Перспективность литейной технологии обуславливается также универсальностью, позволяющей получать изделия из сплавов практически любого состава, в том числе из труднодеформируемых, массой от нескольких граммов до сотен тонн, с размерами до десятков метров.

Для литья в песчано-глинистые формы предпочтительно применять магниевые сплавы, так как отливки из магниевых сплавов характеризуются высокой точностью размеров и хорошей чистотой поверхности, что почти исключает их обработку резанием. Однако, из-за наличия грубозернистой литой структуры литейные сплавы в сравнении с деформируемыми имеют более низкие как прочностные, так и пластические свойства

Магниевые сплавы имеют меньшую плотность и, следовательно, более высокую удельную прочность.

Магниевые сплавы широко используются в самолетостроении (корпуса приборов, насосов, коробок передач, двери кабин и др.), ракетной технике (корпуса ракет, обтекатели, топливные и кислородные баки, стабилизаторы), конструкциях автомобилей, прежде всего, спортивных (корпуса, колеса и др.), в приборостроении (корпуса и детали) как материалы с высокой удельной прочностью и низкой плотностью, а также в атомной технике - как материалы с малой способностью к поглощению тепловых нейтронов.

Более высокими технологическими и механическими свойствами при комнатной и повышенных температурах обладают сплавы магния с цинком и цирконием (МЛ12, МЛ15), а также сплавы, дополнительно легированные кадмием (МЛ8), РЗМ (МЛ9, МЛ10). Высокопрочные литейные сплавы применяют для нагруженных деталей самолетов и авиадвигателей: корпусов компрессоров, картеров, ферм шасси, колонок управления и др.

Преимущества данного метода литья универсальность способа, что позволяет отливать изделия любых габаритов самых сложных конфигураций – из различных сплавов, в том числе из тугоплавких и труднодеформируемых, с массой от нескольких граммов до сотен тонн. Относительно низкая стоимость исходных материалов литейных форм. Малые сроки подготовки производства.

Недостатками являются низкая производительность труда, неоднородность состава и пониженная плотность материала, возможны раковины. Перспективным является применение в литейном деле полуавтоматов и автоматов, робототехнических комплексов, новых технологий литья из

легированных сталей и т.д. стоимость литья зависит от объемов производства, уровня механизации и автоматизации технологических процессов.

Современное развитие науки и техники требует 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).

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.

### **Библиографический список**

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. Трухов А.П. (2005) Технология литейного производства: Литье в песчаные формы. 515 с.
3. ГОСТ 2581-78. Сплавы магниевые в чушках. Технические условия.
4. 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.
5. ГОСТ 804-93. Магний первичный в чушках. Технические условия.
6. Практикум по дисциплине «Технология литейного производства». / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; сост. А.С. Челушкин – Уфа: УГАТУ, 2009. – 38 с.

7. Практикум по дисциплине «Технология литейного производства» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; сост. О.Б. Деменок.

8. Бидуля П.Н. Технология литейного производства. Metallurgizdat, 1956.

© Шафиева Э.И., 2023

УДК 621

А.Р. ЮСУПБАЕВ

*ainur20012711@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент О.Б. ДЕМЕНОК

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ НА ПРОЧНОСТЬ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ ЛИТЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Аннотация:* В статье приведено краткое изложение проведенных экспериментов и приведен анализ результатов прочности и пористости стержня в зависимости от давления прессования.

*Ключевые слова:* керамика, огнеупоры, стержневая смесь, пористость

### **Некоторые требования к стержням**

Высокое качество поверхности (шероховатость Ra 0,5 и менее); геометрическая точность (отклонение  $\pm 0,15$  мм); изгибная прочность (15÷30 МПа), пористость (30 % и более) и стойкость к термическим ударам до температур 1250÷1300°C [1]. Стержни должны выдерживать гидравлические и температурные нагрузки при заливке формы металлом без деформации. Температура начала деформации 0,4 МПа должна быть выше 1450°C и соответствовать условиям заливки металлом [1].

На данный момент перед наукой стоит проблема поддержания необходимой прочности стержней, при появлении новых отливок с меньшими толщинами стенок.

### **Изготовление образцов**

Образцы изготавливались из смеси, приведенной в таблице 1 и 2, по типовой технологии для стержней на основе электрокорунда. Образцы прокаливались по режиму:

- подъем температуры от 20 до 600 °C со скоростью 50 °C в час;
- подъем температуры от 600 до 1320 °C со скоростью 200 °C в час;
- выдержка короба с образцами при температуре 1320 °C в течение 9 часов.

Перед испытанием образцов на прочность, они были обозначены пастой ГОИ и измерены с помощью электронного штангенциркуля, данные занесены в таблицу 3 с разбивкой по температуре испытания на прочность. Образцы, полученные при давлении 20 атм, обозначались цифрами от 1 до 10 с приставкой буквы «X»; полученные при давлении 25 атм, обозначались от 1 до 10 с приставкой «V»; при давлении 30 атм, обозначались от 1 до 10 без приставок (табл. 3). Бракованные образцы были заменены новыми.

Таблица 1

## Состав выбранной стержневой смеси

Материал	Обозначение по ГОСТ	Зернистость по ГОСТ, мкм	Массовая доля в смеси, %
Электрокорунд	M40 (F320)	28...40	60,0
	M14 (F600)	10...14	25,0
	M10 (F800)	7...10	5,0
Плавленный кварц	M14 (F600)	10...14	5,0
	M10 (F800)	7...10	4,5
Диоксид титана	M7 (F1000)	5...7	0,5
Пластификатор ППВ	–	–	15 сверх 100

Таблица 2

## Состав пластификатора ППВ

Наименование	Содержание по массе, %
Парафин	87
Полиэтилен	6
Пчелиный воск	7

Таблица 3

## Измерения образцов

Температура, °С	Давление, атм.	Обозначение	Размеры, мм	
			Ширина, b	Высота, h
1	2	3	4	5
20	20	9X	20,29	4,29
		10X	20,29	4,49
		7X	20,29	4,09
	25	9V	20,05	4,13
		8V	20,05	4,64
		7V	20,46	4,30
	30	9	19,90	4,25
		8	20,17	4,41
		7	20,13	4,17
800	20	6X	20,14	4,49
		5X	20,16	4,46
		4X	20,87	4,45
	25	10V	20,09	4,37
		5V	20,39	4,41
		4V	20,25	4,23
	30	6	20,19	4,31
		5	20,50	4,51
900	20	4	19,94	4,36
		3X	20,22	4,22
		2X	19,96	4,10
		1X	20,41	3,96



1	2	3	4	5
900	25	3V	20,40	4,21
		2V	20,05	4,53
		1V	20,17	4,49
	30	3	20,44	4,64
		2	20,24	4,52
		1	20,07	4,63



Рис. 1. Образцы в установке при 800 °С

На рис. 1 изображены нагретые образцы перед началом испытаний на прочность. Образцы, перед запуском установки для исследования термомеханических свойств оболочковых форм (рис. 2), были уложены внутрь ее для равномерного нагрева, в целях недопущения теплового удара.

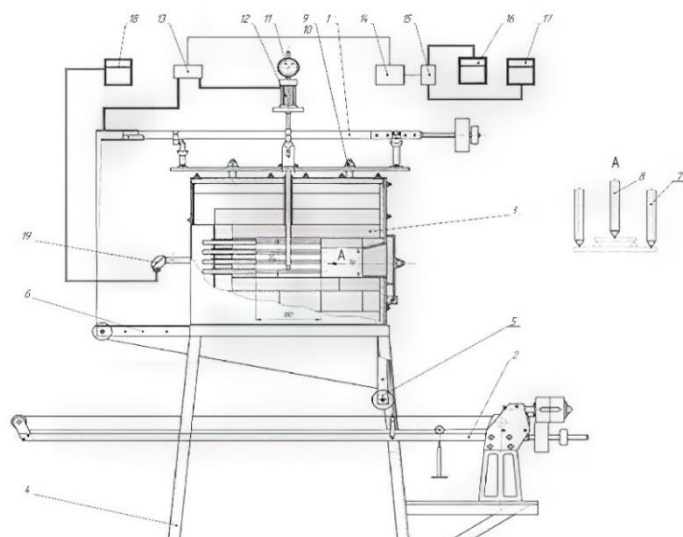


Рис. 2. Установка для исследования термомеханических свойств оболочковых форм, включает в себя: 1 – рычаг верхний; 2 – система нагружения; 3 – высокотемпературная печь; 4 – подставка; 5, 6 – кронштейны; 7 – керамические упоры; 8 – жаропрочный клин нагружения; 9, 10 – система фиксации верхней плиты; 11, 12 – система фиксации деформация образца; 13, 14, 15, 16, 17 – система записи нагрузки и деформации образца; 18 – измеритель; 19 – платинородиевая термопара.

Предел прочности ( $\sigma_{\text{изг}}$ ) образцов определяли испытанием образцов-пластин размерами 70x20x4 мм (рис. 3) при трехточечном статическом изгибе согласно ГОСТ Р 50523-93 [2] и методическим указаниям [3]. В процессе эксперимента нагружающее усилие  $F$  прикладывалось перпендикулярно к поверхности прямоугольного образца, расположенного на двух призматических опорах с расстоянием между ними 60 мм (рис. 4).



Рис. 3. Образцы до и после испытания на прочность.

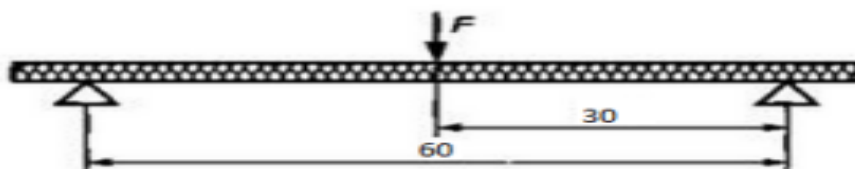


Рис. 4. Схема испытания образца при изгибе.

Предел прочности с использованием полученных экспериментальных данных рассчитывали по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{1000 \cdot M}{W_x}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где  $M$  – изгибающий момент, Н·м;  $W_x$  – осевой момент сопротивления сечения, мм<sup>3</sup>.

Для определения изгибающего момента воспользовались формулой:

$$M = \frac{m \cdot g \cdot l}{400}, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $m=5$  кг – масса груза в системе нагружения (рис. 20);  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $l$  – плечо силы или расстояние, пройденное грузом в системе нагружения до момента слома образца, см.

Осевой момент сопротивления прямоугольного сечения относительно горизонтальной оси определили по формуле:

$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}, \text{ мм}^3, \quad (2)$$

где  $b$  – ширина сечения, мм;  $h$  – толщина сечения, мм.

Расчеты производили в компьютерной программе Microsoft Excel. Рассчитанные значения осевого момента сопротивления, экспериментально полученные значения плеча силы, рассчитанные по полученным данным значения изгибающего момента и изгибной прочности записаны в таблицу 4.

По полученным данным построен график зависимости прочности стержня от температуры испытаний и давления запрессовки стержневой массы (рис. 5). Из графика следует, что, при увеличении давления прессования в 1,5 раза, прочность стержня в среднем увеличивается в:

$$a = \frac{\sum \sigma_{\text{ср } 30}}{\sum \sigma_{\text{ср } 20}} = \frac{31,51+26,92+27,54}{28,77+24,12+26,19} = 1,087 \text{ раза или на } 8,7\%.$$

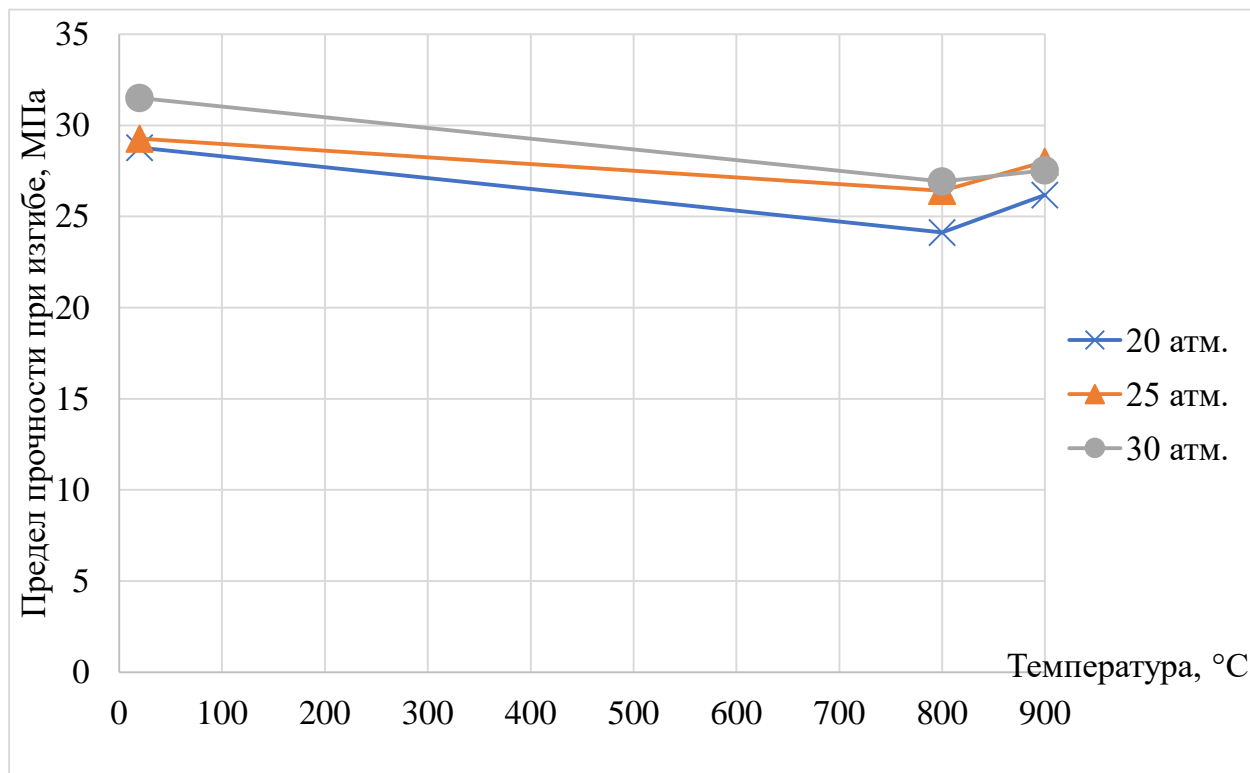


Рис. 5. График зависимости прочности стержня от температуры испытаний и давления запрессовки стержневой массы.

Таблица 4

Результаты испытания образцов на прочность, стандартное отклонение  $\pm 2,8$  МПа

Температура, °C	Давление, атм.	Обозначение	$W_x$ , мм <sup>3</sup>	l, см	M, Н·м	$\sigma_{\text{изг}}$ , МПа	Среднее значение $\sigma_{\text{ср}}$ , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
20	20	9X	62,2 4	16	1,96	31,52	28,77
		10X	68,1 7	16	1,96	28,78	
		7X	56,5 7	12	1,47	26,01	
	25	9V	57,0 0	13	1,59	27,97	29,27

		8V	71,9 4	18	2,21	30,68		
		7V	63,0 5	15	1,84	29,17		
	30	9	59,9 1	16	1,96	32,75		31,51
		8	65,3 8	15	1,84	28,13		
		7	58,3 4	16	1,96	33,63		
800	20	6X	67,6 7	14	1,72	25,37	24,12	
		5X	66,8 4	13	1,59	23,85		
		4X	68,8 8	13	1,59	23,14		
	25	10V	63,9 4	14	1,72	26,85	26,41	
		5V	66,0 9	14	1,72	25,98		
800	25	4V	60,3 9	13	1,59	26,40		
	30	6	62,5 1	14	1,72	27,46		
		5	69,5 0	17	2,08	30,00		
		4	63,1 8	12	1,47	23,29		
900	20	3X	60,0 1	11	1,35	22,48	26,19	
		2X	55,9 2	13	1,59	28,51		
		1X	53,3 4	12	1,47	27,59		
	25	3V	60,2 6	13	1,59	26,45	28,00	
		2V	68,5 7	16	1,96	28,61		
		1V	67,7 7	16	1,96	28,95		
	30	3	73,3 4	15	1,84	25,08	27,54	

		2	68,9 2	16	1,96	28,47
		1	71,7 1	17	2,08	29,07

### **Заключение**

По результатам исследований сделаны следующие выводы: прочность стержневой смеси (24,4...29,3 МПа), запрессованной при давлениях 20 и 25 атмосфер, находится в рекомендуемом для стержневых смесей диапазоне 15...30 МПа; увеличение давления прессования в 1,5 раза дает увеличение прочности на 8,7%, следовательно, прочность слабо зависит от давления прессования, следовательно, смесь следует прессовать при наименьшем давлении; у смеси значительно растет пластичность в районе 800...900 °С.

### **Библиографический список**

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. – М.: Наука, 2006. 632 с.
2. ГОСТ Р 50523-93 Изделия огнеупорные. Определение предела прочности при изгибе при повышенных температурах. – М., 1993. – 8 с.
3. Лабораторный практикум по дисциплине «Технология литейного производства»: методические указания / [О.Б. Деменок и др.]; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2015. – 54 с.

© Юсупбаев А.Р., 2023

## СЕКЦИЯ 2.5. МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.785.5

Д.А. БУЯНОВ

*dmitrij.buyanov.2000@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Р.М. КИРЕЕВ

*Уфимский университет науки и технологий*

### РАССМОТРЕНИЕ ДВУХ ОСНОВНЫХ ВАРИАНТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЫСТРОСМЕННЫХ КОНДУКТОРНЫХ ВТУЛОК

*Аннотация:* В данной статье рассматривается два варианта изготовления быстросменной кондукторной втулки: из стали У10, из стали 20Х с цементацией. Согласно ГОСТ 18432-73 «втулки кондукторные быстросменные» быстросменные кондукторные втулки диаметром более 27 миллиметров нужно изготавливать из стали 20Х и затем подвергать цементации. Это позволяет снизить стоимость втулки.

*Ключевые слова:* быстросменная кондукторная втулка, приспособление, цементация

Быстросменная кондукторная втулка является частью приспособления и служит для направления режущего инструмента, а приспособление, в свою очередь, является частью системы станок-приспособление-инструмент-деталь и выполняет функцию удержания заготовки в нужном положении, для получения необходимой точности обработки.

Как и любое другое изделие в машиностроение приспособление проектируется конструктором и должно выполнять свои функции при максимально простой конструкции и минимальной цене. Именно по этой причине при проектировании станочных приспособлений стараются использовать детали простой формы и, по возможности, стандартизованные. Так же уделяется внимание выбору материала и обеспечению его твёрдости. Обычно хватает механических характеристик таких сталей как сталь 45 или 40Х, но иногда, в основном для таких деталей как пальцы и втулки, применяются инструментальные стали У8А, У10.

Согласно ГОСТ 18432-73 «Втулки кондукторные быстросменные» быстросменные кондукторные втулки диаметром более 27 миллиметров нужно изготавливать из стали 20Х и затем подвергать цементации [1].

Так как оба метода служат для достижения одинаковых механических характеристик их рассмотрения можно сразу начать с трудоёмкости

Твёрдость стали У10 по шкале НРС в зависимости от температуры отпуска может быть от 40 единиц до 65, в то время как у стали 20Х не превышает 25, а

это позволяет увеличить скорость изготовления, т.к. при обработке материала с меньшей твёрдостью мы можем установить более высокую скорость резания.

Допустим, мы рассверливаем отверстие диаметром 26 мм до диаметра 28 мм.

Для расчёта скорости резания применим формулу [1]:

$$v = \frac{C + D^z}{T^m + t^x + s^y + HB^{n_1}}$$

где C – коэффициент;

D – диаметр сверла, мм;

s – обратная подача, мм/об;

z, m, x, y,  $n_1$  – показатели степени.

Для расчёта подачи применим формулу [2]:

$$s = C * D^{0.6}$$

где C – коэффициент;

D – диаметр сверла, мм.

Для стали У10 формулы примут следующий вид [3]:

$$s = 0.019 * 28^{0.6} = 0.14 \text{ мм/об}$$

$$v = \frac{2.8 + 28^{0.4}}{20^{0.2} + 2^0 + 0.14^{0.5} + 650^0} = 1.57 \text{ м/мин}$$

Для стали 20Х формулы примут следующий вид [3]:

$$s = 0.023 * 28^{0.6} = 0.17 \text{ мм/об}$$

$$v = \frac{743 + 28^{0.4}}{20^{0.2} + 2^0 + 0.17^{0.5} + 250^{0.9}} = 5.07 \text{ м/мин}$$

Из результатов видно, что при использовании материала 20Х мы можем использовать гораздо большую скорость резания, что позволит ускорить процесс изготовления детали.

Чтобы узнать на сколько удалось снизить время обработки проведём расчёт основного времени операции:

$$T_o = \frac{L}{n * s} i$$

где L – ход инструмента, мм;

S – подача, мм/об;  
n – частота вращения, об/мин;  
i – число проходов.

$$n = [(1000 * V) / (\pi * D)] = [(1000 * 1.57) / (3,14 * 28,0)] = 17,8 \text{ об/мин}$$

$$L = y + l + y_1$$

где y – врезание сверла, мм;  
l – длина обрабатываемого отверстия, мм;  
y<sub>1</sub> – перебег сверла, мм.

$$y = 0.5 (D - d) * ctg\varphi = 0.5(28 - 26) * ctg60 = 0,6$$

$$y_1 = 3s = 3 * 0.14 = 0.42$$

$$L = 0.6 + 100 + 0.42 = 101.02 \text{ мм}$$

$$T_o = \frac{101.02}{17.8 * 0.14} * 1 = 40.5 \text{ мин}$$

При обработке стали 20X формулы для вычисления частоты вращения и основного времени примут следующий вид:

$$n = [(1000 * V) / (\pi * D)] = [(1000 * 5.07) / (3,14 * 28,0)] = 57,6 \text{ об/мин}$$

$$T_o = \frac{101.02}{57.6 * 0.17} * 1 = 10.3 \text{ мин}$$

Как видно из результатов время обработки удалось сократить на 30.2 минуты. Но необходимо учитывать, что цементация тоже занимает определённое время и требует после себя дополнительной механической обработки. Чтобы определить сколько времени это добавит ко времени изготовления изделия необходимо сначала определить способ цементации.

Способы цементации:

- в твёрдом карбюризаторе;
- в газовом карбюризаторе (рис. 1);
- в кипящем слое;
- в растворах электролитов;
- в пастах.





Рис. 1. Пример цементации в газовом карбюризаторе

При учёте таких факторов как пригодность для серийного использования, затраты времени, простота оборудования и процесса выгодно выбрать цементацию в газовом карбюризаторе.

Для проведения процесса требуется создать среду газов, содержащих углерод. Следует упомянуть возможность легкой автоматизации и упрощённую последующую термическую обработку, например, закалку можно проводить сразу, достав из печи.

За 15 часов при температуре в 920°C получаем слой 1,2 мм. Чтобы сократить время операции рекомендуется поднять температуру. При температуре в 1000°C можно получить слой в 1мм возможно за 5 часов.

Учитывая, что в нашем случае достаточным является слой цементации в 0,8 мм, можно сократить время цементации до 4 часов. После цементации необходима финишная обработка наружного посадочного диаметра и калибровки внутреннего диаметра.

Наружный диаметр доведём до необходимой точности обработки при помощи чистового точения, посчитаем основное время операции:

$$V = [C_v / (T^m * t^x * S^y)] * K_v,$$

где  $C_v$  – коэффициент, по табл. 17 [4].  $C_v=290$

$T$  – стойкость инструмента, (мин).  $T=600$

$x, m, y$  – показатели степени, принятые по табл.17 [4],  $x=0,15$ ;  $m=0,2$ ;  $y=0,35$ ;

$K_v$  – общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания. Определяется по формуле:

$$K_v = K_{MV} * K_{IV} * K_{IV}$$

где  $K_{MV}$  – коэффициент на обрабатываемый материал, определяется по табл. 1-4 [4],  $K_{MV}=0,8$ ;

$K_{IV}$  – коэффициент на инструментальный материал, определяется по табл. 6 [4],  $K_{IV}=1,0$ ;

$K_{LV}$  – коэффициент, учитывающий состояние поверхности, определяется по табл.31 [4],  $K_{LV}=0,8$ .

$$K_V = 0,8 * 1,0 * 0,8 = 0,64$$

$$V = [290 / (60^{0,2} * 0,5^{0,15} * 0,6^{0,45})] * 0,64 = 114,3 \text{ м/мин}$$

$$n = [(1000 * V) / (\pi * D)] = [(1000 * 110,3) / (3,14 * 96,0)] = 365 \text{ об/мин}$$

$$n_{ст} = 315 \text{ об/мин}$$

Основное время определяется по формуле:

$$T_o = \frac{l + l_1}{n * S} * i \text{ мин,}$$

где  $l$  – длина обрабатываемой поверхности, в мм;

$l_1$  – величина врезания и перебега инструмента, в мм;

$n$  – число оборотов шпинделя, в об/мин;

$S$  – подача инструмента, в мм/об;

$i$  – число проходов.

$$T_o = \frac{20 + 0,2}{315 * 0,6} * 2 = 0,2 \text{ мин}$$

Для калибровки внутреннего диаметра проведём развёртку:

$$v = \frac{C_v D^q}{T^m t^x s^y} K_v = \frac{10,5 * 28^{0,3}}{50^{0,4} * 1^{0,2} * 0,6^{0,65}} * 0,35 = 2,52 \text{ м/мин}$$

$$n = [(1000 * V) / (\pi * D)] = [(1000 * 2,52) / (3,14 * 28,0)] = 28,7 \text{ об/мин}$$

$$T_o = \frac{L}{n * S} * i = \frac{100}{28,7 * 0,6} * 1 = 5,8 \text{ мин}$$

Вспомогательное время примем равным 30 минутам.

В выводе можно сказать, что изготовление быстросменных кондукторных втулок диаметром больше 27мм из стали 20Х с применением цементации, даже с учётом операций механической обработки после неё, занимает меньше времени, чем изготовление из стали 10У, за счёт увеличения скорости обработки, которое достигается за счёт использования материала с меньшей твёрдостью.

## Библиографический список

1. ГОСТ 18432-73 «Втулки кондукторные быстросменные».
2. Марков В.В. Расчёт режимов резания: учебное пособие / Марков В.В. – СтройИндустрияИнвест: ОГТУ, 2010. – 114 с.
3. Рахимьянов Х.М. Технология машиностроения: учебное пособие / Рахимьянов Х.М. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – 253 с.
4. Мещерякова Р.К. «Справочник технолога-машиностроителя», т. 2, под. ред. Косиловой А.Г., Машиностроение, 2001. – 496 с.

© Буянов Д.А., 2023

УДК 621.785.5

А.Д. ГАЛИМОВА

galimovaad@bk.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Р.Д. АГЗАМОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

### **ОБЗОР РАБОТ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ НОРМАЛЬНОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ИЗМЕНЕНИЮ СТРУКТУРЫ**

*Аннотация:* В данной работе рассматриваются методы изучения нормального модуля упругости титанового сплава ВТ6 при переходе от крупнозернистого к наноструктурному состоянию. Были рассмотрены исследования, результаты которых показали, что величина модуля упругости снижается, а величина зерен увеличивается от 1 до 6 мкм.

*Ключевые слова:* титановый сплав, нормальный модуль упругости, двухфазный титановый сплав ВТ6

Титановые сплавы находят активное применение в авиакосмической и имплантационной медицине. Их используют для изготовления особо-ответственных деталей силовой турбины, компрессора, лопаток вентилятора. До этого считалось, что модуль нормальной упругости металлов является структурно-нечувствительной величиной [1]. Эксперименты продолжались, и было выявлено заметное снижение значений модуля упругости чистых металлов при переходе от крупнозернистого к наноструктурному состоянию [2-4]. Но с изучением этого вопроса возник другой – возможно ли также использовать этот вид сплава для чрезвычайно-важных деталей. Между тем, были проведены многочисленные исследования для выявления связи - влияния модуля Юнга на

микроструктуру титанового сплава ВТ6, которые и будут рассматриваться в этой статье.

Целью данной статьи является сравнение различных методов определения влияния модуля Юнга на микроструктуры двухфазного сплава ВТ6.

Были рассмотрены экспериментальные методы выявления наличия связи между химическим составом элементов микроструктуры и модулем Юнга. Эта характеристика активно используется при прочностных расчетах конструкций. Согласно данным, из научно-технической литературы модуль Юнга может меняться от 90 до 145 МПа.

Разберемся с объектом изучения – титановым сплавом ВТ6 и ВТ6С. Химический состав соответствует ГОСТ 19807-91, показанном в таблице 1. В исследованиях рассматривается ВТ6 в микрокристаллическом (МК), ультрамелкозернистом (УМЗ) и крупнозернистом состояниях.

Рассмотрим основные изученные вопросы в области исследования модуля Юнга в разных состояниях в титановых сплавах ВТ6:

В работе [5] проводят испытания модуля нормальной упругости при разных размерах зерен. Были взяты промышленные листы титановых сплавов ВТ6 и ВТ6С толщиной 1 мм.

*Таблица 1*

Химический состав сплавов ВТ6 и ВТ6С

Марка и основные фазы	Al	V	Zr	Si	Fe	C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
<b>ВТ6</b> α+β	5,3-6,8	3,5-5,3	0,3	0,10	0,6	0,10	0,20	0,05	0,015
<b>ВТ6С</b> α+β	5,3-6,5	3,5-4,5	0,3	0,15	0,25	0,10	0,15	0,04	0,015

Ультрамелкозернистая (УМЗ) подходит для изготовления деталей повышенного качества. Провели механические испытания на растяжение при комнатной температуре с исходной УМЗ структурой после вакуумного отжига при температурах 900° и 950°. Результаты показали четкую тенденцию к снижению нормального модуля Юнга, которая наблюдается на фоне увеличения среднего размера зерен. Также эта тенденция связана с увеличением β-фазы. У данных сплавов переход полного полиморфного превращения (α+β) → β происходит при 980°С и 970°С. Результаты механических испытаний титанового сплава ВТ6 с различным размером зерна приведена в таблице 2.

Таблица 2

Результаты механических испытаний титанового сплава ВТ6 с различным размером зерна

Размер зерен, мкм	Е, ГПа
0,18 (исходная УМЗ структура)	117,4
5 (отжиг - 900°С)	106,4
103 (отжиг - 995°С)	95

В этой работе [5] были также испытаны образцы со сплавом ВТ6С. Этот титановый сплав – это вариация сплава ВТ6. В полученных результатах было выявлено увеличение  $\beta$ -фазы. Такие титановые сплавы перспективно использовать в качестве имплантов из-за их пониженного модуля упругости.

В работе [6] были также взяты образцы титанового сплава ВТ6, полученные ковкой в наноструктурном состоянии с последующей изотермической прокаткой, в микрокристаллическом и крупнозернистом состояниях.

Модуль Юнга определяли двумя разными способами. Первый с помощью механических испытаний на растяжение на установке «ISTRON». Вторым с помощью сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3D». Упругую деформацию проверяли с помощью экстензомера с базой 100 мм.

По результатам, полученных при двум разными способами, приведенных в таблице 3, можно сказать, что независимо от методики выполнения эксперимента наблюдается заметное снижение величины модуля упругости титанового сплава ВТ6 при переходе от наноструктурного состояния к крупнозернистому. Модуль нормальной упругости, определенный по результатам механических испытаний на установке «ISTRON», обозначен как  $E_1$ , а определенный индентированием на сканирующем нанотвердомере «НаноСкан-3D» - как  $E_2$ .

Таблица 3

Результаты испытаний титанового сплава ВТ6 с различным размером зерна

Размер зерен, мкм	$E_1$ , ГПа	$E_2$ , ГПа
0,18 (исходная УМЗ структура при 900°)	117,4	117,3
0,21 (НС при 500°)	107,8	116,7
5 (МК при 990°)	106,4	109,2
103 (КЗ структура при 995°)	95	89,4

В результате проведенного эксперимента величина модуля упругости снизилась более чем на 20%. Подобные результаты работы были также получены в работе [5].

В ходе рассмотрения работ [5] и [6] были рассмотрены методы определения модуля нормальной упругости в титановом сплаве ВТ6. Оба исследования показали, что после перевода сплава ВТ6 отжигом из наноструктурного в крупнозернистое состояние величина модуля упругости снижается, а величина зерен увеличивается от 1 до 6 мкм.

### Библиографический список

1. V.S. Zolotarevski. Mechanical properties of metals: Tutorial for universities. M., Metallurgy, 1983. 352 p. (in Russian) [В.С. Золоторевский. Механические свойства металлов: Учебник для вузов. М., Metallurgy, 1983. 352 с.]
2. G.E. Fougere, L. Riester, M. Ferber, et al. Mat. Sci. Eng. **A204**, 1–6 (1995), Doi: 10.1016 / 0921 – 5093 (95) 09927 – 1
3. M.I. Alymov. Technology metals. 3, 8 (2000) (in Russian) [М.И. Алымов. Технология металлов. 3, 8 (2000)]
4. N.I. Noskova, R.R. Mulyukov. Submicrocrystalline and nanocrystalline metals and alloys. Ekaterinburg, UB RAS, 2003. 279 p. (in Russian) [Н.И. Носкова, Р.Р. Мулюков. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург, УрО РАН, 2003. 279 с.]
5. Лутфуллин Р.Я. и др. Нормальный модуль упругости титанового сплава ВТ6С и его чувствительность к изменению структуры // Письма о материалах. – 2017. – Т. 7. – № 1. – С. 12-16.
6. Трофимов Е.А., Шаяхметов Р.У., Лутфуллин Р.Я. Экспериментальное определение модуля упругости  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз в титановом сплаве ВТ6 // Перспективные материалы. – 2013. – № S15. – С. 124-127.

© Галимова А.Д., 2023

И.М. ГАНЕЕВ

*insaf.ganeev@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук А.Ю. НАЗАРОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ И СПОСОБЫ ИХ НАНЕСЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРОШИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА**

*Аннотация:* В данной статье рассматриваются электроизоляционные покрытия на основе соединений металлов и способы их нанесения на электрод-инструмент.

*Ключевые слова:* электрохимическая обработка, PVD, CVD, оксид алюминия, наноструктурное покрытие

Нанесение покрытий на ответственные части инструментов является тем направлением, которое интересует современных конструкторов и технологов. Неудивительно, ведь это снижает стоимость изделия без изменений таких свойств, как твердость, шероховатость, износостойкость и т.д. Тренд на наноструктурные покрытия затронул и область электрохимической обработки. Предприятия заинтересованы в получении компактных, дешевых и надежных электрод-инструментах.

На данный момент существует проблема невозможности нанесения качественного электроизоляционного покрытия на боковую поверхность цилиндрического полого электрод-инструмента для прошивания отверстий малых диаметров. В этой статье рассматриваются возможные варианты решения вопроса.

Электроизоляционный слой на боковой поверхности электрод-инструмента служит для защиты от нежелательных электрических контактов с рабочей средой. Покрытия бывают разных типов: пластиковые, силикатные, лаки, краски, на основе соединений металлов. Последние имеют большое преимущество перед конкурентами, потому что такие пленки имеют наименьшую толщину. Это играет большую роль при проектировании электрод-инструментов для электрохимической обработки отверстий малых диаметров.

Рассматриваемые электроизоляционные слои на основе соединений металлов имеют общую характерную черту: большинство из них на основе оксидов. Они образуются путем окисления поверхности металлического электрода в особых условиях.

Диоксид циркония ( $ZrO_2$ ) – белый кристаллический оксид циркония. Имеет низкую электропроводимость и теплопроводимость. Одно из его главных

применений – добавление в керамику или стекло. Зачастую получают с помощью PVD. Применяется для защиты двигателей от перегрева и износа.

Оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ) – белый оксид, обладающий высокой термической и химической стабильностью. В чистом виде является минералом, называемом корундом. Хороший изолятор тепла и электричества, также обладает высокой твердостью. За эти характеристики оксид алюминия пользуется большим спросом в машиностроении для получения жаропрочных деталей, стекла и керамики. Стоит отметить, что данное соединение не является токсичным и имеет низкую стоимость.

Оксид хрома ( $Cr_2O_3$ ) – твёрдый оксид зеленого цвета. Имеет высокую температуру плавления и твердость. Обладает высокой диэлектрической проницаемостью. Важно отметить, что оксид хрома является токсичным веществом и может нанести вред человеку при попадании на кожу или в дыхательные пути.

Диоксид титана ( $TiO_2$ ) – амфотерный оксид. Покрытия на их основе являются одними из наиболее широко используемыми в промышленности. Оксид титана обладает фотокаталитическими свойствами, что значит, что при воздействии света он может разлагать органические вещества и удалять загрязнения из воздуха и воды. Также оксид титана является стойким к коррозии материалом, что делает его идеальным для использования в покрытиях, предназначенных для защиты различных материалов от окружающей среды и агрессивных химических веществ. Они широко применяются в различных отраслях, включая строительство, автомобильную промышленность, солнечные электростанции и многие другие.

Оксид кремния ( $SiO_2$ ) – эти покрытия имеют широкое применение в различных отраслях промышленности и науке благодаря их высокой химической стойкости, термической устойчивости и электрическим свойствам. К тому же являются отличными диэлектриками. Они обладают высоким сопротивлением электрическому пробое и низкой электрической проводимостью, что делает их идеальными для использования в электронике и микроэлектронике. Оксид кремния применяется в качестве защитного покрытия для различных материалов, включая стекло, металлы и полимеры. Пленки на основе этого соединения предотвращает коррозию, окисление и износ поверхности материала, а также повышает его механическую прочность.

Подробно об электрических свойствах вышеперечисленных веществ показано в таблице.



Таблица 1

Диэлектрические характеристики покрытий на основе соединений  
металлов

Наим.-е вещ-ва	Условия	Диэлектри- ческая проницае- мость $\epsilon$	Тангенс угла диэлектри- ческих потерь $\operatorname{tg}\varphi$	Плот- ность токов утечки, $\text{A}/\text{cm}^2$	Напряженность электрического поля, В/см	Ширина запре- щенной зоны, эВ
Диоксид циркония ( $\text{ZrO}_2$ )	Метод получения – NanoParticle Jetting	23	0,0013	-	-	-
Оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	Толщина покрытия – 15 мкм. Метод – электронно- лучевое испарение керамики	8,9	0,02	-	-	-
Оксид хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )	Толщина полученной пленки – 200 нм.  Метод нанесения – высокочастот ное магнетронное распыление с последующим отжигом	11,9-13,3	-	-	-	3,3
Диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ )	Толщина нанесенных пленок – около 100 нм.  Концентрация кислорода – 22 – 24%. Метод нанесения – магнетронное распыление	20-30	0,02	менее 1,0	$2,0 \times 10^6$	3,82
Оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ )	Толщина покрытия – 4,3 нм	4,4	-	-	-	-

В вышеприведенной таблице показаны данные с отдельно взятых научных публикаций. По каждому наименованию приведен лишь один пример, демонстрирующий диэлектрические параметры каждого покрытия.

Диэлектрические параметры получаемых покрытий в большинстве случаев зависят от их толщины. К примеру, для получения покрытия из диоксида циркония необходимо нанести от 10 слоев. К тому же, известно, что степень электрической изолированности можно повысить, если между диэлектрическим слоем и рабочей средой поместить пленку-полупроводник. Немаловажную роль играет и то, как она получена.

Наноструктурные покрытия с диэлектрическими характеристиками можно наносить следующими способами:

1) Дуговое напыление.

Процесс связан с эрозией электрода, материал которого служит для будущего покрытия. Характеризуется высокой адгезией полученной пленки, возможностью управлять составом покрытия и скоростью нанесения.

2) Катодное ионное напыление.

Метод ионного напыления основан на принципе бомбардировки катодов (мишеней), которые сделаны из материала, осаждаемого на подложку. Далее выбитые ионами частицы образуют необходимую тонкую пленку. Имеет ряд недостатков, к примеру: неравномерность напыления покрытия, невозможность получения чистой пленки, высокая погрешность состава получаемой композиции.

3) Магнетронное напыление.

Является разновидностью ионного осаждения. Главным отличием является наличие катода (мишени) в электрическом и магнитном полях.

4) Физическое осаждение из газообразной фазы (PVD).

Метод основан на принципе преобразования твердого материала в газ, чтобы напылить им подложку. Обычно этот способ используют для получения защитных пленок на поверхности металлов и их соединений. Характеризуется высокой адгезией покрытия к материалу подложки, относительно низкими температурами протекания процесса.

5) Химическое осаждение из газообразной фазы (CVD).

Этот способ схож с предыдущим методом, однако для получения композиций используют уже газообразные реагенты. Преимущества: не важна сложность получаемых покрытий, возможность гибкого регулирования толщины покрытий и химический состав.

Рассматриваемые способы позволяют получить те соединения оксидов, которые были приведены в данной статье. Это значит, что есть шанс получить эффективную связку «покрытие-метод», который будет удовлетворять запросы предприятий, занимающихся электрохимической обработкой и соответствующим оборудованием.

## Библиографический список

1. Адамчук Д.В., Ксенович В.К., Поклонский Н.А. Диэлектрические свойства стабилизированного иттрием диоксида циркония //Материалы и структуры современной электроники. – 2020. – С. 458-462.
2. Косилов А.Т. и др. Диэлектрические свойства пористого оксида алюминия //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 1. – С. 12-14.
3. Ежовский Ю.К., Холкин В.Ю. Получение и свойства нанослоев оксидов хрома на полупроводниковых матрицах //Журнал физической химии. – 2008. – Т. 82. – № 7. – С. 1304-1309.
4. Вилья Н., Голосов Д.А., Нгуен Т.Д. Формирование пленок оксида титана методом реактивного магнетронного распыления //Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2019. – № 5 (123). – С. 87-93.
5. Алмаев А.В. и др. Синтез и газовая чувствительность тонких пленок оксида хрома //Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – № 20. – С. 35-37.
6. Юшков Ю.Г. и др. Параметры и свойства электроизоляционного покрытия окиси алюминия, осажденного на металле форвакуумным источником //Прикладная физика. – 2020. – № 2. – С. 53.
7. Ульяницкий В. Ю., Батраев И. С., Штерцер А. А. Детонационные покрытия из оксидов //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 9. – С. 37-44.
8. Патрушева Т.Н. и др. Защитные диэлектрические пленки и методы их получения // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2016. – Т. 9. – № 2. – С. 254-267.
9. Lee R., Sudarshan T.S., Thompson J.E., Nagabhus4 hana G.R. // IEEE Int. Symp. Electrical Insulation. 1982. P. 103.
10. Miller H.C. // IEEE Trans. Electrical Insulation. 1989. V. 24. № 5. P. 765.
11. Oh Y. et al. Microwave dielectric properties of zirconia fabricated using NanoParticle Jetting™ //Additive Manufacturing. – 2019. – Т. 27. – С. 586-594.
12. Zhang G. et al. Quantum size effects on dielectric constants and optical absorption of ultrathin silicon films //IEEE electron device letters. – 2008. – Т. 29. – № 12. – С. 1302-1305.
13. Панков В.П. и др. Напыление плазменных покрытий электродуговым, магнетронным и катодным распылением //XII международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 61-й годовщине полета ЮА гагарина в космос. – 2022. – С. 161-168.
14. Рамм Ю., Вольраб К. Вакуумная PVD-установка нанесения покрытий. – 2013.

© Ганеев И.М., 2023

Р.Х. ДАМИНОВА

regina74\_76@mail.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель Р.К. ДАВЛЕТКУЛОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## ОСОБЕННОСТИ СУХОГО ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ

*Аннотация:* В данной статье рассматривается метод сухого электрополирования, его актуальность, так же обзор существующих методов/способов и установок

*Ключевые слова:* сухое полирование, электрополирование

На данный момент в аддитивном производстве важное значение имеют методы постобработки выращенных изделий, одной из главных задач которых является приведение поверхности изделия к заданному классу шероховатости, так как характерной особенностью поверхности деталей, изготовленных аддитивными методами, является ее повышенная шероховатость, вызванная применением в качестве исходного материала дискретного порошка.

Традиционные методы механической обработки таких поверхностей зачастую неэффективны, так как профиль деталей может быть сложным, а твердость материала – высокой. Внешнюю поверхность таких изделий можно обрабатывать пескоструйными методами или электрополировкой, которые отличаются существенной неэкологичностью и эффективно обрабатывают только открытые участки поверхности изделий.

С повышением шероховатости поверхности ответственных металлических деталей, работающих в условиях воздействия значительных знакопеременных нагрузок, на примере валов, лопаток газовых турбин и т.п., резко снижаются их эксплуатационные характеристики. Качество обработки поверхности пера лопаток существенно влияет на их прочностные характеристики, к примеру, повышение класса чистоты поверхности способствует увеличению предела выносливости и статической прочности лопаток [1]. Развитая шероховатость поверхности лопаток газовых турбин приводит к ухудшению газодинамической устойчивости газотурбинного двигателя (ГТД), к возрастанию аэродинамических потерь, приводящих к снижению КПД, к потере мощности, росту удельных расходов и к снижению экономичности двигателя или газотурбинной установки.

В то же время производство и ремонт лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ), в связи с высокими требованиями к качеству поверхности ( $Ra \leq 0,32 \dots 0,16$  мкм), характеризуется значительной трудоемкостью их финишной обработки. Это вызывает проблемы при механической обработке поверхностей различных изделий. В этой связи

развитие способов получения высококачественных поверхностей деталей является весьма актуальной задачей.

Электрохимическая обработка заменяет трудоемкие механические методы и не приводит к нежелательным структурным изменениям в поверхностном слое изделий. Стравленная поверхность во многих случаях обладает более высокой коррозионной стойкостью и улучшенными механическими свойствами. Электрохимическое полирование — это обработка поверхностей деталей, погруженных в электролит, представляющий собой раствор, обычно содержащий кислоты. В процессе обработки при постоянном напряжении 10...20 В изделие подключается к положительному полюсу (аноду) источника питания.

При анодном электрохимическом полировании процесс сглаживания микрошероховатостей на уровне микрорельефа поверхности связан с наличием на металле пассивирующей пленки. Степень уменьшения шероховатостей определяется величиной электрического заряда, прошедшего через электролит. В ходе электролиза, наряду с уменьшением высоты микровыступов, происходит округление их вершин и формирование волнообразного микрорельефа поверхности. Данные процессы вызваны неравномерностью распределения электрического тока по микрорельефу поверхности и концентрационными изменениями электролита в прианодном слое. Качество электрохимической обработки зависит от состава металла или сплава, степени остаточной деформации, толщины обрабатываемой детали.

При использовании электрохимического полирования для получения поверхности хорошего качества необходимо перед обработкой убедиться, что на деталях нет глубоких рисок, забоин, раковин, так как они не устраняются при электрохимической обработке. Наиболее высокий блеск поверхности достигается на небольших деталях, причем плоские поверхности полируются хуже, чем цилиндрические.

Электрохимическое полирование проводится в обычных гальванических ваннах с обязательным плотным контактом подвешного устройства с деталями и электродной штангой. Наиболее долговечна оснастка из титана, который не разрушается в электролитах. Для надежности электрического контакта подвески с деталями рекомендуется образующуюся на них окисную пленку периодически удалять, используя разбавленную серную кислоту.

Несмотря на достаточно широкую область применения, электрохимический метод имеет существенные недостатки, такие как:

- Высокая энергоёмкость.
- Токсичность, пожароопасность и взрывоопасность.
- Технологическая сложность.
- Ограничение номенклатуры обрабатываемых металлов.
- Коррозия оборудования.

### ***Способ электролитно-плазменной обработки изделий, изготовленных с применением аддитивных технологий.***

Метод электролитно-плазменной обработки, недавно предложенный для обработки изделий, выращенных методами 3D-печати. Сочетая высокую скорость обработки поверхности с низкой экологической опасностью используемых реагентов, этот метод обладает хорошей перспективой для применения в аддитивном производстве. В отличие от классических гальванических процессов, где процесс съема материала происходит в жидкой фазе однородно по всей поверхности, в этом методе обработка производится электрическим разрядом в парогазовой оболочке, окружающей обрабатываемое изделие. В результате усиление напряженности электрического поля вблизи локальных неоднородностей поверхности приводят к интенсификации процесса съема материала этих неоднородностей, то есть метод действует избирательно.

Благодаря этим особенностям электролитно-плазменная обработка изделий разрядом со статическим (непроточным) жидким электродом в настоящее время все больше применяется в промышленности.

В отличие от существующего на рынке оборудования разрабатываемый комплекс оснащен приставками, обеспечивающими обработку внешних и внутренних поверхностей деталей с применением статичного и струйного жидкого электрода. Большое внимание уделено повышению безопасности работы с установкой: реализована гальваническая развязка от питающей сети электролитной ванны и обеспечена возможность ее надежного заземления, сама ванна будет помещаться в закрывающийся бокс с системой вытяжной вентиляции. Реализована дистанционная обработка детали с применением манипулятора, исключающего нахождение оператора вблизи ванны в процессе обработки.

Основное конкурентное преимущество создаваемого продукта – оборудования и технологии для электролитно-плазменной поверхностной обработки изделий, изготовленных аддитивными методами, – возможность прецизионной обработки внутренних открытых полостей деталей. Ультразвуковое воздействие, оказываемое на зону обработки, не только интенсифицирует процессы съема материала неоднородностей, но и усиливает проникновение разряда в каналы малого диаметра. Предлагаемые сейчас на рынке системы имеют предельно простую конструкцию и предназначены для массовой обработки внешних поверхностей деталей. Стабилизация режимов, как правило, отсутствует, что может сказаться на качестве обработанной поверхности. Ультразвуковое воздействие в процессе обработки также не осуществляется.

Эффективность плазменной обработки основана: на тепловом и газодинамическом эффектах; на взаимодействии с потоком ионизированных, возбужденных частиц и озона; на испускании инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения; на термической и структурной неоднородности плазменного потока; на наличии низкочастотных и высокочастотных пульсаций плазмы; на перемешивании плазменного потока с холодным газом окружающей

среды; на специфическом взаимодействии плазмы с металлом, слоем жировых, водяных и адсорбированных молекул.

Основными характеристиками плазмы, оказывающими влияние на технологию плазменной обработки, выступают её температура, давление, энтальпия, скорость истечения и состав. Назначение плазменной обработки материалов

#### ***Способ сухого электрополирования.***

Способ сухого электрополирования металлической детали, заключающийся в заполнении электропроводящими гранулами рабочего контейнера, выполненного из электропроводного материала, закрепление детали на держателе, погружении детали в электропроводящие гранулы, заполняющие контейнер, подключении детали к аноду, а контейнера к катоду.

Технический результат достигается за счет того, что в способе сухого электрополирования детали, включающем погружение металлической детали в электропроводящую среду и подачу противоположного по знаку электрического потенциала на деталь и электропроводящую среду в отличие от прототипа в качестве электропроводящей среды используют аниониты, выполненных в виде волокон, пропитанных раствором электролита, обеспечивающего электропроводность упомянутых волокон и ионный унос металла с поверхности детали с удалением с нее микровыступов, обеспечивают контакт всей полируемой поверхности детали с упомянутыми волокнами и волокон между собой, приводят в относительное движение волокна и деталь, подают на деталь и волокна электрический потенциал, обеспечивающий ионный унос металла с поверхности обрабатываемой детали и ее электрополирование в среде упомянутых волокон до получения заданной шероховатости полируемой поверхности детали.

#### **Обзор существующих методов/способов и установок**

##### ***Способ сухого электрополирования детали***

***RU (11) 2 730 306 (13) C1***

Автор(ы): Мингажев Аскар Джамилевич, Криони Николай Константинович предлагают изобретение относится к технологии электрополирования поверхности деталей из металлов и сплавов и может быть использовано для обработки поверхностей лопаток турбомашин. Способ включает погружение металлической детали в электропроводящую среду и подачу противоположного по знаку электрического потенциала на деталь и электропроводящую среду. В качестве электропроводящей среды используют аниониты, выполненные в виде волокон и пропитанные раствором электролита, обеспечивающего электропроводность упомянутых волокон, ионный унос металла с поверхности детали с удалением микровыступов и контакт всей полируемой поверхности детали с упомянутыми волокнами и волокон между собой. Приводят в относительное движение волокна и деталь, подают на деталь и волокна электрический потенциал, обеспечивающий ионный унос металла с поверхности обрабатываемой детали и ее электрополирование в среде упомянутых волокон до получения заданной шероховатости полируемой

поверхности детали. Технический результат: повышение эксплуатационных характеристик детали.

Изобретение относится к технологии электрополирования поверхности деталей из металлов и сплавов и может быть использовано для обработки поверхностей лопаток турбомашин для повышения их эксплуатационных характеристик.

С повышением шероховатости поверхности ответственных металлических деталей, работающих в условиях воздействия значительных знакопеременных нагрузок, например валов, лопаток газовых турбин и т.п., резко снижаются их эксплуатационные характеристики. Качество обработки поверхности пера лопаток существенно влияет на их прочностные характеристики, так например, повышение класса чистоты поверхности способствует увеличению предела выносливости и статической прочности лопаток (В.Ф. Макаров, Е.Н. Бычина, А.О. Чуян. Математическое моделирование процесса полирования лопаток газотурбинных двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. №8 (85), 2011, с.11-14). Развитая шероховатость поверхности лопаток газовых турбин приводит к ухудшению газодинамической устойчивости газотурбинного двигателя (ГТД), к возрастанию аэродинамических потерь, приводящих к снижению КПД, к потере мощности, росту удельных расходов и к снижению экономичности двигателя или газотурбинной установки.

***Способ сухого электрополирования лопатки турбомашин  
RU (11) 2 769 105 (13) С1***

Изобретение авторами которого являются Мингажев Аскар Джамилевич, Криони Николай Константинович относится к технологии электрополирования поверхности лопаток турбомашин. Способ включает установку обрабатываемого пера лопатки в электрод, охватывающий перо лопатки с зазором, заполненным гранулами из анионитов, содержащих электролит, обеспечение контакта гранул со всей обрабатываемой поверхностью пера и с охватывающим электродом, перемещение гранул в зазоре относительно поверхности пера, подачу противоположного по знаку электрического потенциала на лопатку и охватывающий электрод, обеспечивающего ионный унос металла с поверхности пера лопатки. При этом используют составной охватывающий электрод, состоящий из электрода, эквидистантного форме спинки пера лопатки, располагая его со стороны спинки, и из электрода, эквидистантного форме корыта пера лопатки, располагая его со стороны корыта. Технический результат - повышение качества и надежности обработки поверхности пера лопатки за счет повышения однородности обработки ее поверхности и обеспечения заданной геометрии пера лопатки. 8 з.п. ф-лы, 4 ил.



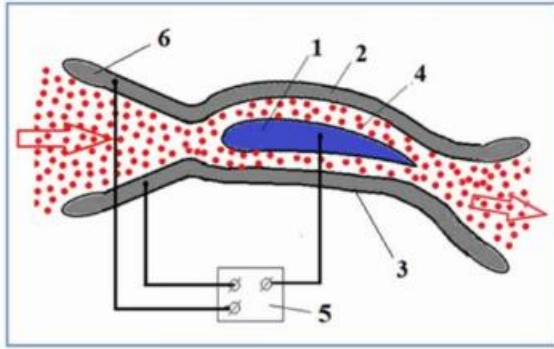


Рис. 1. Схема сухого полирования

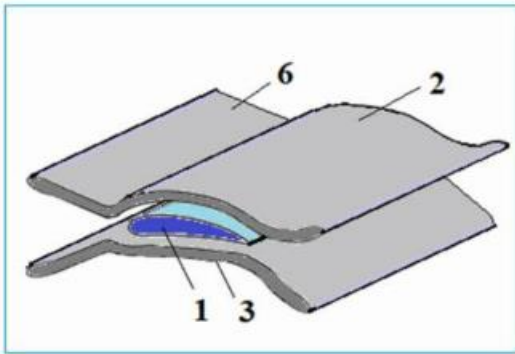


Рис. 2. Схема сухого полирования

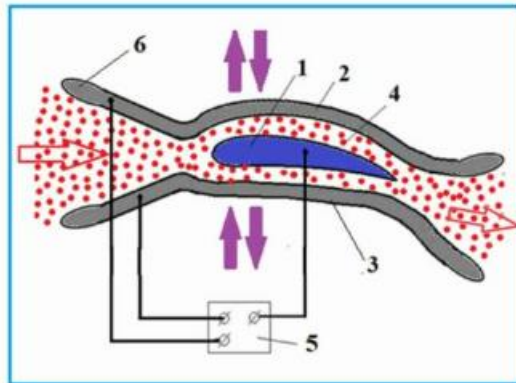


Рис. 3. Схема сухого полирования

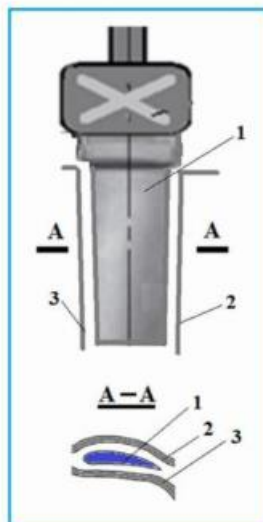


Рис. 4. Схема сухого полирования

**Установка для электрополирования лопатки турбомашинны патент RU (11) 2 755 908 (13) C1**

Автор(ы): Мингажев Аскар Джамилевич, Криони Николай Константинович предлагают устройство для электрополирования поверхности металлических деталей. Устройство содержит камеру, внутри которой расположено по крайней мере одно устройство для полирования, содержащее держатель обрабатываемой лопатки с прижимным устройством, вибратором и внешним охватывающим электродом, эквидистантным по форме охватываемому перу лопатки, выполненным с возможностью размещения в его полости пера лопатки с образованием между поверхностью пера и охватывающим электродом зазора, предотвращающего контакт между лопаткой и электродом и достаточного для продевания и перемещения ленты из ионитов с одновременным обеспечением контакта с поверхностью обрабатываемого пера лопатки и охватывающим электродом, ленты, снабженной по боковым краям гибкими направляющими полосами, продетыми в направляющие полости электрода, обеспечивающими натяжение упомянутой ленты в направлении продольной оси лопатки, ее плавный отвод от верхнего торца лопатки и области перехода от пера к основанию лопатки. Установка содержит механизм подачи и перемещения ленты в виде бобин с лентой, выполненных с возможностью их вращения и погружения в емкости для регенерации ленты. Установка снабжена источниками электропитания для электрополирования лопатки и токоподводами подачи на охватывающий электрод и лопатку противоположного по знаку электрического потенциала.

Изобретение относится к технологии электрополирования поверхности деталей из металлов и сплавов и может быть использовано для обработки

поверхностей лопаток турбомашин для повышения их эксплуатационных характеристик.

С повышением шероховатости поверхности ответственных металлических деталей, работающих в условиях воздействия значительных знакопеременных нагрузок, например валов, лопаток газовых турбин и т.п., резко снижаются их эксплуатационные характеристики. Качество обработки поверхности пера лопаток существенно влияет на их прочностные характеристики, так например, повышение класса чистоты поверхности способствует увеличению предела выносливости и статической прочности лопаток

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа является способ сухого электрополирования лопатки турбомашин, включающий установку обрабатываемого пера лопатки в электрод, охватывающий упомянутое перо лопатки с зазором, в котором расположена лента из ионитов, обеспечение контакта упомянутой ленты со всей обрабатываемой поверхностью упомянутого пера и с упомянутым охватывающим электродом, перемещение упомянутой ленты в упомянутом зазоре относительно поверхности упомянутого пера, подачу противоположного по знаку электрического потенциала на лопатку и внешний электрод, обеспечивающего ионный унос металла с поверхности пера лопатки

Технический результат достигается за счет того, что в способе сухого электрополирования лопатки турбомашин, включающем установку обрабатываемого пера лопатки в электрод, охватывающий упомянутое перо лопатки с зазором, в котором расположена лента из ионитов, обеспечение контакта упомянутой ленты со всей обрабатываемой поверхностью упомянутого пера и с упомянутым охватывающим электродом, перемещение упомянутой ленты в упомянутом зазоре относительно поверхности упомянутого пера, подачу противоположного по знаку электрического потенциала на лопатку и охватывающий электрод, обеспечивающего ионный унос металла с поверхности пера лопатки в отличие от прототипа осуществляют вибрационное движение лопатки и/или и охватывающего электрода, обеспечивающее равномерную обработку упомянутой поверхности пера, используют охватывающий электрод эквидистантный по форме обрабатываемому перу лопатки, а перемещение ленты осуществляют огибая ее вдоль профиля поперечного сечения пера лопатки, подавая ленту в упомянутый зазор с одной из сторон выходной кромки пера с огибанием его входной кромки и выходом из упомянутого зазора с другой стороны выходной кромки.

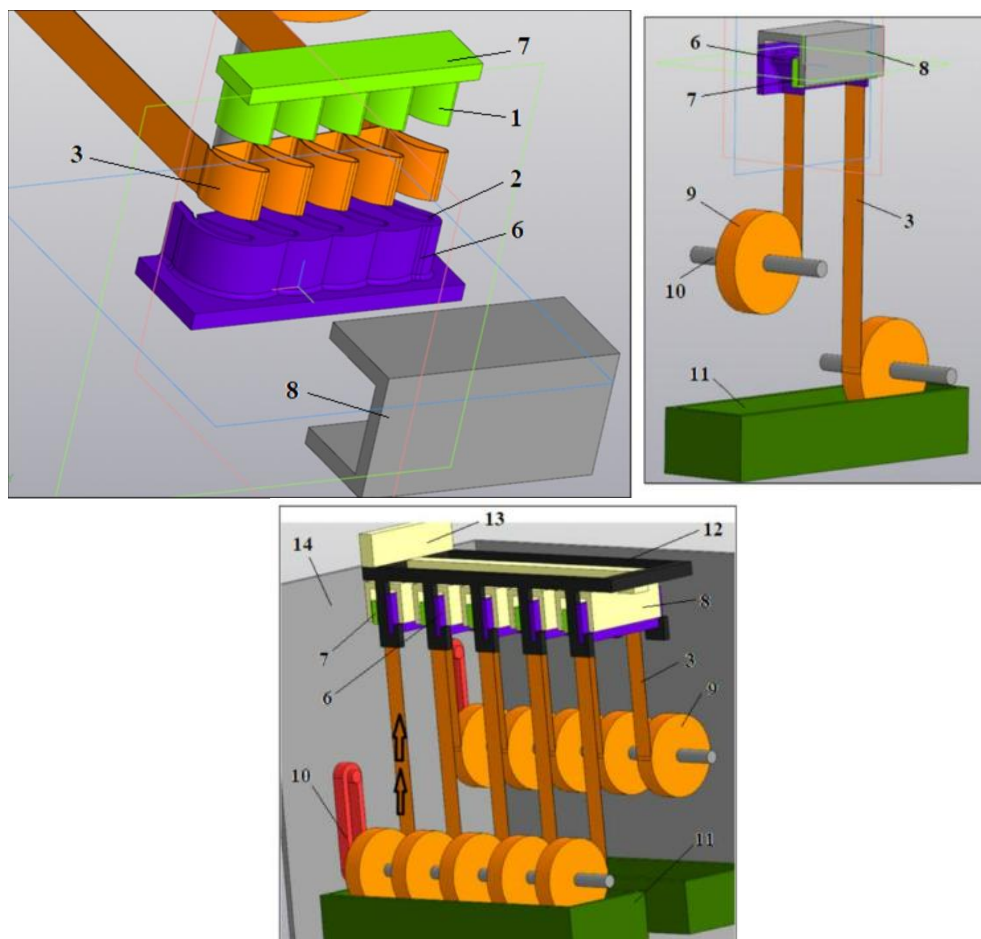


Рис. 5. Установка сухого полирования

Полирование лопаток или сектора с лопатками производят в установке для сухого электрополирования (фиг. 5), которая содержит камеру 14, внутри которой расположено, по крайней мере одно устройство для полирования содержащее (фиг. 5 и фиг. 4) держатель обрабатываемой лопатки с прижимным устройством 8, вибратор 13 со скобой 12 и внешний охватывающий электрод 2, эквидистантный по форме охватываемому перу 1 обрабатываемой лопатки, выполненный с возможностью размещения в его полости 17 обрабатываемого пера 1 лопатки с образованием между поверхностью пера 1 и охватывающего электрода 2 зазора 4. Зазор 4, необходим для предотвращения контакта между пером 1 лопатки и охватывающим электродом 2. Величина зазора 4 должна быть достаточной для продевания и перемещения в нем ленты 3 из ионитов с одновременным обеспечением контакта с поверхностью обрабатываемого пера 1 лопатки и охватывающим электродом 2. Лента 3 снабжена по боковым краям гибкими направляющими полосами 15 (фиг. б), продетыми в направляющие полости электрода 16. Направляющие полосы 15 и направляющие полости 16 обеспечивают натяжение ленты 3 в направлении продольной оси пера 1 лопатки, а также плавный отвод ленты 3 от верхнего торца пера 1 лопатки и области перехода от пера 1 к основанию лопатки. Механизм подачи и перемещения ленты 10 в зазоре 4 включает по две бобины с лентой 9, выполненные с возможностью их вращения и погружения в емкости для

регенерации 11 ленты 3. Емкости для регенерации 11 ленты 3 снабжены электродами, подключенными к электрическим источникам регенерации (не показано). Установка также снабжена источниками электропитания для электрополирования лопатки и токоподводами, выполненными с возможностью подачи противоположного по знаку электрического потенциала на охватывающий электрод 2 и обрабатываемую лопатку 1.

При полировании пера 1 лопатки (фиг. 7) в составе сектора 7 с лопатками используется пакет 6 с охватывающими электродами 2. При этом используется направляющая 21 для заправки сектора 7 с обрабатываемыми лопатками в пакет 6. Для заправки сектора с отрицательной или положительной кривизной основания пространство между охватывающими электродами 2 заполнено эластичным материалом. Эластичный материал обеспечивает при установке лопаток в пакет 6 изменение конфигурации пакета 6 согласно сечениям и расположениям лопаток в составе сектора 7 при установке перьев 1 лопаток в пакет 6.

### **Библиографический список**

1. Макаров В.Ф., Бычина Е.Н., Чуян А.О. Математическое моделирование процесса полирования лопаток газотурбинных двигателей – Авиационно-космическая техника и технология. №8 (85), 2011, с.11-14.

2. Федеральный институт промышленной собственности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fips.ru>

© Даминова Р.Х., 2023

УДК 621.9.047

Е.С. ДМИТРИЕВ

ZHENY2000X@MAIL.RU

Научн. руковод. – канд. техн. наук, доц. А.Д. МИНГАЖЕВ

*Уфимский университет науки и технологий*

### **РАЗРАБОТКА СТАНДАРТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ ДЛЯ ЭФМО (ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ)**

*Аннотация:* В данной работе описаны методы разработки оснащения для электрофизических методов обработки.

*Ключевые слова:* методы обработки, электрофизические, электрохимические, операция

Необходимость использования в авиадвигателестроения деталей из материалов с высокими физико-механическими свойствами, повышенными требованиями к качеству поверхностного слоя и точности их изготовления, но труднообрабатываемыми традиционными методами резания, привело к созданию технологий, основанных на электрофизических и электрохимических (ЭФиЭХ) методах обработки.

Составной частью обеспечения качества и надежности технологии ЭФХО обработки деталей является создание и разработки необходимого стандартизированного электрохимического оснащения.

Стандарт оснащения – это набор требований и рекомендаций, определяющих минимальный и рекомендуемый набор оборудования, инструментов и материалов, необходимых для выполнения определенной деятельности или работы. Он позволяет достичь определенного уровня качества и эффективности в процессе выполнения задачи [2].

Использование стандартных и унифицированных элементов является эффективным средством снижения стоимости проектирования изделия и его изготовления, повышения его надежности.

К средствам технологического оснащения ЭХО относятся: электрохимический станок, осуществляющий технологическую операцию; источник питания технологическим током (ИП) с токоподводами, обеспечивающими подачу напряжения на электроды; оборудование для хранения, подачи, очистки и регулирования параметров электролита; система управления работой электрохимического станка; технологическая оснастка для установки, базирования и крепления заготовок и ЭИ; устройства для отсоса из электрохимического станка выделяемых при работе газообразных продуктов, промывки заготовок и деталей (узлов) станка от остатков электролита, сушки обработанных и промытых заготовок, а при необходимости и их пассивации (в число таких устройств входит и оснастка для подачи в рабочую зону сжатого воздуха или газа) [3].

Упорядочение объектов стандартизации – универсальный метод области стандартизации продукции, процессов и услуг. Упорядочение, как управление многообразием, связано, прежде всего с сокращением многообразия. Результатом работ по упорядочению являются, например, ограничительные перечни комплектующих изделий для конечной готовой продукции; альбомы типовых конструкций изделий; типовые формы технических, управленческих и прочих документов.

В двигателестроении стандартизованы:

- 1) конструктивные элементы (резьба, проточки);
- 2) параметры (моменты затяжки резьбовых соединений, параметры химико-термической обработки);
- 3) детали (крепеж, соединения, хвостовики);
- 4) узлы и агрегаты (фильтры, соединения трубопроводов, муфты, форсунки);

- 5) системы (электросигнализация помпажа, масляные системы);
- 6) материалы и жидкости (керосин, масло);
- 7) технологические процессы (консервация, испытания).

При этом целями стандартизации являются:

— повышения уровня безопасности жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества, экологической безопасности, безопасности жизни или здоровья людей, животных и растений и содействия соблюдению требований технических регламентов;

— повышения уровня безопасности объектов с учетом риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;

— обеспечения научно-технического прогресса;

— повышения конкурентоспособности продукции, работ, услуг;

— рационального использования ресурсов;

— технической и информационной совместимости;

— сопоставимости результатов исследований (испытаний) и измерений, технических и экономико-статистических данных;

— взаимозаменяемости продукции [1].

Одним из основных направлений развития стандартизации электрохимического оснащения, в соответствии с которой проводится настоящая работа, является поиск специализированных методов унификации для авиадвигателестроения. В частности, создание унифицированных газогенераторов, т.е. газогенераторов, состоящих из таких унифицированных модулей, как компрессоры высокого давления, камера сгорания и турбина высокого давления, которые могут использоваться в составе различных двигателей [4].

#### **Библиографический список**

1. КонсультантПлюс Федеральный закон от 29.06.2015 N 162-ФЗ (ред. от 30.12.2020) "О стандартизации в Российской Федерации" Цели и задачи стандартизации Электронные данные. Режим доступа: URL.: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_181810/603e6e3a941922c255f9fdb18b3050d131b2ab7a/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_181810/603e6e3a941922c255f9fdb18b3050d131b2ab7a/)

2. Городец 870.pф Что такое стандарт оснащения? Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://xn--870-iddfg5dar7d.xn--p1ai/faq/cto-takoe-standart-osnashheniya>

3. ICQC Стандартизация и процесс стандартизации. Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://www.icqc.eu/ru/certifikacija-ce/mezhdunarodnaya-standartizacija/standardization-standardization-processhttps>

4. STUDIZBA Стандартизация и унификация при разработке ГТД Электронные данные. Режим доступа: URL.: <https://studizba.com/lectures/transport/konstrukcija-i-prochnost-aviacionnyh-dvigatelej-i-jenergeticheskikh-ustanovok/25577-standartizacija-i-unifikacija-pri-razrabotke-gtd.html>

© Дмитриев Е.С., 2023

А.Ч. МАГИЗОВ

*magizov\_alik@mail.ru*

Науч. руковод. – стар. препод. Р.К. ДАВЛЕТКУЛОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СУХОГО ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛОПАТОК ДЕТАЛИ «ЗАВИХРИТЕЛЬ»**

*Аннотация:* В данной статье рассматривается положительное влияние метода сухого электрополирования при обработке поверхностей лопаток детали типа «Завихритель». Это позволяет снизить трудоемкость изготовления детали, повысить качество требуемой поверхности лопаток, а в дальнейшем обеспечить требования к детали по проливу в окончательной сборочной единице.

*Ключевые слова:* сухое электрополирование; СЭП; полирование труднодоступных поверхностей; процесс ионного уноса материала; dry-lyte

Современные требования к точности и качеству поверхности материалов, которые применяются при изготовлении деталей для ГТД, ставят перед учеными и инженерами все более жесткие задачи. Одним из методов обработки материалов, которые используются для достижения высокой точности и качества поверхности, является сухое электрополирование. Этот метод позволяет удалять микронеровности и дефекты на поверхности заготовки путем воздействия высокочастотного тока.

Сухое электрополирование является относительно новым методом, который продолжает развиваться и совершенствоваться. В настоящее время этот метод привлекает все большее внимание ученых и инженеров в различных областях науки и техники. Однако, до сих пор этот метод не получил широкого распространения и находится больше в сфере научных исследований. В отличие от традиционных методов электрополирования, сухое электрополирование позволяет получать более высокую точность поверхности без использования химических растворов и других жидкостей. Это делает этот метод более экологически чистым и безопасным для рабочих условий.

Одним из основных преимуществ сухого электрополирования является возможность удаления микронеровностей и дефектов, которые не могут быть удалены традиционными методами полировки. Сухое электрополирование также может осуществляться на различных материалах, включая металлы, полимеры и керамику.

Сущность процесса СЭП заключается в обеспечении ионного уноса материала с поверхности детали посредством взаимодействия гранул-анионитов, содержащих внутри себя жидкий электролит, не взаимодействующий непосредственно с поверхностью детали при ее обработке, что позволило



назвать этот процесс «сухим электрополированием». Процесс СЭП происходит при наложении на обрабатываемую деталь (преимущественно катод) и внешний электрод (преимущественно анод) разности потенциалов, обеспечивающий ионный унос материала детали с выступов (микронеровностей) на ее поверхности при контакте гранул с указанными выступами (рис. 1).



Источник: Пресс-служба IQB Technologies

*Рис. 1. Завихритель*

«Завихритель» или завихритель воздуха, стабилизатор горения - это деталь узла «Камера сгорания» (топливный коллектор), которая устанавливается в горелку топливной форсунки. Основной принцип работы данной ДСЕ заключается в правильном и равномерном завихрении топливо-воздушной смеси, обеспечивающей стабилизацию пламени горения. Завихритель для перемешивания топлива и воздуха содержит множество лопаток, расположенных в радиальном направлении вокруг центральной оси завихрителя, множество смесительных каналов для перемешивания топлива и воздуха.

Для обеспечения необходимого показателя «завихрения» воздуха при изготовлении детали необходимо достичь высоких показателей качества поверхности лопаток завихрителя, которые в дальнейшем обеспечивают показатели проливов при испытании. Использование метода СЭП позволяет получить высокое качество поверхности и обработать лопатки в труднодоступных местах, а увеличенный резервуар позволяет повысить количество одновременно обрабатываемых деталей.

Сухое электрополирование может применяться для удаления поверхностных дефектов и изъянов на деталях завихрителей, таких как шероховатости, заусенцы или неровности. Путем воздействия высокочастотного тока на поверхность детали с использованием специальных электродов, можно получить более гладкую и чистую поверхность.

Преимущества сухого электрополирования для деталей завихрителей включают:

1. Удаление поверхностных дефектов: Сухое электрополирование позволяет эффективно удалять поверхностные дефекты и деформации на деталях завихрителей, что может улучшить их производительность и эффективность.

2. Улучшение гидродинамических свойств: Сглаживание поверхности детали завихрителя может улучшить ее гидродинамические свойства, такие как снижение сопротивления движению жидкости или улучшение смешивания.

3. Уменьшение трения и износа: Более гладкая поверхность детали в результате сухого электрополирования может снизить трение и износ, что может увеличить срок службы деталей завихрителей.

4. Легкость воспроизводимости: Сухое электрополирование обеспечивает возможность контролировать процесс обработки и достигать повторяемых результатов, что важно при массовом производстве деталей завихрителей.

Таким образом, использование процесса СЭП при изготовлении детали «Завихритель» позволяет достичь высоких показателей качества поверхности лопаток, снизить трудоемкость изготовления и обеспечить необходимые требования, предъявляемые данной детали.

### **Библиографический список**

1. Патент: RU2548521C2 - 20.04.2015. Завихритель, камера сгорания и газовая турбина с улучшенным перемешиванием.

2. Патент: RU2509957C2 - 20.03.2014. Завихритель, камера сгорания и газовая турбина с улучшенным завихрением.

© Магизов А.Ч., 2023

Т.Е. ПАВЛОВА

*pavlova.tanya2000@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Л.И. МАСЛОВА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ**

*Аннотация:* В данной обзорной статье описан способ магнитно-импульсной обработки (МИО), её преимущества и качества, область применения и требования к исполнителю.

*Ключевые слова:* магнитно-импульсная обработка, изготовление деталей, точность изделий, формовочная деформация

Уменьшение остаточных и усталостных напряжений, повышение твердости поверхности и износостойкости различных изделий является крайне важным вопросом в современном машиностроении. Основными направлениями улучшения являются применение новых материалов и физические методы, изменяющие физико-механические свойства уже используемых материалов инструмента. Одним из таких методов поверхностного упрочнения металлорежущего инструмента является МИО.

Импульсная штамповка – это процесс формования металла за счет передачи большого количества энергии в короткий промежуток времени. В этом случае ударника используется для создания ударной волны, которая передается на заготовку и формирует желаемую форму.

Сущность МИО заключается в том, что металлорежущий инструмент перед обработкой помещают в полость магнита, соединенного с возбудителем импульсов. При магнитном воздействии металл изменяет свои физические и механические свойства. Улучшение свойств у металлорежущего инструмента, прошедшего МИО, достигается за счет направленной ориентации свободных электронов вещества внешним полем, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводимость материала.

Преимущества импульсной штамповки включают высокую скорость и производительность, возможность обработки сложных форм и высокую точность получаемых изделий. Этот процесс также позволяет добиться равномерного распределения материала и устранить дефекты, такие как поры и трещины.

Особенностью этого процесса является использование коротких и очень мощных электрических импульсов для деформации материала.

Вот некоторые преимущества импульсной штамповки:

1. Быстрая скорость деформации: импульсные штампы способны достичь очень высоких скоростей деформации материала. Это позволяет быстро и эффективно выполнять штамповочные операции.

2. Большая энергия деформации: время импульсного воздействия относительно короткое, но его энергия очень высокая. Это позволяет генерировать большую силу деформации, что особенно полезно при работе с твердыми и прочными материалами.

3. Минимальные усилия на вспомогательные элементы: импульсным штампам не требуются длительные или интенсивные циклы работы, поэтому они обычно имеют меньшую нагрузку на вспомогательные системы, такие как электромагниты или гидравлические приводы.

4. Высокая точность и повторяемость: импульсные штампы могут предложить высокую точность и повторяемость деформации. Они могут легко контролировать величину и скорость импульсов, что позволяет получать состоятельные результаты, как при создании простых деталей, так и сложных конструкций.

5. Меньшая деформация окружающих участков: импульсные штампы способны ограничивать деформацию только в зоне контакта со штампом, таким образом, уменьшая деформацию окружающих участков. Это особенно важно при работе с деталями, требующими высокую точность и минимальную формовочную деформацию.

Импульсная штамповка используется в различных отраслях промышленности, включая автомобильную, авиационную, электронную и медицинскую. Ее преимущества включают экономию времени и ресурсов, высокую точность и повторяемость, а также возможность работы с твердыми и сложными материалами. Она также используется в производстве электронных компонентов, инструментов и других изделий.

Процесс импульсной штамповки состоит из нескольких этапов. Сначала заготовка помещается в пресс и закрепляется. Затем ударник ударяет по заготовке, передавая ей ударную энергию и формируя ее в нужную форму. После этого заготовка остывает и может быть дополнительно обработана для достижения требуемой площади поверхности и размеров.

Этот все более популярный метод, основанный на использовании электромагнитных сил (силы Лоренца), можно использовать с широким спектром металлов. Можно обрабатывать даже немагнитные металлы (алюминий, медь и т. д.), поскольку вихревые токи, индуцированные в деталях, носят временной характер (один импульс).

Эта технология представляет собой технологический прорыв, который позволяет создавать сборки или формы, которые раньше было невозможно получить, чистым, стабильным, очень эффективным и очень дешевым способом. Например, импульс мощностью в 1 кВт в республике Башкортостан обходится в промежутке от 2,25 до 4,93 рублей.

Однако следует отметить, что процесс импульсной штамповки может быть достаточно сложным и требует специального оборудования и профессиональных

навыков. Кроме того, он может быть дорогим из-за необходимости частой замены или обслуживания ударника.

В целом, импульсная штамповка является важным процессом для производства сложных и точных металлических изделий. Она обладает некоторыми преимуществами по сравнению с другими методами формования металла, и ее применение продолжает развиваться в различных отраслях промышленности.

### Библиографический список

1. Водин, Д.В. Магнитно-импульсная обработка как перспективный метод повышения износостойкости металлорежущего инструмента / Д.В. Водин. – Текст: непосредственный // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2015 г.). – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2015. – С. 67-70. – URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/126/7969/> (дата обращения: 21.09.2023).
2. Hailiang Yu, Xiaohui Cui Electromagnetic Forming / Hailiang Yu, Xiaohui Cui [Электронный ресурс] // ScienceDirect: [сайт]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/electromagnetic-forming> (дата обращения: 27.09.2023).
3. MAGNETIC PULSE SYSTEM / [Электронный ресурс] // InnovalTech: [сайт]. – URL: [https://www.pft-innovaltech.fr/en/cpt\\_tim.php](https://www.pft-innovaltech.fr/en/cpt_tim.php) (дата обращения: 30.09.2023).
4. Magnetic Pulse Forming / [Электронный ресурс] // Bmax: [сайт]. – URL: <https://www.bmax.com/technology/magnetic-pulse-forming/> (дата обращения: 05.10.2023).

© Павлова Т.Е., 2023

УДК 544.653.22

А.С. ПЕТРИКОВ  
[izhy4k@yandex.ru](mailto:izhy4k@yandex.ru)

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Р.М. САЛАХУТДИНОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## АНАЛИЗ КАЧЕСТВА КОМПОНОВОК ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВНЫХ СТАНКОВ

*Аннотация:* В данной статье рассматриваются особенности, преимущества и недостатки компоновочных решений электрохимических копирующе-прошивных вертикальных станков.

Ключевые слова: качество, компоновки, станки

На рисунке 1 схематично представлены 6 вариантов электрохимических станков вертикальной компоновки.

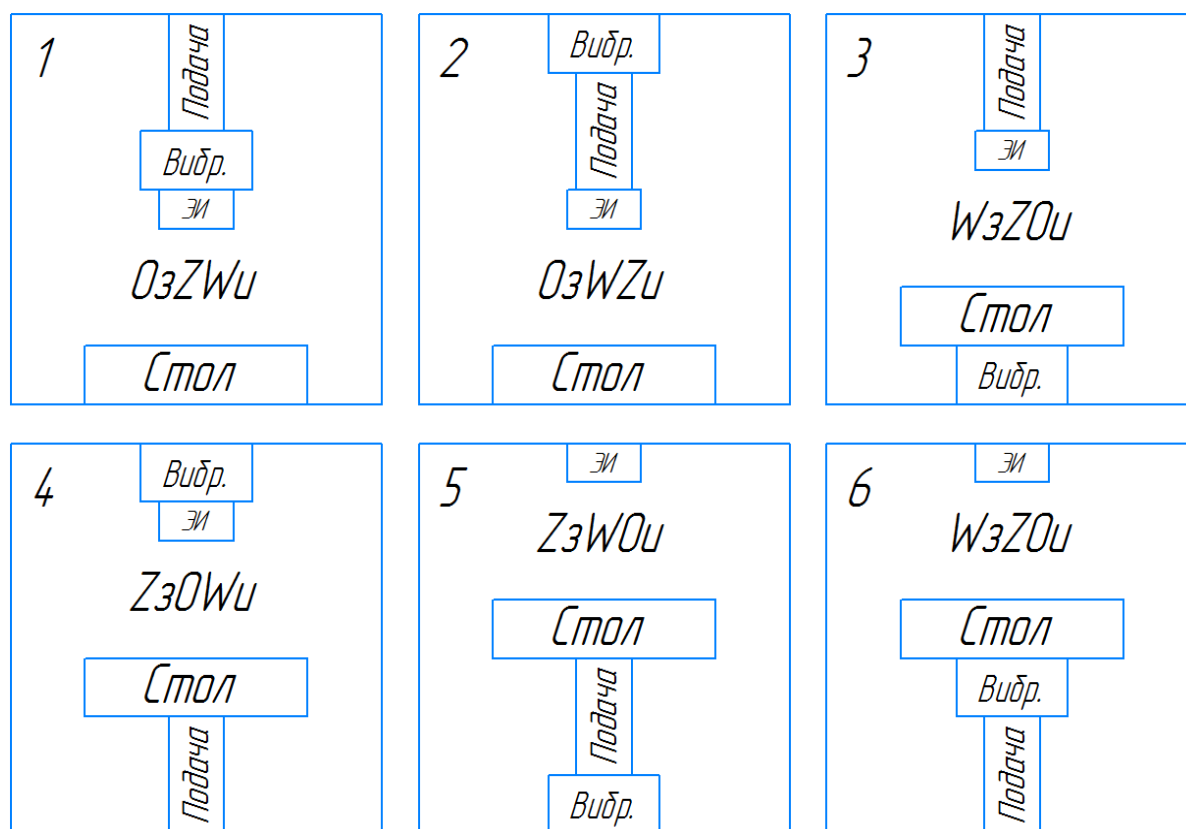


Рис. 1. Компоновки вертикальных электрохимических копировально-прошивных станков

Разберём преимущества и недостатки каждой представленной компоновки.

Самое массовое выпускаемая компоновка станков (модели ET1000). Стол неподвижен и жёстко закреплён на станине, в верхней части станины установлены салазки с вертикально-скользящей головкой, на ней расположен генератор колебательных движений, который передаёт колебательное движение закреплённому на нём электрод-инструменту (далее ЭИ).

Преимущества:

а) простота организации рабочей камеры станка, нужна всего одна гофра вокруг пиноли ЭИ;

б) простая и надёжная конструкция станины, где стол и станина могут являться одной деталью;

в) модульность конструкции, все движущиеся детали расположены в верхней подвижной головке;

г) неподвижный стол, просто организовать автопогрузку.

Недостатки:

а) низкий ресурс направляющих салазок и ходовых винтов ввиду вибрационных нагрузок;

- б) большой габарит по высоте;
- в) сравнительно низкая точность обработки;
- г) ремонт и обслуживание производится при помощи крана.

От первой отличается тем, что колеблется не только ЭИ, но и механизм подачи инструмента. Масса колеблющихся частей гораздо больше, чем у 1-й компоновки, в связи с чем потребуется существенно более мощный и тяжёлый источник колебаний, что удорожает станок.

Преимущества:

- а) простая и надёжная конструкция станины, где стол и станина могут являться одной деталью;
- б) модульность конструкции, все движущиеся детали расположены в верхней подвижной головке;
- в) неподвижный стол, просто организовать автопогрузку.

Недостатки:

- а) очень низкий ресурс направляющих салазок и ходовых винтов ввиду вибрационных нагрузок;
- б) большой габарит по высоте;
- в) сравнительно низкая точность обработки;
- г) большая масса колеблющихся частей;
- д) ремонт и обслуживание с помощью крана.

Устройство с подвижным инструментом и колеблющейся заготовкой. Ввиду того, что во всём станке тяжелее стола только станина, такое решение видится нецелесообразным, так как ещё сильнее удорожает и утяжеляет источник колебаний.

Преимущества:

- а) малый вертикальный габарит;
- б) простое и надёжное закрепление электрод-инструмента;
- в) неподвижный стол, просто организовать автопогрузку.

Недостатки:

- а) очень низкая точность обработки;
- б) очень большая масса колеблющихся частей, очень дорогой и массивный источник колебаний;
- в) подвижные уплотнения на дне рабочей камеры ведут к критическому снижению надёжности, необходимости планово снимать стол для обслуживания уплотнений, в камере образуется несливаемый остаток рабочей жидкости;
- г) невозможность работы с большими и/или тяжёлыми деталями;
- д) при изменении массы заготовки придётся подстраивать источник колебаний в процессе обработки;
- е) при повреждении уплотнений электролит зальёт источник колебаний.

По мнению автора самая удачная компоновка. ЭИ и осциллятор закреплены на станине неподвижно, что обеспечит лучшую точность и наименьшую массу колеблющихся частей.

Преимущества:

- а) высокая точность обработки;

б) возможность обработки больших и/или тяжёлых деталей без настройки источника колебаний;

в) отсутствие вибрационных воздействий на направляющие и винты подачи;

г) малый вертикальный габарит;

д) простота и удобство обслуживания источника колебаний.

Недостатки:

а) подвижные уплотнения на дне рабочей камеры;

б) подвижный стол, сложности организации автопогрузки;

в) при протечке уплотнений, электролит залёт механизм подачи;

От предыдущей отличается тем, что источник колебаний стоит между станиной и подачей стола, ЭИ прикреплён к станине жёстко.

Преимущества:

а) простое и надёжное закрепление электрод-инструмента;

б) простота и доступность ремонта и обслуживания.

Недостатки:

а) самая низкая точность обработки из рассматриваемых;

б) самая большая масса колеблющихся частей из рассматриваемых, самый дорогой и массивный источник колебаний;

в) подвижные уплотнения на дне рабочей камеры дополнительно нагружены вибрационным воздействием;

г) невозможность работы с большими и/или тяжёлыми деталями;

д) при изменении массы заготовки придётся подстраивать источник колебаний в процессе обработки;

е) самый низкий ресурс направляющих салазок и ходовых винтов ввиду вибрационных нагрузок.

От предыдущей отличается тем, что источник колебаний стоит между механизмом подачи стола и самим столом.

Преимущества:

а) малый вертикальный габарит;

б) простое и надёжное закрепление электрод-инструмента;

в) простота и доступность ремонта и обслуживания.

Недостатки:

а) очень низкая точность обработки;

б) очень большая масса колеблющихся частей, дорогой и массивный источник колебаний;

в) подвижные уплотнения на дне рабочей камеры дополнительно нагружены вибрационным воздействием;

г) невозможность работы с большими и/или тяжёлыми деталями;

д) при изменении массы заготовки придётся подстраивать источник колебаний в процессе обработки;

е) очень низкий ресурс направляющих салазок и ходовых винтов ввиду вибрационных нагрузок.



## Библиографический список

1. Житников В.П., Зайцев А.Н. импульсная электрохимическая обработка. – М.: Машиностроение, 2008. 413 с.
2. Врагов Ю.Д., Анализ компоновок металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1978. 180 с..
3. Harrington E.C. Industrial quality control, 1965. 21, № 10.

© Петриков А.С., 2023

УДК 621.98.044

Д.Р. САФИУЛЛИНА

Науч. руковод. – д-р техн. наук, проф. Н.К. КРИОНИ

*Уфимский университет науки и технологий*

### **ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ДОБАВКОЙ ЧАСТИЦ ЦИНКА ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ**

*Аннотация:* В данной статье рассматривается поверхностное упрочнение алюминиевого сплава с добавкой частиц цинка фрикционной обработкой. Описывается важность данного аспекта. Приводятся примеры различных материалов и технологий. Предлагается обработка трением с перемешиванием использовались пластины из алюминиевого сплава АДС.

*Ключевые слова:* алюминиевые сплавы, свойства, обработка, материал, методы, образцы

Механическое легирование может осуществляться методом, известным как обработка трением с перемешиванием, при котором твердые частицы Zn в растворе распределяются по пластине из алюминиевого сплава. Целью данного исследования было определение влияния объема частиц Zn на механические и физические свойства алюминиевого сплава Д16, подвергнутого фрикционной обработке с перемешиванием. Образцы представляли собой пластины из алюминия серии 11ААА. Канавку диаметром 12 мм протыкали на различную глубину, а затем частицы Zn в этих контейнерах подвергали обработке трением с перемешиванием с помощью бесштифтового инструмента диаметром 15 мм. Результаты показали, что наибольшая твердость обнаружена в самом верхнем слое заготовки, и она постепенно снижается с толщиной. Увеличение количества частиц Zn привело к увеличению твердости материала. Самая высокая твердость 87,1 НV у обработанного трением Д16 была получена при максимальном объеме Zn по сравнению с твердостью 44,5 НV, полученной для образца без добавления Zn.

Алюминиевый сплав обладает мягкими прочностными свойствами и хорошим качеством формовкостью по сравнению со сталью [1]. Усилия по улучшению механических свойств алюминия могут быть достигнуты несколькими методами, включая термическую обработку, механическую обработку, нанесение покрытия или обработку поверхности [2]. Как правило, целью этих обработок является получение желаемых свойств путем изменения микроструктуры материала [3]. Одной из таких попыток улучшить механические свойства алюминия является обработка поверхности. Такая обработка направлена на повышение коррозионной стойкости, износостойкости, электростойкости, прочности материала.

Одним из методов обработки поверхности является обработка трением с перемешиванием (FSP), которую можно использовать для улучшения механических свойств и изменения микроструктуры материала. Исследование FSP в лабораторном масштабе было проведено некоторыми исследователями. В FSP вращающийся инструмент, состоящий из буртика и штифта, погружается с определенной скоростью вращения в поверхность заготовки так, что штифт протыкает, а буртик царапает поверхность заготовки. Трение между инструментом и поверхностью заготовки приведет к возникновению теплоты трения, тем самым размягчая поверхность заготовки [6, 7]. FSP производит бездефектный материал с более мелким зерном [8]. Кроме того, FSP также улучшает обработку твердых растворов для улучшения механических свойств материалов [3].

Дополнительными частицами материала, используемыми для улучшения механических свойств в FSP, являются частицы керамики, такие как  $Al_2O_3$ , SiC,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ , TiC или легирующие элементы, такие как Cu, Ni, Zn [9, 10]. Роль керамических частиц в повышении механической прочности заключается в том, что они служат центрами зарождения затвердевания, благодаря чему размер зерна становится более мелким. Тогда как роль легирующих элементов заключается в образовании твердого раствора алюминиевого сплава, вызывающего измельчение зерна [11]. Обработка ФСП дает повышение механической прочности за счет измельчения зерна и более равномерного распределения дополнительных частиц материала, что приводит к дисперсионному упрочнению и устранению дефектов литья. Хотя результат исследования FSP получил привлекательные механические свойства и модифицированную микроструктуру материалов, с другой стороны, он имеет немало успешных практических применений в промышленном масштабе [12]. Однако не было исследований, посвященных влиянию количества дополнительных частиц Zn на механические и физические свойства алюминиевого сплава, обработанного трением с перемешиванием.

Целью данного исследования предлагается изучение влияния легирования частиц Zn на механические и физические свойства АДС, обработанного трением с перемешиванием.

Экспериментальная процедура

В методе предлагается обработка трением с перемешиванием использовались пластины из алюминиевого сплава АДС (рис.1). Предлагается установить в пластину образец, а на нижнюю платину частицы Цинка. Путем вращения образцов, регулируя длительность обработки трением, проверить получаемые параметры: твердость, толщину и т.д.

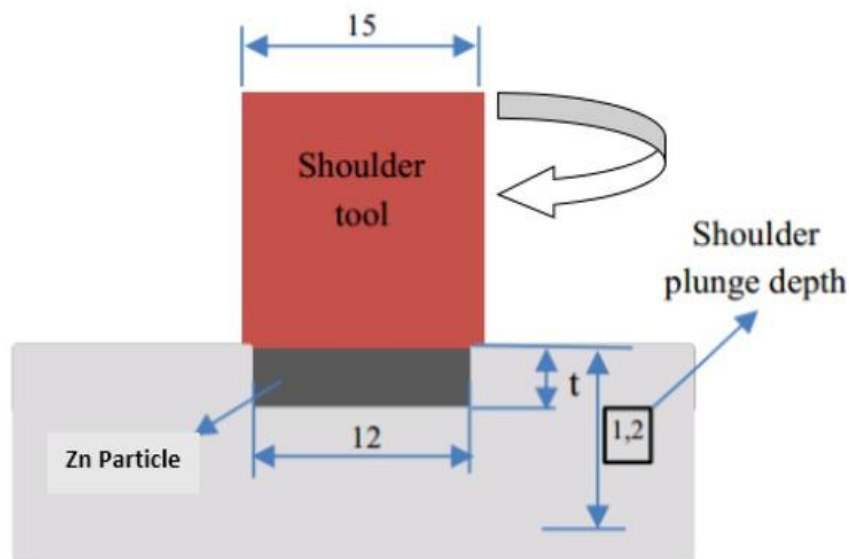


Рис. 1. Предлагаемая Принципиальная схема фрикционной обработки алюминиевого сплава с добавкой частиц Zn

Микроструктуру образца, обработанного трением и перемешиванием, предлагается измерять с помощью сканирующей электронной и оптической микроскопии.

На основании исследований проведенных по поверхностному упрочнению алюминиевого сплава АА1000 (АДС технический алюминий) предлагается изучить повышение эксплуатационных свойств алюминиевого сплава Д16 путем внедрения частиц Цинка трением по выше описанному методу. Твердость предлагается замерить по Викерсу и провести сравнительный анализ с другими способами повышения прочности алюминиевых сплавов.

### Библиографический список

1. Aurich, J.C., Mayer, P., Kirsch, B., Eifler, D., Smaga, M., Skorupski, R. Characterization of deformation induced surface hardening during cryogenic turning of AISI 347. CIRP Ann Manuf Technol. 2014; 63(1): 65-410.1016/j.cirp.2014.03.079 Search in Google Scholar
2. Ebnesajjad, S. Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding. 2nd Ed. Oxford; 2014.10.1016/B978-0-323-26435-8.00016-2 Search in Google Scholar
3. Ma, Z.Y., Sharma S.R., Mishra, R.S. Microstructural modification of as-cast AlSi-Mg alloy by friction stir processing. Met Mater Trans. 2006; A 37: 3323-1310.1007/BF02586167 Search in Google Scholar

4. Charit, I., and Mishra, R.S. Effect of friction stir processed microstructure on tensile properties of an Al-Zn-Mg-Sc alloy upon subsequent aging heat treatment. *J Mater Sci Technol.* 2018; 34(1): 214-5.10.1016/j.jmst.2017.10.021Search in Google Scholar
5. Cho, K.T., Song, K., Oh, S.H., Lee Y.K., Lim K.M., Lee, W. B. Surface hardening of aluminum alloy by shot peening treatment with Zn based ball. *Mater Sci Eng.* 2012; A 543: 44-610.1016/j.msea.2012.02.043Search in Google Scholar
6. Darras, B. M. Experimental and Analytical Study of Friction Stir Processing [Master's Theses]: University of Kentucky; 2005.Search in Google Scholar
7. Muhayat, N., Triyono, Kusharjanta, B., Handika, R.T. Effect of Preheat Temperature on Friction Stir Welded Aluminum Alloy 5052 Joints. *Applied Mechanics and Materials.* 2014: 597; 253-410.4028/www.scientific.net/AMM.597.253Search in Google Scholar
8. Kianezhad, M., and Raouf, A.H. Effect of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles and friction stir processing on 5083 TIG welding properties. *J Mater Process Technol.* 2019: 263; 356-10.10.1016/j.jmatprotec.2018.08.010Search in Google Scholar
9. Węglowski, M.S. Friction stir processing – State of the art. *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 2018: 18; 114-1610.1016/j.acme.2017.06.002Search in Google Scholar
10. Bauri, R., Yadav, D., Suhas, G. Effect of friction stir processing (FSP) on microstructure and properties of Al-TiC in situ composite. *Mater Sci Eng.* 2011: A528; 4732-8.10.1016/j.msea.2011.02.085Search in Google Scholar
11. Yadav, D., Bauri, R., Chawake, N. Fabrication of Al-Zn solid solution via friction stir processing. *Mater Charact.* 2018: 136. Dec 2017; 221-810.1016/j.matchar.2017.12.022Search in Google Scholar
12. Mishra, R.S., and Ma, Z.Y. Friction stir welding and processing. *Mater Sci Eng.* 2005: R 50; pp. 1-7810.1007/978-3-319-07043-8Search in Google Scholar
13. Muhayat, N., Triyono., Rahmanto, R.D. Effect of Tool Plunge Depth and Pin Profile on Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded AA 5052 Joints. *Journal of Mechanical Engineering.* 2018: SI 5(1); 181-11.Search in Google Scholar
14. Liu, Z., Cui, H., Ji, S., Xu, M., and Meng, X.: Improving Joint Features and Mechanical Properties of Pinless Friction Stir Welding of Al<sub>2</sub>Cu-2A12-T4 Aluminum Alloy. *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 32, pp. 1372-1377, (2016).10.1016/j.jmst.2016.07.003Search in Google Scholar
15. Shettigar, A. K., Salián, G., Herbert, M., Rao, S. Microstructural Characterization and Hardness Evaluation of Friction Stir Welded Composite AA6061-4.5Cu-5SiC (Wt %). *Defence science Journal.* 2013: 63 (4); 429-5.10.14429/dsj.63.4869Search in Google Scholar

© Сафиуллина Д.Р., 2023

В.Ю. СУЛЕЙМАНОВА

*landrumcooper.valeri@mail.ru*

Науч. руковод. – д-р техн. наук, проф. Н.К. КРИОНИ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**

*Аннотация:* Предложен новый способ электрополирования поверхности деталей сложной формы из алюминиевого сплава, в частности пера лопатки, при помощи гранул-ионитов, пропитанных раствором электролита. Выявлено, что данный способ позволяет осуществить однородную обработку деталей и исключить возникновение дефектов в виде неполированных участков.

*Ключевые слова:* электрополирование; полирование; алюминиевый сплав; гранулы-иониты; ионный унос; шероховатость

Одним из основных направлений развития современного машиностроения является оптимизация производства путем применения новых технологических решений в обработке материалов. Разработка новых авиационных двигателей и освоение их в производстве тесно связаны с особенностями этих высоконагруженных, сложных в конструктивном и технологическом смысле изделий. Использование легких алюминиевых и магниевых сплавов, высокопрочных легированных сталей и жаростойких хромоникелевых сплавов, использование титановых сплавов, композитных и других материалов требует тщательной оценки экономических показателей производства. Одной из актуальных проблем современного машиностроения является повышение качества и надежности обработки деталей из алюминиевых сплавов, преимущественно ответственных деталей сложной формы, таких как лопатки турбомашин.

Отдельное внимание уделяется окончательной обработке пера лопатки – полированию. Полирование является особо ответственным процессом, в ходе которого детали придается окончательная форма и обеспечивается требуемая шероховатость поверхности за счет инструмента и режимов обработки. При полировании не допускается отклонение геометрических форм, размеров и параметров шероховатости поверхности пера лопатки, так как в противном случае, снижается газодинамическая устойчивость и возрастают аэродинамические потери, что приводит к падению коэффициента полезного действия (КПД), а это значит, что происходит значительная потеря мощности и, как следствие, снижение экономичности двигателя. В авиационных двигателях трудоемкость изготовления этих деталей в связи с высокими требованиями к качеству поверхности (среднее арифметическое отклонение профиля от средней

линии в пределах 0,25 мм, Ra ≤ 0,32 ... 0,16 мкм) и точности геометрических форм (до 0,04 мм) очень высока. Неровности, в процессе обработки поверхностей лопаток, становятся концентраторами напряжений и могут привести к снижению усталостной прочности деталей. Очевидным является, что качество полируемой поверхности лопаток напрямую влияет на прочностные характеристики деталей. Отсюда следует, что повышение предела выносливости и статической прочности лопаток напрямую зависит от повышения класса чистоты поверхности.

В основном полирование профиля пера лопаток выполняют на полировальной бабке полировальными кругами на войлочной основе, накатанными абразивным микрошлифпорошком с применением полировальных паст, полировальной лентой из шлифовальной шкурки, а также с применением пневмошлифмашины и ручной доводкой. Данные способы окончательной обработки, несмотря на свою результативность, имеют и ряд существенных недостатков, которые ограничивают эффективность данных способов и их применимость при обработке деталей, особенно сложной формы, такие как:

- нестабильное качество инструмента;
- низкая производительность обработки;
- возможность возникновения единичных рисок, прижогов, а в последствии наволакивание материала, трещин.

В настоящее время имеют большую перспективность такие методы обработки деталей сложной формы, а именно лопаток турбомашин, как: электрохимический метод полирования, электролитноплазменное полирование и способ полирования металлических поверхностей, включающий анодную обработку в электролите. Несмотря на всю результативность, данные методы электрополирования не способны производить однородную обработку поверхности деталей, а тем более поверхности деталей сложной формы.

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа, является способ сухого электрополирования детали, включающий предварительную подготовку поверхности детали под электрополирование, погружение детали в проводящую среду из гранул-ионитов, пропитанных раствором электролита, обеспечивающего электропроводность гранул-ионитов и ионный унос металла с поверхности детали с удалением микровыступов при подаче противоположного по знаку электрического потенциала на деталь и проводящую среду через введенный в нее внешний электрод.

Однако и вышеупомянутый известный способ-прототип обладает низкой надежностью и не может быть использован для обработки поверхности ответственных деталей, например лопаток газотурбинного двигателя (ГТД), выполненных из алюминиевых сплавов, а также других деталей из алюминия, поскольку наличие электроизолирующей оксидной пленки на их поверхности препятствует протеканию электрохимических процессов ионного уноса материала с поверхности обрабатываемой детали.

В качестве решения данной актуальной проблемы предлагается способ, который позволяет повысить качество и надежность обработки деталей из

алюминиевых сплавов, особенно ответственных деталей сложной формы, таких как лопатки турбомашин.

Технический результат достигается за счет того, что в способе электрополирования детали из алюминиевого сплава, включающий погружение детали в проводящую среду из гранул-ионитов, пропитанных раствором электролита, обеспечивающего электропроводность гранул-ионитов и ионный унос металла с поверхности детали с удалением микровыступов при подаче противоположного по знаку электрического потенциала на деталь и проводящую среду через введенный в нее внешний электрод, в отличие от прототипа в качестве электролита, для пропитки гранул-ионитов используется водный раствор щелочи с рН 11-14.

Способ электрополирования детали из алюминиевого сплава, в частности поверхности пера лопатки в процессе его полирования осуществляется следующим образом.

Обрабатываемую деталь погружают в проводящую среду из гранул-ионитов, пропитанных раствором электролита (например, электролитом в виде раствора щелочи NaOH или KOH, или их смесью, обеспечивающий электролит с рН 11-14).

Электропроводность гранул-ионитов должна обеспечивает ионный унос металла с поверхности детали с удалением микронеровностей при подаче противоположного по знаку электрического потенциала на обрабатываемую деталь и проводящую среду через введенный в нее внешний электрод. При этом должен обеспечиваться электрический контакт всей полируемой поверхности детали с гранулами-ионитами, а гранул-ионитов между собой и с внешним электродом. При этом возникает интенсивное перемещение гранул-ионитов относительно друг друга, а также относительно обрабатываемой детали. Тем самым создаются благоприятные условия для протекания процессов электрохимического массообмена, что обеспечивает однородный ионный унос материала с обрабатываемой детали. Последнее обстоятельство приводит к повышению качества и производительности электрополирования.

Для повышения однородности обработки, в случае обработки деталей сложной формы дополнительно воздействуют на систему «электрод-гранулы-деталь» вибрацией и/или приводят деталь во вращение. Вибрационное движение детали относительно гранул-ионитов обеспечивается возвратно-поступательным движением детали вдоль ее продольной оси, например с частотой от 30 до 200 Гц, амплитудой от 0,1 до 2 мм.

При необходимости повышения производительности обработки, можно использовать установку для электрополирования с несколькими внешними электродами.

В качестве гранул используют ионообменные смолы полученные на основе сополимеризации либо полистирола, либо полиакрилата и дивинилбензола. Средние размеры гранул-анионитов выбирают из диапазона от 0,1 до 1,5 мм.

Электрополирование проводят либо подавая на деталь положительный, а на внешний электрод отрицательный электрический потенциал, величиной от 12

до 35 В, либо в импульсном режиме со сменой полярности, при диапазоне частот импульсов от 20 до 100 Гц, периода импульсов от 50 мкс до 10 мкс, при амплитуде тока положительной полярности во время импульса +50 А и их длительности 0,4 до 0,8 мкс, при амплитуде тока отрицательной полярности во время импульса -20 А, и их длительности 0,2 до 0,4 мкс, при прямоугольной форме выходных импульсов тока и длительности пауз между импульсами от 49,6 мкс до 9,2 мкс.

В качестве примера были проведены следующие исследования по электрополированию деталей из алюминиевых сплавов Д16 и АА2139. Неудовлетворительным результатом (Н.Р.) считался результат, при котором на полируемой поверхности не наблюдался эффект полирования или происходило недопустимое изменение геометрии пера лопатки. При отсутствии дефектов на поверхности детали результат признавался удовлетворительным (У.Р.).

При обработке исходя из условий и режимов по способу-прототипу сухого электрополирования, полирования практически не происходило из-за наличия оксидной пленки на поверхности деталей.

По сравнению с известным способом сухого электрополирования при обработке пера лопатки из алюминиевого сплава по предлагаемому способу образование дефектов в виде неполированных участков поверхности, недопустимых изменений геометрии пера лопатки практически не наблюдалось, в то время как при обработке по известному способу-прототипу полирования поверхности детали, практически не было осуществлено из-за наличия на поверхности оксидной пленки, препятствующей ионному уносу материала детали.

Таким образом, предложенный способ сухого электрополирования детали из алюминиевого сплава позволил достигнуть поставленного в изобретении технического результата – повышение качества и надежности обработки поверхности металлической детали за счет повышения однородности обработки ее поверхности, снижения вероятности появления дефектов.

### **Библиографический список**

1. Макаров, В.Ф., Бычина, Е.Н., Чуян, А.О. Математическое моделирование процесса полирования лопаток газотурбинных двигателей // *Авиационно-космическая техника и технология*. № 8 (85), 2011, 11 с.
2. Алюминий и его сплавы: учебное пособие / сост. А.Р. Луц, А.А. Суслина. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 55-62 с.
3. Демин, Ф.И., Проничев, Н.Д., Шитарев, И.Л.; под. общ. ред. проф. Ф.И. Демина. *Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей*. – 2-е изд. – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. 75 с.

© Сулейманова В.Ю., 2023



А.Р. ХАЙТКУЛОВ

*alanfrutis4@gmail.ru*

Науч. руковод. – ассистент А.А. НИКОЛАЕВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ: МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ**

*Аннотация:* В работе приведен литературный обзор по методам получения высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), в результате которого установлено, что литье является наиболее распространенным методом, это связано с технологичностью процесса. Также были оценены перспективы применения ВЭС материалов в промышленности.

*Ключевые слова:* высокоэнтропийные сплавы; сплавы; покрытие; перспективные материалы

Высокоэнтропийные сплавы – это новый класс материалов, состоящих из пяти или более элементов, равноценно размещенных в кристаллической решетке. ВЭС получили свое название из-за высокой энтропии (неупорядоченности) в своей структуре, которая обеспечивает повышенную термическую стабильность фазового состава и структурного состояния, а следовательно, свойств сплава – механических, физических, химических. [1]

Исследования по ВЭС предоставляют возможность разработки новых материалов с улучшенными свойствами. Комбинирование разных элементов в сплаве позволяет создавать материалы с уникальными химическими и физическими свойствами. Это может привести к разработке более легких и прочных материалов для авиации, автомобильной промышленности, электроники и других отраслей.

В ходе анализа высокоэнтропийных сплавов было выявлено, что наиболее распространенным методом получения является литье. Необходимо отметить, что метод литья для получения ВЭС уступает другим методам, так как имеет следующие недостатки: усадочная пористость, грубая дендритная структура, химическая неоднородность, метастабильные эвтектики по границам зерен, типичные для литой структуры, неблагоприятно отражаются на механических свойствах [2]. Появляется необходимость в дополнительной последующей обработке, а именно многократный переплав сплава и гомогенизирующий отжиг для повышения однородности химического состава. Существуют различные методы литья для получения ВЭС, рассмотрим их.

Одним из распространенных методов является вакуумно-дуговой переплав. Этот метод включает плавку элементов в вакууме при высокой температуре. При этом чистота сплавляемых элементов составляет около 99 (ат.

%). Плавка происходит в специальной печи, где создается условие создания вакуума в высокочистом аргоне с последующей разливкой в водоохлаждаемую, как правило, медную изложницу. Для обеспечения однородности по химическому составу слитки переплавляются несколько раз. Данный метод применялся в работах [3,6].

В работе [2] был применен метод индукционной плавки с последующим электрошлаковым переплавом для получения высокоэнтропийного сплава AlCoCrCuFeNi. После чего производился гомогенизационный отжиг при температуре 960°C в течение 50 часов. Для улучшения микроструктуры применялась всесторонняя горячая ковка при температуре 950°C в трех ортогональных направлениях (a-b-c ковка). В результате чего дендритная структура сплава трансформировалась в рекристаллизованную дуплексную структуру (рис. 1). Объемная доля ОЦК фазы возрастает до ~60%, а доля ГЦК фазы уменьшается до ~ 40 % (с исходным литом состоянием 53% и 47% соответственно).

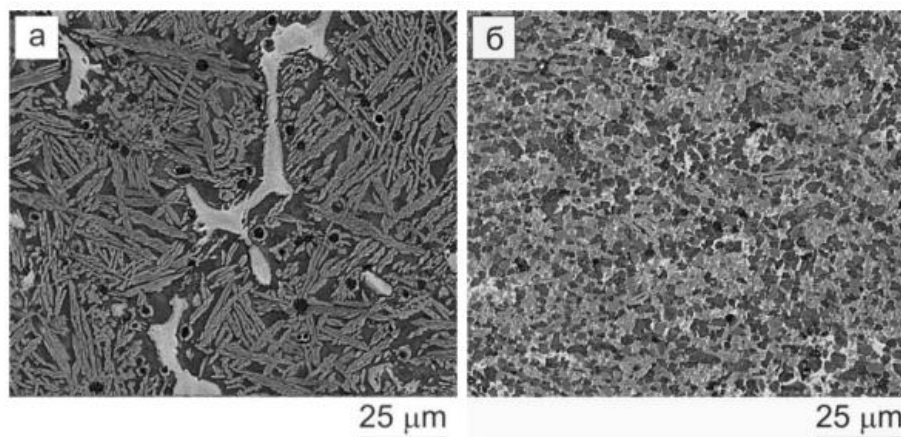


Рис. 1. Микроструктура сплава AlCoCrCuFeNi в (а) литом и (б) ковном состоянии

Наряду с литьем, одним из распространенных методов получения ВЭС является механическое сплавление. Данный метод позволяет получать химически и структурно однородные материалы. Суть процесса состоит в том, что частицы порошка захватываются между мелющими телами и подвергаются процессу деформации и/или разрушения, а конечная химическая однородность зависит от механического поведения исходных компонентов порошка [5]. Этот процесс может производиться в планетарных мельницах, в которых имеются 3 или 4 барабана, вращающиеся вокруг центральной и одновременно вокруг собственных осей в противоположном направлении (подобно движению планет вокруг Солнца) (рис. 2).

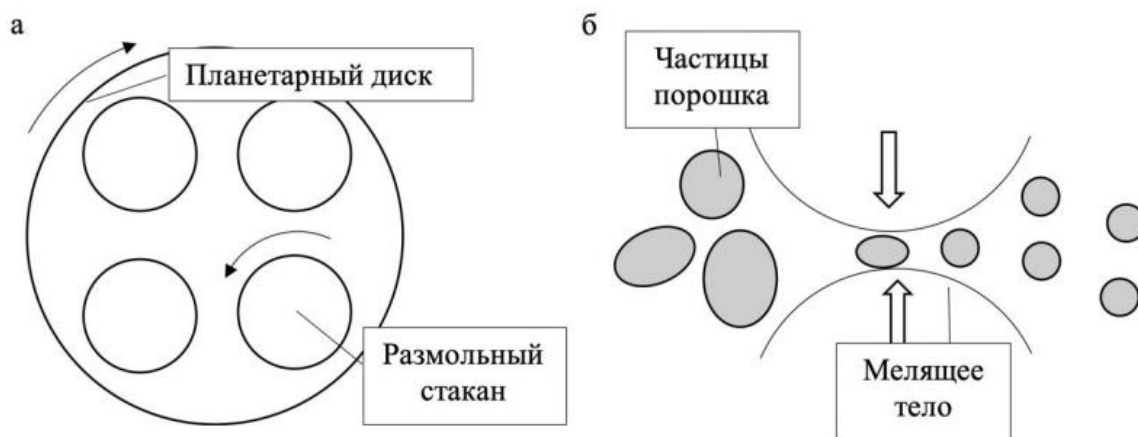


Рис. 2. (а) Схема устройства планетарной мельницы; (б) процесс механического сплавления порошков (стрелками показано направление движения мелящих тел)

Преимущества: данный метод позволяет обеспечить высокую однородность состава сплава.

Недостатки: необходимость использования агента, предотвращающего склеивание частиц порошка, однако загрязняющего состав порошка. Возможные потери материала, связанные с трением.

Одним из перспективных способов получения ВЭС является аддитивное производство. В работе [4] был изготовлен образец высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni методом послойного осаждения на стальную подложку по технологии проволоочно-дугового аддитивного производства в атмосфере инертного газа (Ar – 99,99%) (рис. 3). В качестве исходного материала была использована многокомпонентная проволока, состоящая из трех жил различного элементного состава. После осаждения проводили электронно-пучковую обработку. В результате исследований было выявлено, что образцы имеют высокий предел прочности (1400-1900 Мпа), но низкую микротвердость, составляющую  $474 \pm 8$  HV.

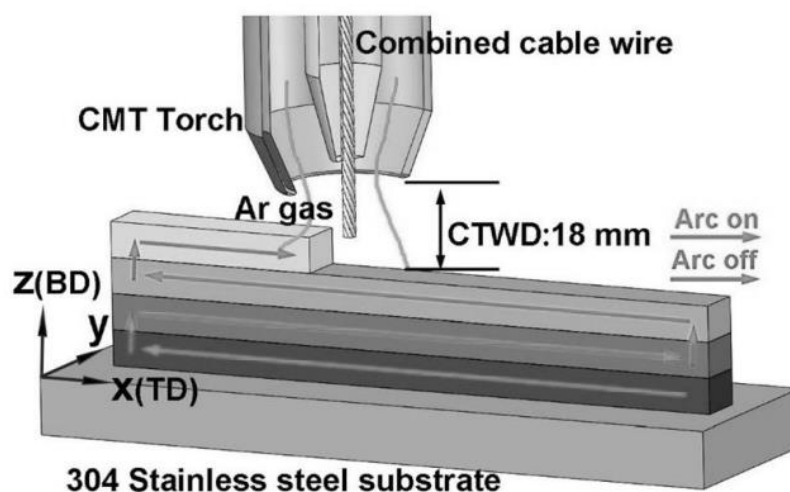


Рис. 3. Схема процесса проволоочно-дугового аддитивного производства для получения высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni [7]

К преимуществам метода можно отнести более производительный процесс, за счет высокой скорости осаждения. Низкая стоимость исходного сырья (проволоки), по сравнению с порошком.

Недостатки: высокие напряжения, вызываемые температурным градиентом. Высокая шероховатость поверхности. Наличие пор.

Помимо получения объемных высокоэнтропийных сплавов, существуют методы по нанесению покрытий из ВЭС. Лидирующими методами являются лазерная наплавка и магнетронное распыление.

#### *Область применения ВЭС*

В зависимости от компонентов, входящих в сплав, их содержания и структуры высокоэнтропийные сплавы могут обладать необходимыми свойствами, которые удовлетворяют поставленным задачам. Так, некоторые ВЭС могут служить в качестве инструментов, пресс-форм, штампов, механических частей и деталей печей, которые требуют высокой прочности, термостойкости, сопротивления окислению и износу [5]. Высокоэнтропийные сплавы могут использоваться для создания легких и прочных материалов для строительства самолетов, ракет и спутников. Они могут обладать высокой прочностью и термической стабильностью, что делает их подходящими для экстремальных условий в различных агрессивных средах. Одной из перспективных областей применения ВЭС, нитридных и карбидных покрытий на их основе является биомедицина. Помимо биосовместительности и высоких механических свойств защитные покрытия ВЭС должны обладать высокой химической стабильностью, износо- и коррозионной стойкостью в физиологических средах, высокой адгезией к поверхности, на которую осаждаются покрытия [8]. В обзоре [9] отмечается, что ВЭС могут быть использованы в ядерной энергетике, так как обладают высокой стойкостью к облучению [10], в качестве тугоплавких, магнитомягких материалов, а также материалов, используемых в металлообрабатывающей промышленности. В аэрокосмической промышленности могут найти применение ВЭС благодаря коррозионной стойкости, а также как материалы для хранения водорода [11, 12]. Также высокоэнтропийные сплавы могут использоваться в электронике для создания материалов с уникальными электрическими и магнитными свойствами. Они могут быть применены в полупроводниковых устройствах, магнитных датчиках и других электронных компонентах.

Подводя итоги, можно сказать, что область применения высокоэнтропийных сплавов не ограничивается вышеперечисленным. Со временем будут разрабатываться новые комбинации ВЭС, что будет делать этот класс материалов более широко используемым в различных отраслях промышленности.

## Библиографический список

1. Фирстов С.А. и др. Новый класс материалов: высокоэнтропийные сплавы и покрытия // Вестник российских университетов. Математика. – 2013. – Т. 18. – № 4-2. – С. 1938-1940.
2. Кузнецов А.В. и др. Влияние микроструктуры на механические свойства при растяжении высокоэнтропийного сплава AlCoCrCuFeNi // Прикладная математика & Физика. – 2012. – Т. 27. – № 11 (130). – С. 182-196.
3. Башев В.Ф., Кушнерев А.И. Структура и свойства литых и жидкозакаленных высокоэнтропийных сплавов системы Al-Cu-Fe-Ni-Si // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118. – № 1. – С. 42-50.
4. Иванов Ю.Ф. и др. Исследование структуры и свойств высокоэнтропийного сплава AlCoCrFeNi после электронно-пучковой обработки // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 154-164.
5. Громов В.Е. и др. Высокоэнтропийные сплавы. – 2021.
6. Шайсултанов Д.Г. и др. Влияние термической обработки на структуру и твердость высокоэнтропийных сплавов CoCrFeNiMnV<sub>x</sub> (x= 0.25, 0.5, 0.75, 1) // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118. – № 6. – С. 610-621.
7. Shen Q., Kong X., Chen X. Fabrication of bulk Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy using combined cable wire arc additive manufacturing (CCW-AAM): Microstructure and mechanical properties // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Т. 74. – С. 136-142.
8. Громов В.Е. и др. Применение высокоэнтропийных сплавов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 10. – С. 747-754.
9. Осинцев К.А. и др. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 249-258.
10. Egami T. et al. Irradiation resistance of multicomponent alloys // Metallurgical and materials transactions A. – 2014. – Т. 45. – С. 180-183.
11. Kuncce I., Polanski M., Bystrycki J. Structure and hydrogen storage properties of a high entropy ZrTiVCrFeNi alloy synthesized using Laser Engineered Net Shaping (LENS) // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. – Т. 38. – № 27. – С. 12180-12189.
12. Kao Y. F. et al. Hydrogen storage properties of multi-principal-component CoFeMnTi<sub>x</sub>VyZr<sub>z</sub> alloys // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Т. 35. – № 17. – С. 9046-9059.

Б.И. ШАКИРОВ

*bylat-ufa@mail.ru*

Науч. руковод. – А.В. АСЛАНЯН

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Аннотация:* К числу наиболее актуальных и острых проблем, возникающих при организации процесса резания в автоматизированном производстве, является проблема прогнозирования и управления формообразованием стружки, что возможно при обоснованном выборе рациональной конструкции СМП режущего инструмента и назначения режимов резания на основе прогнозирования формы стружки и процесса ее дробления.

*Ключевые слова:* резание металлов, сменная многогранная пластина (СМП), передняя поверхность, режущая кромка, дробление стружки

В современном машиностроении с увеличением скоростей резания и автоматизацией механической обработки ужесточились требования к надежности и стабильности процесса формирования и дробления стружки, особенно при точении материалов с высокими эксплуатационными характеристиками, образующих сливную стружку.

В условиях скоростного чистового точения стружка имеет малую толщину и формируется при высоких температурах, что затрудняет ее дробление. В настоящее время устойчивое дробление стружки при чистовом точении достигается путем использования резцов, оснащенных сменными многогранными пластинами (СМП) со сложной формой передней поверхности.

Стружка, неблагоприятная с точки зрения ее удаления из зоны резания и от станка, является фактором, резко снижающим эффективность и надежность автоматизированной механической обработки, а в ряде случаев, ставящим под сомнение возможность автоматизации и роботизации производства. Образование неблагоприятной формы стружки приводит к снижению стойкости инструмента и качества обработанной поверхности детали, является причиной поломок инструмента, препятствует механизации вспомогательных процессов уборки и транспортировки стружки. В условиях, когда операции установки, обработки, контроля и снятия детали выполняются автоматически, попадание длинной сливной стружки на резцедержатель, патрон или измерительные позиции станка приводит к погрешностям переустановки заготовок или инструмента, изготовлению бракованных деталей или вообще сбою загрузочных и измерительных механизмов оборудования.

Также, проблема управления стружкообразованием имеет и свой социально-экономический аспект. Стружка, нагретая до высокой температуры, имеющая острые кромки и перемещающаяся с большой скоростью, становится потенциальным источником травматизма для оператора-станочника и обслуживающего персонала. По данным НИИ труда, травмы по порезам лентообразной стружкой, например, составляют 17,5% общего числа несчастных случаев при работе на токарных станках. Тяжесть травм возрастает с увеличением сечения стружки.

Повышение производительности и снижение себестоимости при одновременном обеспечении требуемого качества обработанной поверхности чистой токарной обработки возможно при обоснованном выборе рациональной конструкции СМП и назначения режимов резания на основе прогнозирования формы стружки и процесса ее дробления.

Технологические возможностями современного инструментального производства позволяют спроектировать СМП принципиально новых конструкций, с выбором новых форм, как передней, так и задней поверхностей и, соответственно, режущей кромки, при этом решая задачи обеспечения дробления стружки.

Передняя поверхность современных сменных многогранных пластин, состоит из сопряженных между собой вогнутых, плоских и выпуклых участков. Каждый из этих участков может быть непрерывным, т.е. располагаться по периметру режущей кромки, или локальным - отдельно стоящим в строго определенном месте. Форма, размеры и месторасположение отдельных участков передней поверхности СМП, определяются функциями, которые они выполняют в процессе срезания припуска. Каждый из таких участков может одновременно выполнять одну или несколько функций в процессе резания или менять их при изменении условий обработки.

Достижения в области изучения процесса стружкодробления и этапы развития теории можно проследить по результатам исследований, выполненных зарубежными и отечественными школами резания материалов.

Так, в Тульском государственном университете разработана методика проектирования передней поверхности СМП, основанная на принципе коррекции существующей формы передней поверхности для условий конкретного производства.

Известно, что для чистовых режимов обработки изменение главного угла в плане  $\phi$  для СМП стандартного исполнения при выполнении условия  $t \leq R$  не приводит к изменению параметров поперечного сечения срезаемого слоя. При этом изменяется положение стружкозавивающих элементов относительно направления схода стружки.

Соответственно, изменяются условия контакта стружки со стружкозавивающими элементами, что приводит к изменению параметров витка и траектории ее движения и, как следствие, условий дробления. На рисунке 1 приведены образцы стружки, полученной при чистовом точении заготовки из стали 45Х резцом, оснащенным пластиной CNMG120408–FH. Анализ образцов

стружки показал, что варьирование значением угла  $\phi$  можно использовать как технологический прием, позволяющий управлять параметрами витка стружки и траекторией ее движения, что расширяет потенциально возможный диапазон режимов резания с дроблением стружки. Такой технологический прием положен в основу экспресс-методики проектирования передней поверхности СМП.

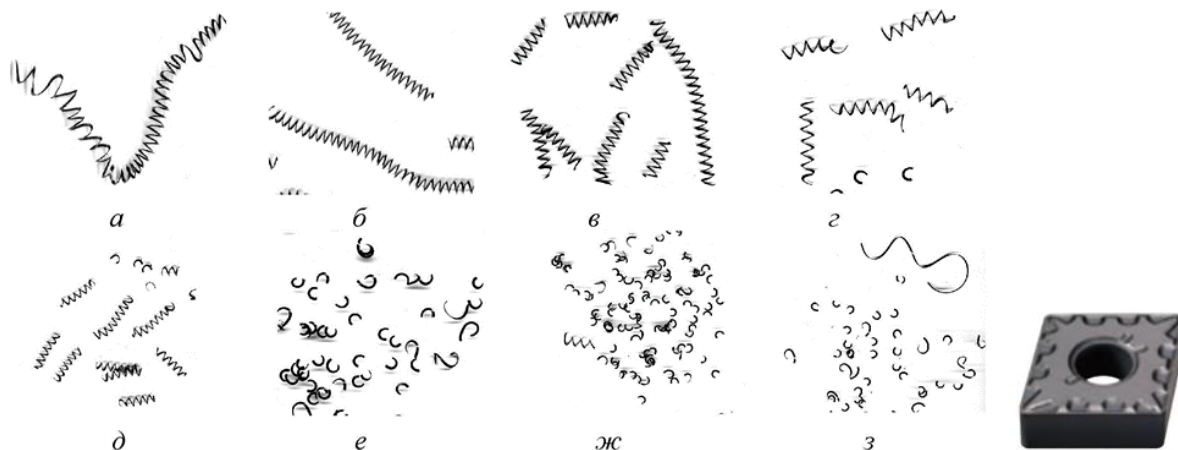


Рис. 1. Образцы стружки, полученные при точении стали 45Х резцом оснащенной СМП CNMG120408–FH при  $v=204$  м/мин,  $s=0,15$  мм/об,  $t=0,5$  мм и  $\phi$ : а –  $90^\circ$ ; б –  $85^\circ$ ; в –  $80^\circ$ ; г –  $75^\circ$ ; д –  $70^\circ$ ; е –  $65^\circ$ ; ж –  $60^\circ$ ; з –  $55^\circ$

В результате моделирования процесса дробления стружки установлено, что решение проблемы стружкодробления на этапе проектирования технологического процесса может быть обеспечено путем управления формой и траекторией движения стружки за счет выбора режимов резания и геометрии инструмента. С этой целью необходимо установить взаимосвязь технологических условий резания с формой стружки, т.е. оптимизировать стружкодробление путем изменения глубины резания, подачи или геометрии пластины. На рисунке 2 приведен график рекомендованных режимов резания при обработке сталей в зависимости от качества обработки.

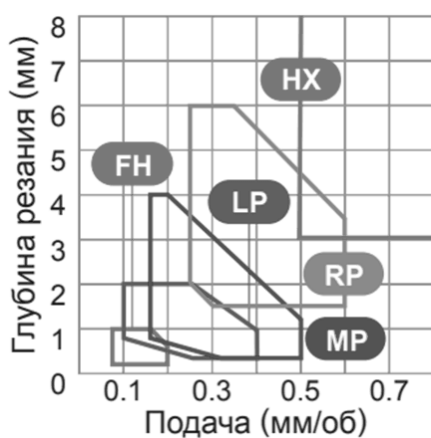


Рис. 2. Рекомендованные режимы резания при обработке сталей



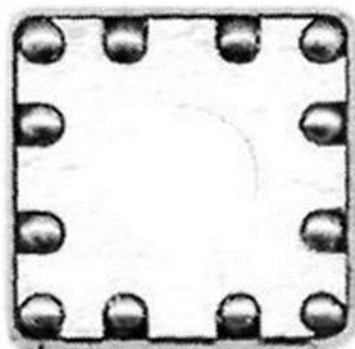
Современный уровень развития технологии изготовления твердосплавных инструментов предоставляет возможность проектировать рабочие поверхности СМП любой формы. Разнообразие форм передней поверхности СМП у зарубежных фирм-изготовителей указывает на то, что нет единого взгляда на процесс стружкодробления и общего теоретического обоснования их проектирования.

Техническая информация, которой сопровождают свою продукцию зарубежные фирмы-изготовители, носит рекомендательный характер, что не позволяет достоверно оценивать эксплуатационные возможности предлагаемых СМП. Методики проектирования режущих поверхностей СМП являются промышленными секретами зарубежных фирм изготовителей.

Отсутствие на этапе проектирования технологической операции научно обоснованных рекомендаций, направленных на превентивное решение задачи о дроблении стружки, снижает эффективность использования дорогостоящего инструмента и оборудования. Поэтому теоретическое и экспериментальное исследования процесса дробления стружки и обоснование практических рекомендаций по проектированию СМП для оснащения токарных резцов при чистовом точении пластичных материалов и сплавов является актуальной задачей.

Одним из перспективных направлений повышения стабильности геометрических параметров стружкозавивающих элементов и снижения силы в процессе резания является использование конструкций пластин, на передней поверхности которых имеются ротационные элементы, выполненные в виде шара, цилиндра или конуса. Количество, место расположения и размеры ротационных элементов оказывают влияние на процесс стружкообразования и определяют стружкодробящую способность режущей пластины.

В процессе точения срезаемая стружка контактирует с поверхностью ротационных элементов и вызывает их вращение. Следовательно, сила трения стружки о переднюю поверхность пластины, оснащенной ротационными элементами, меньше, чем стандартных пластин (рис. 3).



*Рис. 3.* Опытная режущая пластина с ротационными элементами

Таким образом, использование СМП с ротационными элементами на ее передней поверхности позволяет снизить силу резания, повысить стойкость и обеспечить устойчивое дробление стружки в широком диапазоне режимов резания.

Обобщая анализ конструкций современных СМП, можно делать вывод о том, что наиболее перспективным направлением решения проблемы дробления стружки является создание специальных форм передней поверхности СМП со стружкозавивающими элементами. Использование сложнопрофильной формы режущей кромки, в том числе локального выступа на передней поверхности обеспечивает возможность управления траекторией движения стружки, расширяет диапазон режимов резания, при которых имеет место устойчивое дробление стружки при обработке сталей. Этот способ управления формированием стружки заложен во многих конструкциях передней поверхности СМП.

### **Библиографический список**

1. Хлудов С.Я. Управление качеством чистового точения на основе выбора рациональной формы и геометрических параметров передней поверхности режущей пластины / А.В. Благовещенский, О.И. Борискин, Ю.А. Хайкевич, В.С. Хлудов, С.Я. Хлудов. – Тула: Гриф и К, 2007. – 208 с.
2. Хлудов С.Я. Механизмы стружкодробления при точении / С.Я. Хлудов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – 152 с.
3. Хлудов С. Я. Исследование работоспособности резцов, оснащенных СМП с видоизмененной формой режущей кромки и ротационными элементами / С.Я. Хлудов, О.И. Борискин, В.В. Беляев, И.Е. Денисов, Ю.А. Хайкевич. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – 168 с.
4. Васин С.А., Иванов В.В. Стружкодробление при точении / С.А. Васин, В.В. Иванов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2001. – 151 с.
5. Петрушин, С.И. Методика проектирования стружколомающих элементов на передней поверхности режущей части инструментов / С.И. Петрушин, М.А. Корчуганова. – М: Вестник машиностроения, 2000. № 6. – С. 383

© Шакиров Б.И., 2023

Г.И. ИСКУЖИНА

*guliskuzhina15@mail.ru*

Науч. руковод. – преподаватель отделения СПО филиала ФГБОУ ВО УУНиТ в г. Кумертау «Авиационный технический колледж» Т.А. ЗАКУРДАЕВА

***Отделение СПО филиала ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау «Авиационный технический колледж»***

## **РАЗРАБОТКА ГРУППОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЯ И КОНТУРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Аннотация:* Рассмотрена основная информация об энергетических инструментах, широко применяемых при обработке материалов, изучена характеристика лазерных установок и технологических систем для резки материалов, а также их применение в условиях машиностроения, разработан групповой технологический процесс для обработки отверстия и контура с выбором видов и средств технологического контроля, режимов резания и нормированием операций.

*Ключевые слова :* энергетический инструмент, лазерные технологические системы, групповой технологический процесс, средства технологического контроля

Энергетический инструмент – это инструмент, представляющий собой сформированный поток энергии с присущими ему характеристиками и свойствами, способный выполнять разнообразные виды работ.

В ряде инструментов, рожденных сформированными потоками энергии, наиболее универсальным является лазерный энергетический инструмент. Он применяется почти во всех сферах жизнедеятельности человека, в том числе и в области машиностроения, как рабочий агент, непосредственно выполняющий требуемые операции.

Для реализации лазерной технологии созданы различные лазерно-технологические системы (ЛТС). ЛТС – это комплекс, включающий лазер, формирующий рабочий инструмент, равно пригодный для обработки различных материалов и осуществления разнородных процессов и устройств для программного перемещения луча или заготовки.

Структурная схема ЛТС показана на рисунке 1. ЛТС состоит из следующих узлов: излучателя (генератора) 1, отключающего зеркала 2, энергетического канала 3 (оптической системы для транспортировки и формирования лазерного излучения), средства наблюдения 4, оптической фокусирующей системы 5, технологического газа 6, рабочего стола 8, узла управления рабочими органами

системы 9, источника энергетического питания 10, а также самой обрабатываемой детали 7.

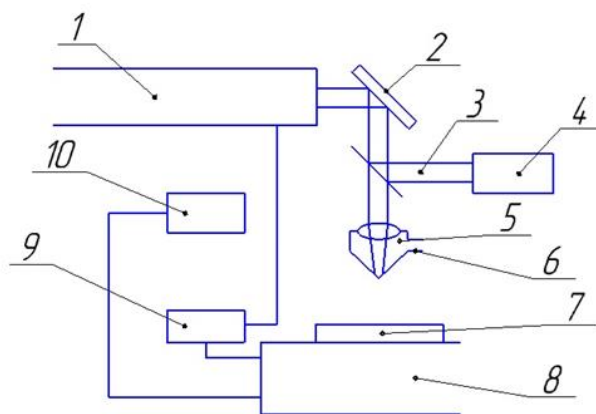


Рис. 1. Структурная схема лазерной технологической системы

Генерируемое лазером излучение первоначально распространяется через свободное пространство между срезом выходного окна излучателя и фокусирующей линзой рабочей головки, проходя через которую фокусируется и формируется в инструмент с определённой концентрацией энергии на его рабочем участке.

Лазер, как правило, состоит из трех основных узлов: источника энергии (механизма или системы накачки); активного (рабочего) тела, которое подвергается «накачке», что приводит к его вынужденному излучению; а также оптического резонатора (системы зеркал), обеспечивающего усиление вынужденного излучения активного тела.

На рисунке 2 изображено начало процесса воздействия сфокусированного пучка лазерного излучения на материалы.

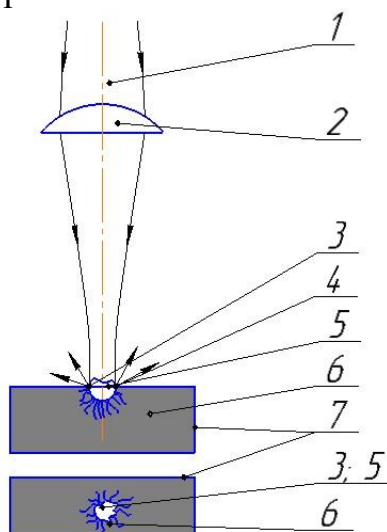


Рис. 2. Начальная фаза воздействия сфокусированного пучка лазерного излучения на материалы: 1 – лазерное излучение;

2 – фокусирующая линза; 3 – пятно воздействия сфокусированного пучка лазерного излучения на материал; 4 – испарение материала; 5 – плавление материала; 6 – тепловое воздействие; 7 – заготовка

В настоящее время для обработки материалов лазеры применяются в процессах резки, обработки отверстий, термообработки, сварки, легирования и нанесения покрытий. Кроме того, ведутся работы по использованию лазерных технологий в качестве дополнительного инструмента при механической обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Лазерная резка относится к гибко перестраиваемым технологиям и применяется не только при производстве заготовок с дальнейшими операциями для повышения точности получаемых поверхностей заготовок, но и как конечная операция изготовления деталей, исключающая дальнейшую механическую обработку.

Лазерная обработка отверстий наиболее эффективна при изготовлении небольших (до 1 мм) отверстий в труднообрабатываемых материалах, например, в алмазных фильерах, рубиновых часовых камнях, а также в труднообрабатываемых материалах, применяемых в машиностроительном производстве: в конструкционной легированной стали 30ХГСА, в алюминиевых сплавах – в дюралюминии Д164АМ, в хромомарганцевоникелевой коррозионностойкой стали 12Х17Г9АН4-М.

Как правило, отверстия до 1 мм получают за счет копирования формы сфокусированного пучка лазерного излучения, а отверстия более 1 мм – за счет обработки по кольцевому контуру.

Одним из первых технологических применений лазеров была обработка отверстий на установке «RP 1500 DC 025» с применением группового технологического процесса, который представлен в таблицах 1, 2.

*Таблица 1*

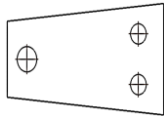
Маршрут обработки листовых заготовок на лазере «RP 1500 DC 025»

Номер операции	Наименование и содержание операции	Оборудование
1	2	3
000	<b>Транспортирование</b> Получить металл и перевезти на рабочее место	Кран-балка
005	<b>Входной контроль</b> Проверить марку материала. Проверить сечение материала S Проверить поверхности листов на отсутствие механических повреждений, визуально. Чёрный металл проверять на стилоскопе 100%	Контрольный стол Стилоскоп СЛ-13 ШЦ-125-0,1 ГОСТ 166-89 Микрометр МЛ 0-25 ГОСТ 6507-90
010	<b>Лазерная резка</b> Заготовку протереть до установки на паллеты. Детали располагать и резать по волокну перпендикулярно. Установить заготовку на паллеты. Перед использованием газа под высоким давлением, проверить есть ли линза	«RP 1500 DC 025» Ветошь

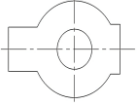

	высокого давления. Лист-заготовка должен быть заземлён через поверхность, на которой он расположен. Подготовить установку к работе согласно инструкции. Вырезать деталь по программе. Снять деталь и остатки заготовки	
015	<p><b>Контроль</b></p> <p>Проверить геометрические размеры по контуру детали окон, отверстий, пазов согласно ШЗ, ШРД, ШК, ШР, ШРД с ШВК.</p> <p>Отклонение от шаблона <math>\pm 0,5</math> мм на сторону. Проверить координаты отверстий по шаблону, смещение н. о.; ш. о.; и. о. относительно шаблона <math>\pm 0,5</math> мм. Смещение б. о.; к. о.; с. о. <math>\pm 0,2</math> мм</p> <p>Проверить размеры отверстий.</p> <p>Проверить геометрические размеры согласно чертежу, эскиза.</p>	<p>Контрольный стол</p> <p>Шаблоны</p> <p>Микрометр МЛ 0-25 ГОСТ 6507-90</p> <p>ШЦИ-125-0,1 ГОСТ 166-89, ШЦИ-160-0,05 ГОСТ 166-89, ШЦИ-250-630-0,1 ГОСТ 166-89</p> <p>Линейка 0÷500; 0÷1000 ГОСТ 427-75</p>
020	<p><b>Маркирование</b></p> <p>Маркировать деталь согласно СТО010-2010</p>	<p>Маркировочный стол</p> <p>Бирка металлическая</p> <p>молоток слесарный ГОСТ 2310-77</p> <p>клеймо ударное ПО-5 7858-0007</p>
025	<p><b>Окончательный контроль</b></p> <p>Проверить наличие и правильность заполнения сопроводительной документации, качество внешней поверхности по ТТП 70.0224.00714.</p> <p>Правильность маркировки и наличие клейм БТК.</p> <p>Клеймить согласно СТО 010-2010</p>	<p>Контрольный стол</p> <p>Клеймо БТК (ударное, резиновое)</p>
030	<p><b>Упаковывание – транспортирование</b></p> <p>Детали переложить бумагой и транспортировать в таре на склад</p>	<p>Бумага обёрточная ГОСТ 8273-75</p> <p>Тара 6999-8456</p>

Таблица 2

Операционные эскизы группового технологического процесса резки  
листовых заготовок на лазере «RP 1500 DC 025»

Операционный эскиз и наименование детали	Марка материала и обрабатываемые поверхности	Количество деталей	Размеры заготовок	Нормирование операции			Технологическое условие
				Протирка, Т <sub>п.з.</sub>	Лазерная резка, Т <sub>о</sub>	Контроль, Т <sub>в</sub>	
1	2	3	4	5	6	7	8
342-8411-70 скоба 	ЛБ-ПН-2 ГОСТ 19904-74 30ХГСА-3 мм ГОСТ 11268-76 1 отверстие $\varnothing 22,2^{+0,52}$ 2 отверстие $\varnothing 8,2^{+0,36}$ S=2,0 <sup>-0,17</sup> ШРД с ШВК	3	220×110	0,247'	t <sub>м</sub> =2' P <sub>л</sub> =6000 мм P <sub>д</sub> =660 мм	0,21' 0,30' 0,14' 0,27'	ТУ №2836-2013 Детали подавать обработке по контуру на лазерной установке. Вскрыть 2 отверстия $\varnothing 8,2$ ; $\varnothing 22,2$ по ТУ №2364-13
Итого				0,247'		0,92'	

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
342-8411-877 шайба 	ЛБ-0,8 ГОСТ 19903-74 30ХГСА-3 мм ГОСТ 11268-76 1 отв. $\varnothing$ $14,5^{+0,43}$ $S=0,8^{-0,11}$ ШРД с ШВК	3	70×50	0,247'	$t_M=1'$ $R_{\text{л}}=6000$ мм $R_{\text{д}}=240$ мм	0,21' 0,30' 0,14' 0,27'	ТУ №2835-2013 Детали подавать обработке по контуру на лазерной установке. Вскрыть отверстие $\varnothing$ 14,5
						Итого	
342-8703-2832-3 обшивка 	Д164АМ $\neq$ 1,2 <sup>0,25</sup> ГОСТ 190246-77 2 отверстия $\varnothing$ $3,0^{+0,25}$ ШРД	2	860×450	0,418'	$t_M=5'$ $R_{\text{л}}=11000$ мм $R_{\text{д}}=2620$ мм	0,31' 0,39' 0,14' 0,35'	ТУ № Заготовки подавать в развёртке согласно чертежу, ШРД. Подавать с образцами под точечную сварку $25 \times 100=10$ штук на партию 10 деталей
						Итого	



1	2	3	4	5	6	7	8
342-8704-2821-3 обшивка	Д164АМ≠1, 2 <sup>-0,25</sup>  ГОСТ 190246-77  2 отверстия ∅ 3,0 <sup>+0,25</sup>  ШРД	2	900×46 0	0,418'	t <sub>м</sub> =4'  R <sub>л</sub> =11 000 мм  R <sub>д</sub> =2 720 мм	0,3 1' 0,3 9' 0,1 4' 0,3 5'	ТУ №  Заготов ки подавать в развёртке согласно чертежу, ШРД.  Подават ь с образцами под точечную сварку 25×100=10 штук на партию 10 деталей
Итого				0,418'	1,19'		
342-8411-2156 скоба	л 1-ГОСТ 19904-74  12Х17Г9АН 4-М  ТУ 14-1- 2186  S=1,0 <sup>-0,17</sup>  ШРД с ШВК	2	150×60	0,247'	t <sub>м</sub> =1'  R <sub>л</sub> =60 00 мм  R <sub>д</sub> =4 20 мм	0,2 1' 0,3 0' 0,1 4' 0,2 7'	ТУ №2834-2013  Детали подавать обработке по контур на лазерной установке, направление  волокна по длине детали
Итого				0,247'	0,9 2'		

### Библиографический список

1. Терегулов Н.Г. Воздействие отдельных энергетических инструментов на материалы при их резании. – Уфа: Гилем, 2009. – 188 с.
2. Терегулов Н.Г. Сущность и формы проявления энергетических инструментов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Уфа: Гилем, Башк. энцикл., 2014. – 232 с.
3. Терегулов Н.Г. Энергетические инструменты и особенности отдельных их видов, Уфа: Гилем, 2006. – 123 с.

4. Терегулов Н.Г., Соколов Б.К., Варбанов Г. и др. Способ газолазерной резки металлических материалов и устройство для осуществления способа / Патент № 2089365, зарег. 10 сент. 1997 г.

5. Терегулов Н.Г., Соколов Б.К., Матвеева В.С. Качество обработанной поверхности при лазерной резке и его контроль // Дефектоскопия. 2007. № 2.

© Искужина Г.И., 2023

УДК 539.62

Р.Р. МУСТАЕВ

*mustaevroma@yandex.ru*

Науч. руковод. – доктор техн. наук, проф. Н.К. КРИОНИ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГТД ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Аннотация:* Автор рассматривает применяемые технологии и методы обработки лопаток компрессоров газотурбинных двигателей перед нанесением защитных покрытий. Анализирует современные работы отечественных и зарубежных авторов, в которых используются методы, обеспечивающие качество поверхности лопаток компрессора газотурбинного двигателя. Обсуждает перспективы применения технологии сухого электрополирования.

*Ключевые слова:* технологии, методы обработки, защитные покрытия, очистка поверхности, сухое полирование, лопатки ГТД, геометрия детали

Обработка лопаток газотурбинных двигателей (далее – ГТД) перед нанесением защитных покрытий является важной частью производства в машиностроении, как в России, так и за рубежом. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, качество лопаток ГТД существенно влияет на работу самого двигателя. Во-вторых, такие лопатки имеют сложную геометрическую форму и требуют высоких стандартов производства. В-третьих, производство таких лопаток часто осуществляется серийно и для этого используются дорогостоящие и сложно обрабатываемые материалы.

Совокупность этих факторов существенно повышает сложность процесса производства. Тем не менее, сегодня можно говорить о значительных успехах, которые достигнуты в области обработки поверхности лопаток. Для достижения требуемого качества используется множество различных технологических методов, разных по своей релевантности и эффективности. Используемые методы зависят от предъявляемых требований к обработке, а также от материала лопатки компрессора ГТД. Основной целью используемых методов является

обеспечение качества поверхности перед нанесением защитных покрытий, что гарантирует надёжную защиту лопаток ГТД от износа, коррозии и других повреждений, и повышает эффективность работы компрессора ГТД.

Качество поверхности лопатки компрессора ГТД перед нанесением защитных покрытий обеспечивается следующим.

Перед началом процесса нанесения защитного покрытия должна быть проведена очистка поверхности лопатки от загрязнений, таких как: масла, грязь, пыль и остатки покрытий. Для этого могут быть применены следующие методы обработки: шлифование, чистка в пескоструйной камере или химическая очистка с использованием специальных растворов или реактивов.

После очистки может потребоваться полировка поверхности для удаления мелких дефектов, царапин и неровностей. Полировка обеспечивает более гладкую и ровную поверхность, что способствует лучшей адгезии покрытий.

Для создания оптимальных условий для нанесения покрытий может потребоваться предварительная обработка поверхности. Это может быть достигнуто применением химических преобразователей для улучшения адгезии покрытий, или пескоструйной обработки для создания шероховатости.

Таким образом, традиционно используются такие методы обработки поверхности пера лопаток компрессора ГТД перед нанесением защитных покрытий как:

- механическая шлифовка;
- пескоструйная обработка;
- химическая обработка;
- электрохимическая обработка;
- плазменное напыление;
- ультразвуковая очистка.

Процесс контроля качества лопатки компрессора перед нанесением защитных покрытий должен включать использование методов и инструментов для измерения параметров поверхности, таких как шероховатость, толщина покрытия и прочность адгезии. Это поможет убедиться в том, что поверхность соответствует требованиям качества перед нанесением защитных покрытий.

В настоящее время прибегают к использованию инновационных технологий подготовки поверхности лопаток. В частности, авторы из Всероссийского института авиационных материалов М.Р. Орлов, О.Г. Оспенникова, Ф.Н. Карачевцев [5] установили, что наиболее эффективным способом очистки, не нарушающим геометрию детали, является технология гидротермического автоклавного выщелачивания поверхности в защитной атмосфере аргона. Исследователи показали, что применение данной технологии обеспечивает подготовку поверхности рабочей лопатки для получения качественных защитных диффузионных покрытий методами газовой циркуляции и ионно-плазменного осаждения.

Еще один известный метод обработки наружных поверхностей лопаток ГТД – очистка в ультразвуковой ванне. Методика применения подробно

описывается в исследовании И.А. Сироткина [9], который экспериментальным путем подтвердил высокий уровень качества очистки изделий со сложной геометрией. А.Н. Михайлов, Л.В. Рукабер [3] прибегают к полировке и чистке в ультразвуковой ванне лопаток компрессора ГТД перед нанесением ионно-плазменного покрытия.

Для некоторых видов защитных покрытий, таких как алитирование, характерна подготовка лопаток ГТД с помощью совокупности методов обеспечения качества поверхности. Они совмещают механическую обработку, (шлифование, полирование) для удаления неровностей и повышения гладкости поверхности, а также снятия окислов и загрязнений с использованием специальных растворов или химических реагентов [4].

Заслуживает упоминания метод подготовки поверхности к нанесению защитных покрытий путем ионно-плазменного напыления с последующей ионной имплантацией. Очистку ионами аргона проводят газовой плазмой, которая образуется через подачу на поверхность лопатки ГТД отрицательного высоковольтного высокочастотного потенциала смещения. Далее осуществляется ионная имплантация плазмой азота при тех же параметрах потенциала смещения. Затем очищенная плазма титана подается на поверхность разогреваемых лопаток ГТД с теми же параметрами. При этом лопатка разогревается до температуры, необходимой для осаждения покрытия. Подробно данная технология нанесения износостойких покрытий на лопатки ГТД описывается в Патенте № RU(11) 2 430 992(13) С2 [7].

В настоящее время наиболее предпочтительной технологий обработки поверхности перед нанесением защитных покрытий является сухое электрополирование (далее – СЭП). Суть СЭП описывается следующим образом. Лопатка компрессора ГТД погружается в специальный контейнер, заполненный гранулами электролита, которые обеспечивают электропроводность среды. На обрабатываемую деталь подается электрический потенциал, под его воздействием на поверхности происходит ионный “унос металла” [1] и удаление микровыступов. Помимо этого контейнер с деталью подвергается вибрационному воздействию установки для равномерного омыwania гранулами обрабатываемой лопаткой ГТД. Процесс обработки СЭП продолжается до получения требуемых параметров шероховатости полируемых поверхностей детали.

Данный метод позволяет обеспечить однородность поверхности и устранить микроцарапины, сохранить заданные допуски и начальную геометрию изделия.

Технология СЭП, возникнув как инновационный метод последнего десятилетия, за короткое время стала применяться в зарубежных и отечественных исследованиях благодаря высоким результатам обработки (см. работы: [6, 10–17]).

Анализ недостатков любого механического воздействия на поверхность обрабатываемого изделия полировальным инструментом показал, что известные способы полирования поверхности детали, в особенности очистка в

пескоструйной камере [8], приводят к появлению на поверхности наклепа и к ухудшению параметров качества поверхностного слоя материала [2]. Как отмечают Н.К. Криони и А.Д. Мингажев, данное обстоятельство ведет к снижению эксплуатационных характеристик детали, особенно в случаях обработки лопаток турбины с тонким пером.

Сравнение результатов применения разных технологий позволяет сделать вывод о том, что с помощью технологии СЭП возможно обрабатывать изделия со сложной геометрией и труднодоступными областями в отличие, например, от очистки в ультразвуковой ванне. СЭП также является безопасным для окружающей среды методом, поскольку не использует химические реагенты и абразивные материалы.

При выборе оптимального метода очистки и последующего нанесения защитных покрытий на поверхности лопаток компрессора ГТД важно принять во внимание, что СЭП как технология наиболее полно соответствует требованиям и условиям работы компрессора ГТД.

### Библиографический список

1. Криони Н.К., Мингажев А.Д., Хайбуллина Н.И., Горбатова О.Г., Шарипов А.И. Возможности обработки внутренних полостей деталей методом сухого электрополирования // Студенческий вестник: электрон. научн. журн. 2020. №21(119) // <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/119>.

2. Масловский В.В., Дудко П.Д. Полирование металлов и сплавов. – М.: Высшая школа, 1974. – 255 с.

3. Михайлов А. Н., Рукабер Л. В. Совершенствование технологического обеспечения повышения ресурса лопаток компрессора ГТД с использованием функционально-ориентированных производств//Инженер, № 1(25)-2(26), 2018. Прогрессивные, специальные технологии. – С. 26 – 29.

4. Негров Д.А. Кромм А.А. Белоусова А. С. Хусаенова Э. И Нанесения жаростойкого покрытие (алитирование) на лопатки газотурбинного двигателя// Электронный ресурс: <http://sci-conf.ru/archive/VI/articles/kromm-andrey-andreevich-naneseniya-zharostoykogo-pokrytie-alitirovanie-na-lopatki-gazoturbinnogo-dvigatelya.pdf> [дата обращения: 30.09.2023].

5. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Карачевцев Ф.Н. Обеспечение качества поверхности рабочих лопаток турбины при нанесении защитных диффузионных покрытий// журнал Металлург, №2, 2013. Электронный ресурс: <https://viam.ru/sites/default/files/scipub/2012/2012-206186.pdf> [дата обращения: 07.10.2023].

6. Патент РФ № 2730306С1 Криони Н.К., Мингажев А.Д. Способ сухого электрополирования детали. Заявка № RU2020108822А. 2020-08-21.

7. Патент РФ № 2430992С2 Гейкин В.А., и др. Способ нанесения износостойких покрытий на лопатки компрессора ГТД. Заявка № 2009139921/02, 2009-10-29.

8. Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильицкий В.Б., Чеповецкий И.Х. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке – К.: Наукова думка, 1979. – 244 с.

9. Сироткин И.А. Разработка технологии высокоинтенсивной ультразвуковой очистки охлаждаемых лопаток ГТД при их изготовлении и ремонте // Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – М., 2011. – 24 с.

10. Kalman Les, Kalman Ben Preliminary assessment of dry electropolishing technology on a novel additive manufactured Ti6Al-4V implant abutment // Japan Journal of Research, Vol. 2, Issue 4, 2021, 2(4): 1–4.

11. Patent USA US5885138A Method and apparatus for dry-in, dry-out polishing and washing of a semiconductor device/ Katsuya Okumura, Riichirou Aoki, Hiromi Yajima, Seiji Ishikawa, Manabu Tsujimura/2014 09-20.

12. Palmieri V. Fundamentals of electrochemistry-the electrolytic polishing of metals: Application to copper and Niobium, Proceedings of the 11th Workshop on RF-Superconductivity, September 2013, DESY, Germany // <https://accelconf.web.cern.ch/SRF2003/papers/wet02.pdf>.

13. Qi Shao, Binghai Lyu, Julong Yuan, Xu Wang, Mingfeng Ke, Ping Zao Shear thickening polishing of the concave surface of high-temperature nickel-based alloy turbine blade // journal of materials research and technology, November 2021, 72–84.

14. Riu Guiomar, Weil Dominik, Llanes Luis, Johanns Kurt E., Oliver Warren C., Roa Joan Josep Surface integrity of new dry-electropolishing technology on WC-Co cemented carbides // ScienceDirect, Procedia CIRP 108, January 2022, 543-548.

15. Rodríguez A. P., Ferreira L. M. A. Copper Electrochemical Polishing Optimisation Excerpt from the Proceedings of the 2017 COMSOL Conference in Rotterdam // [https://www.comsol.ru/paper/download/440591/perez%20rodriguez\\_paper.pdf](https://www.comsol.ru/paper/download/440591/perez%20rodriguez_paper.pdf).

16. Xiaojun Lin, Wu Donbo, Xiufeng Shan, Gang Wu, Tong Gui, Yun Zhang, Liangyi Hu, Jie Yu Flexible CNC polishing process and surface integrity of blades // Journal of Mechanical Science and Technology, 32(6), June 2018, 2735-2746.

17. Yuchao Bai, Cuiling Zhao, Jin Yang, Jerry Ying Hsi Fuh, Wen Feng Lu, Can Weng, Hao Wang Dry mechanical-electrochemical polishing of selective laser melted 316L stainless steel // Materials & Design, Volume 193, August 2020, 108840.

© Мустаев P.P., 2023

## СЕКЦИЯ 2.6. СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА

УДК 53.072.11

Т.И. БАЛГАЗИН, М.В. ГОЛОВИН

*Tagir.balgazin@yandex.ru golovin.mv.vl5@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент М.Т. ХАТМУЛЛИНА

*Уфимский университет науки и технологий*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Аннотация:* В данной работе рассмотрены ключевые способы и алгоритмы моделирования физических процессов с помощью языка программирования Python и библиотек Numpy и Matplotlib. Было проведено моделирование одномерной диффузии в стержне при помощи метода конечных объемов.

*Ключевые слова:* моделирование процессов, алгоритм, метод Монте-Карло, метод Эйлера, метод конечных элементов, Numpy, Python

Компьютерное моделирование – это выполняемый на ЭВМ процесс математического моделирования, который предназначен для прогнозирования поведения и результатов работы реальной системы.

ЭВМ предназначены для решения вычислительных задач, которые можно решать при помощи:

1. Специализированных математических пакетов;
2. Скриптов, написанных на языках программирования.

Для моделирования физических процессов необходимо создать математическую модель процесса, то есть представить физический процесс в форме вычислительной задачи, которая будет описывать поведение физической системы.

В настоящей работе решение вычислительных задач при моделировании процессов производилось при помощи языка программирования Python с использованием специальных библиотек.

Методы моделирования процессов можно разделить на следующие типы: аналитические, статистические, имитационные и численные методы. Данные типы характеризуют метод моделирования с разных сторон, один тот же метод может относиться сразу к нескольким типам. Так, при построении имитационных моделей часто используется метод Монте-Карло, который является статистическим численным методом.

Отличие между аналитическими и численными методами моделирования заключается в способе решения математических уравнений, описывающих физические процессы. Принципиальная разница между аналитическими и численными методами заключается в том, что при аналитическом моделировании необходимо найти точное (аналитическое) решение уравнений,

характеризующих моделируемую систему, в то же время, как численные методы основаны на аппроксимации решения уравнений. Из этого исходит то, что аналитические методы обладают большей точностью, однако их применение ограничено в случае моделирования сложных систем. В данной статье рассматриваются преимущественно численные методы моделирования.

Методы Мóнте-Кáрло (ММК) — группа статистических численных методов для изучения случайных процессов. Суть метода заключается в следующем: процесс описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин, модель многократно обчисляется, на основе полученных данных вычисляются вероятностные характеристики рассматриваемого процесса.

Проиллюстрируем работу метода на примере задачи. Необходимо вычислить площадь фигуры неправильной формы. Если при помощи генератора случайных координат в пределах от минимальных ( $y_{min}, x_{min}$ ) до максимальных ( $y_{max}, x_{max}$ ) координат точек, принадлежащих фигуре, сгенерировать координаты точек, то часть этих точек будет принадлежать фигуре, а часть нет. При этом площадь фигуры можно найти таким образом:  $S = (y_{max} - y_{min}) * (x_{max} - x_{min}) * \left(\frac{m}{n}\right)$ , где  $m$  – количество точек, попавших в площадь фигуры,  $n$  – количество всех сгенерированных точек. То есть площадь фигуры неправильной формы будет равна площади прямоугольника, которому принадлежат все точки данной фигуры, умноженной на отношение точек, попавших в площадь фигуры к общему количеству точек.

В моделировании физических процессов метод Монте-Карло находит широкое применение. Он позволяет аппроксимировать сложные физические явления и системы, которые не могут быть представлены аналитически. Этот метод особенно полезен, когда точное аналитическое решение является слишком сложным или невозможным из-за множества переменных и стохастической природы системы.

Метод конечных объемов (Finite Volume Method, FVM) – это численный метод решения дифференциальных уравнений, который основан на разбиении области расчета на небольшие ячейки (объемы), при помощи которых происходит аппроксимация уравнений. Разберем пошагово принцип его работы:

1. Разбиение расчетной области – весь расчетный домен разбивается на конечные объемы, образующие сетку.

2. Постановка уравнений - физические уравнения (например, уравнения Навье–Стокса для моделирования течения жидкости) приводятся к интегро-дифференциальным формам внутри каждой ячейки.

3. Интегрирование по объему - интегрирование уравнений производится по каждому объему.

4. Аппроксимация. Интегралы аппроксимируются с использованием выбранных схем дискретизации (например, центральная разностная схема).

5. Расчет значений – на основе аппроксимаций и дискретизаций решаемые уравнения приводятся к системе алгебраических уравнений.



6. Решение системы уравнений (например, методом Гаусса-Зейделя).

7. Оценка решения.

Моделирование одномерной диффузии методом конечных объемов.

Диффузия – это процесс перемещения частиц из области с более высокой концентрацией в область с более низкой концентрацией.

Диффузия в стержне может быть описана уравнением Фика. Оно описывает градиент концентрации и скорость диффузии в материале.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2},$$

Где  $\partial C/\partial t$ - скорость изменения концентрации по времени  $D$  – коэффициент диффузии, зависящий от свойств материала,  $\partial^2 C/\partial x^2$  – вторая производная концентрации по координате (градиент концентрации).

Код на Python:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Параметры моделирования
L = 4.9 # Длина стержня
T = 1.0 # Время моделирования
N = 100 # Количество ячеек
D = 0.99 # Коэффициент диффузии
dx = L / N # Размер ячейки
dt = 0.009 # Шаг по времени
# Инициализация начальных условий
x = np.linspace(0, L, N) # Расчетная сетка
u = np.zeros(N) # Значения переносимой величины в ячейках
u[40:60] = 1.0 # Начальное распределение
# Цикл по времени
for t in np.arange(0, T, dt):
    grad_u = np.diff(u) / dx
    flux = -D * grad_u
    u[1:-1] += dt * (flux[:-1] - flux[1:]) / dx
plt.plot(x, u)
plt.xlabel('Позиция')
plt.ylabel('Значение величины')
plt.title('Моделирование диффузии в стержне длины '+str(L) + ' при
коэффициенте диффузии: '+ str(D) )
plt.grid(True)
plt.show()
```

Моделирование диффузии в стержне длины 1.0 при коэффициенте диффузии: 0.1

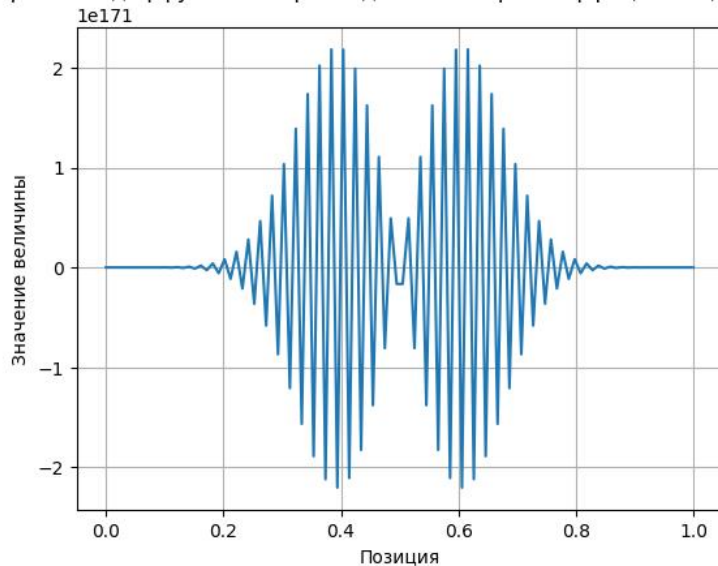


Рис. 1. Метод конечных объемов. Результаты моделирования при коэффициенте диффузии 0.1, длина стержня 1.0

Моделирование диффузии в стержне длины 1.0 при коэффициенте диффузии: 0.5

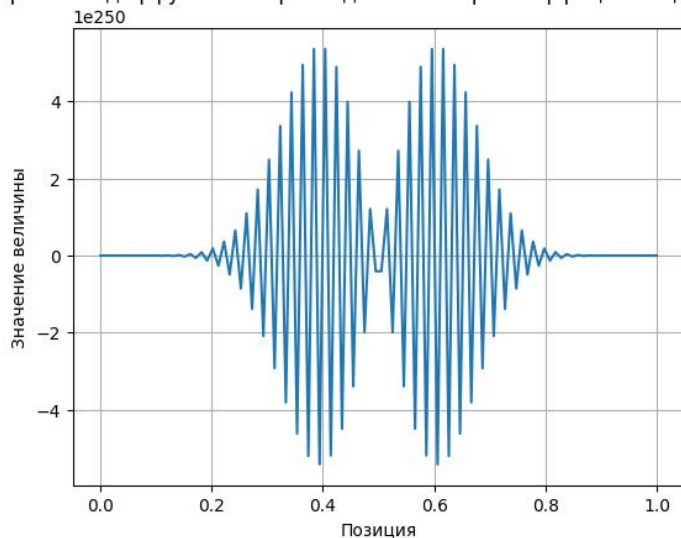


Рис. 2. Метод конечных объемов. Результаты моделирования при коэффициенте диффузии 0.5, длина стержня 1.0

Моделирование диффузии в стержне длины 4.9 при коэффициенте диффузии: 0.99

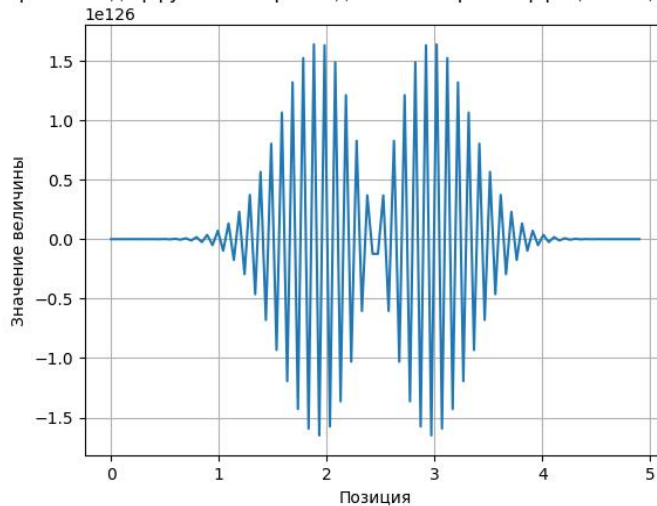


Рис. 3. Метод конечных объемов Результаты моделирования при коэффициенте диффузии 0.99, длина стержня 4.9

Моделирование диффузии в стержне длины 2.0 при коэффициенте диффузии: 0.7

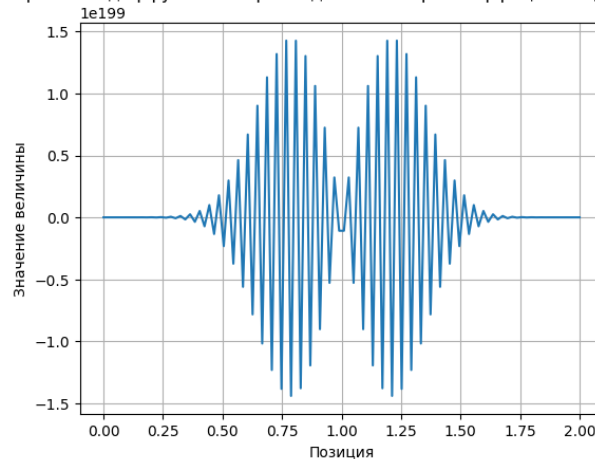


Рис. 4. Метод конечных объемов Результаты моделирования при коэффициенте диффузии 0.7, длина стержня 2.0

В данной работе представлена информация о ключевых алгоритмах компьютерного моделирования физических процессов, а также смоделирована одномерная диффузия в стержне при помощи метода конечных объемов.

Физические процессы могут быть смоделированы на ЭВМ при помощи различных вычислительных алгоритмов. Это может быть полезно в научных и учебных целях в качестве замены реального эксперимента, в условиях отсутствия возможности его проведения или экономии времени. Данная работа является актуальной, поскольку в настоящее время широкое распространение получили дистанционные образовательные программы.

## Библиографический список

1. Кибардин, А.В. Компьютерное моделирование в физических исследованиях: электронный образовательный текстовый ресурс / А.В. Кибардин. – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – 37 с.
2. Фокин, В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела: учебное пособие / В.Г. Фокин. – Самара: СамГТУ, 2010. – 131 с.
3. Умнов, А.Е. Методы математического моделирования: учебное пособие / А.Е. Умнов. – Долгопрудный: МФТИ, 2023. – 295 с.

© Балгазин Т.И., Головин М.В., 2023

УДК 620.18

Е.С. КИРИЛОВА

*katena.kirilova.00@mail.ru*

Науч. руковод. – доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник  
ИПСМ РАН М.Ф. ИМАЕВ

*Уфимский университет науки и технологий*

### **МИКРОСТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ КОМПОЗИТА $Al+TiO_2$ , ПОДВЕРГНУТОГО ОБРАБОТКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

*Аннотация:* В данной статье рассмотрели формирование методом обработки трением с перемешиванием (ОТП) поверхностного композита, состоящего из алюминиевого сплава 6063 и частиц порошка  $TiO_2$ . Для получения композита в листе алюминиевого сплава изготавливали канавки, в которые засыпали порошок  $TiO_2$ . Данные канавки закрывали путем вращения инструмента без пина. Формирование композита осуществляли путем ОТП с выдвинутым пином. Исследовали влияние многопроходной ОТП на распределение микротвердости и микроструктуру.

*Ключевые слова:* металломатричные композиты, обработка трением с перемешиванием, зона термомеханического воздействия, зона перемешивания, основной материал, мелкодисперсный порошок  $TiO_2$

Благодаря высокому соотношению прочности и веса и коррозионной стойкости алюминиевые сплавы широко используются в авиакосмической, автомобильной и судостроительной промышленности. Однако алюминиевые сплавы характеризуются низкой износостойкостью. Свойства алюминиевых сплавов можно улучшить, добавляя в матричный материал армирующие частицы, получая так называемые металломатричные композиты (ММК). В последнее время применение ММК расширилось за счет улучшения

механических свойств и износостойкости [1]. ММК обычно изготавливаются методом ex-situ, при котором предварительно подготовленные армирующие частицы вводятся в матричный материал металлургическими методами, такими как литье, литье с электромагнитным перемешиванием, литье под давлением. Эти методы требуют тщательного перемешивания расплава из-за плохой смачиваемости армирующих частиц и их агломерации. Другая проблема заключается в том, что армирующие частицы имеют тенденцию вступать в реакцию с материалом матрицы или могут разрушаться при повышенных температурах, и могут образовываться нежелательные соединения, которые снижают механические свойства ММК.

В последнее время все большее распространение получают in-situ композитные технологии, основанные на синтезе упрочняющих частиц непосредственно в процессе смешивания компонентов композита [2]. Такие технологии обеспечивают более плотный контакт и хорошую адгезию между матрицей и армирующими частицами, снижают загрязнение примесями, адсорбированными газами и влагой. Одной из технологий получения композитов является ОТП. ОТП перспективна для изготовления композитов с металлической матрицей благодаря простоте процесса изготовления и надежности изделий по сравнению с ММК, полученными методами литья и порошковой металлургии. ОТП осуществляется в твердофазном состоянии без плавления матричного материала, что способствует измельчению микроструктуры и улучшению механических свойств.

Использовали лист алюминиевого сплава 6063 толщиной 3 мм и мелкодисперсный порошок  $TiO_2$ . В листе на фрезерном станке вырезали 6 канавок шириной 1 мм, глубиной 1,5 мм и длиной 90 мм. Расстояние между канавками составляло 1,5 мм. Далее в эти канавки насыпали и плотно утрамбовывали порошок  $TiO_2$ , как показано на рисунке 1. Многопроходную ОТП проводили с выдвинутым на 2 мм наконечником. Количество проходов было 2, 4, 10 и 20. Затем подготовили образцы для металлографического анализа (рис. 2)

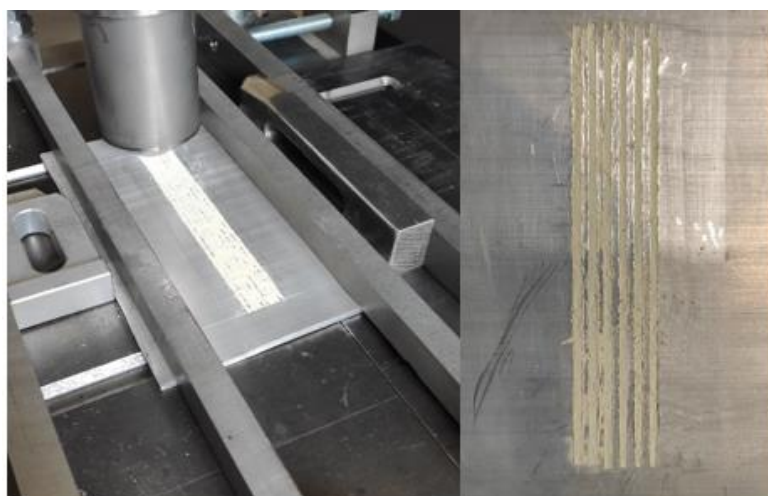


Рис. 1. Заготовка перед ОТП

Микротвердость исследовали на шлифах, вырезанных на электроискровом станке поперек плоскости шва. Измерения микротвердости по Виккерсу проводили на микротвердомере МВТ-71У4.2 с нагрузкой в 50 гс и временем выдержки 10 с. Микротвердость измеряли вдоль линии, расположенной на расстоянии около 0,5 мм от поверхности контакта с инструментом.

Исследования микроструктуры проводились при помощи растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA.

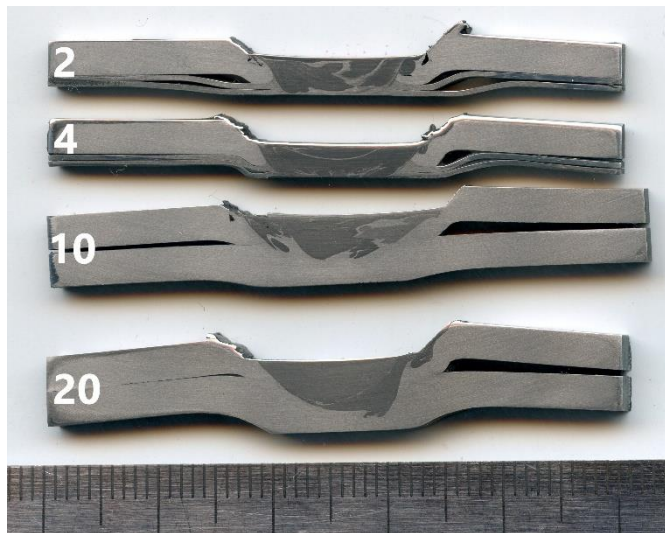


Рис. 2. Полированные образцы после 2, 4, 10, 20 проходов ОТП

Для исследования фазовых превращений в композите  $Al+TiO_2$  был проведен ДСК анализ (рис. 3).

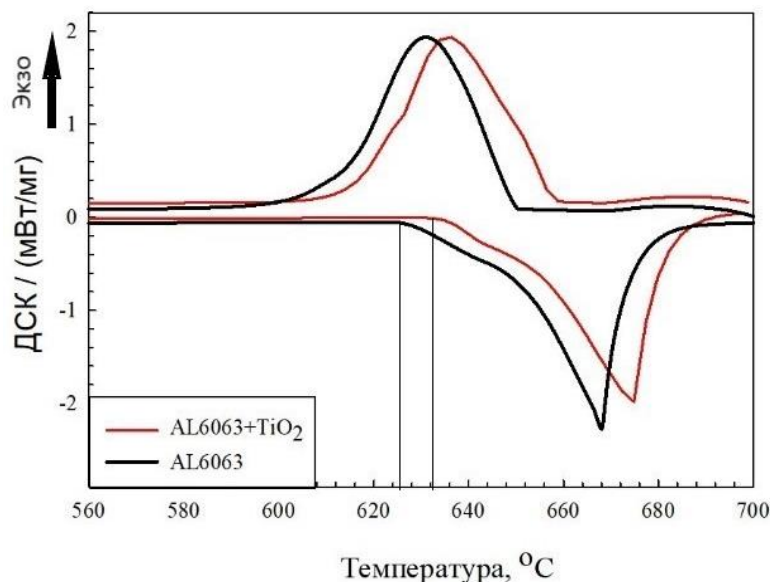


Рис. 3. ДСК-кривые для Al6063 и композита  $Al+TiO_2$

В зоне перемешивания/композита  $Al+TiO_2$  фазовых превращений не наблюдается. Температура начала плавления композита осталась практически такой же, что и для алюминиевого сплава 6063.

В состоянии поставки материал находится в дисперсионно-упрочненном состоянии с микротвердостью около 80 HV. На рис. 4 представлены распределения микротвердости в зонах ОТП в зависимости от количества проходов. ОТП приводит к уменьшению микротвердости в зонах термомеханического воздействия и перемешивания, что связано с сильным разогревом.

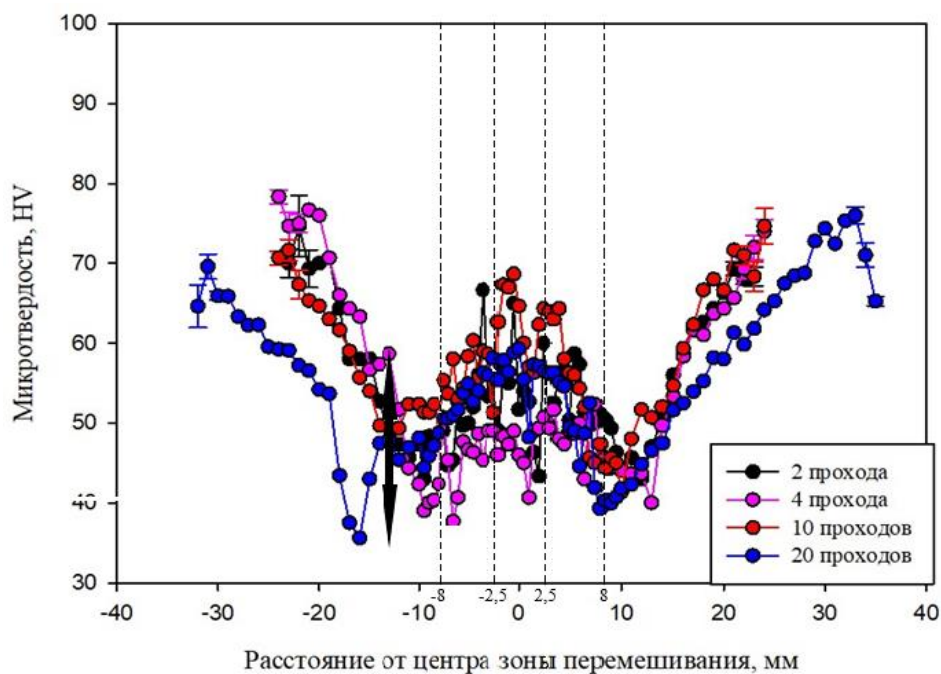
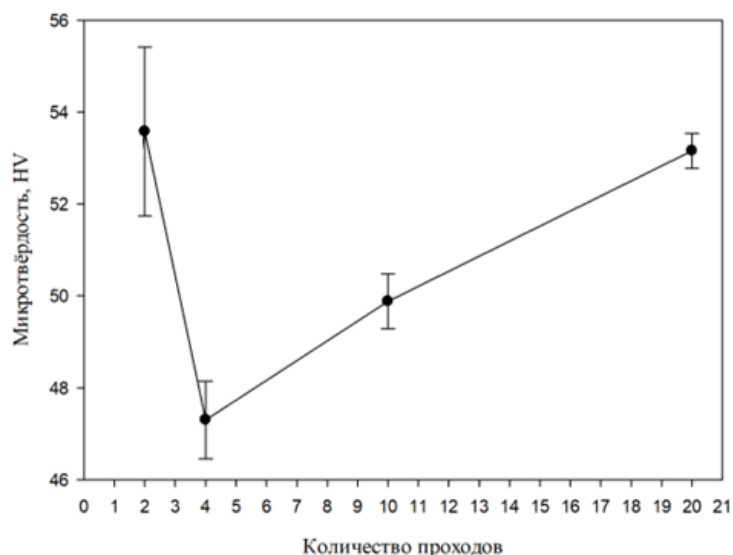


Рис. 4. Распределение микротвердости в зоне ОТП композита Al+TiO<sub>2</sub>

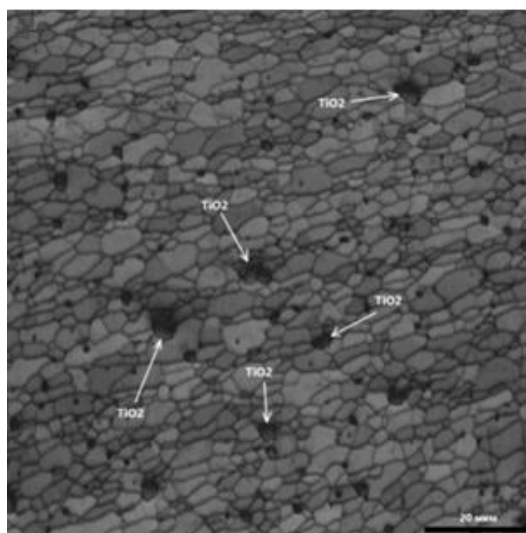
Наблюдается небольшое увеличение микротвердости по мере увеличения количества проходов с 4 до 20. После 2-х проходов ОТП формируются участки повышенной микротвердости (до 67 HV). Повышенная микротвердость наблюдается в участках с высокой плотностью частиц TiO<sub>2</sub>. В участках с низкой плотностью частиц твердость снижается до 43 HV. После четырех проходов твердость распределена более равномерно, но ее значение уменьшилось до 38–52 HV. На рис. 5 показана зависимость усредненной микротвёрдости в зоне композита от количества проходов ОТП. Видно, что наибольшая микротвердость наблюдалась после 2 и 20 проходов, а минимальная после 4 проходов.



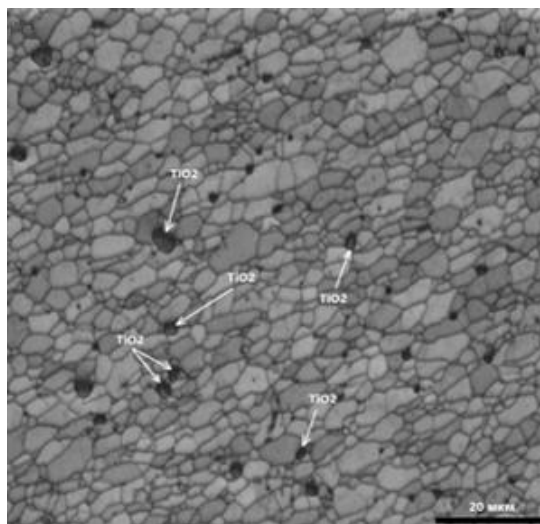
*Рис. 5.* Зависимость значения микротвёрдости от количества проходов в зоне перемешивания

Наблюдаемую неравномерную зависимость микротвердости от количества проходов можно объяснить конкуренцией двух процессов: 1 – уменьшение плотности частиц  $\text{TiO}_2$  по мере увеличения количества проходов; 2 – увеличение количества наноразмерных частиц интерметаллида  $\text{Al}_3\text{Ti}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , благодаря протеканию химической реакции  $\text{TiO}_2$  с алюминиевой матрицей.

Для исследования микроструктуры сняты ВС – карты методом EBSD композита после 10 и 20 проходов ОТП. На рис. 6 стрелками показаны частицы порошка  $\text{TiO}_2$ .



а



б

*Рис. 6.* ВС-карты EBSD для состояний после ОТП  
а – после ОТП 10 проходов; б – после ОТП 20 проходов

Увеличение количества проходов ОТП до 20 не приводит к изменению микроструктуры. Средний размер зерен после 10 и 20 проходов



составляет 3–5 мкм. Плотность частиц  $TiO_2$  после 20 проходов становится меньше, т. к., согласно рис. 5, площадь композита становится больше по сравнению с образцом после 10 проходов ОТП.

По предварительным оценкам размер частиц  $TiO_2$  составляет 3–5 микрон, в дальнейшем планируется измерение размера частиц с большей статистикой.

Таким образом, ОТП приводит к уменьшению микротвердости в зоне перемешивания (формирования композита) по сравнению с основным сплавом, находящимся в естественно состаренном состоянии. Увеличение количества проходов ОТП не сопровождается значимым увеличением микротвердости в зоне формирования композита. Композит характеризуется высокой стабильностью микроструктуры даже после увеличения количества проходов.

### **Библиографический список**

1. Рыбаков А.Д. «Применение различных форм углерода для СВС высокодисперсного карбида титана в расплаве при получении алюмоматричных композиционных материалов» (с. 15).
2. Курицын Д.Н., Разработка технологического обеспечения сварки трением с перемешиванием в производстве аэрокосмических конструкций.
3. Huang G. et al. Development of surface composite based on Al-Cu system by friction stir processing: Evaluation of microstructure, formation mechanism and wear behavior // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 344. P. 30–42.
4. N. Gangil, A. N. Siddiquee, S. Maheshwari. Journal of Alloys and Compounds. 715, 91 (2017).

© Кирилова Е.С., 2023

УДК 523.4-325;523.214

Э.И. МУСТАФИН

*emilmustafin0407gmail.com@yandex.ru*

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук, доцент М.Т. ХАТМУЛЛИНА

*Уфимский университет науки и технологий*

### **УБОРКА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

*Аннотация:* В работе обсуждается проблема космического мусора и один из способов решения этой проблемы – захоронение мусора на планете Марс. Обсуждаются цели экспедиции на Марс и задачи, которые предстоит решить. В статье приводится расчет времени полета на Марс.

*Ключевые слова:* космический мусор, Марс, экспедиция

Что такое «космический мусор»? Под космическим мусором подразумеваются все искусственные объекты и их фрагменты, размеры которых меняются от 1мм до нескольких метров. В настоящее время в районе низких околоземных орбит вплоть до высот 2000 км находится по оценкам по данным ООН до 30 млн. кусков космического мусора. Часть его, не полностью сгорая в атмосфере Земли, может упасть на населённые пункты, промышленные объекты и т.д. Часть может повредить обшивку космического корабля и дорогостоящее оборудование, а самое главное стать угрозой жизни людей, которые там находятся [1]

Эффективных мер по борьбе с космическим мусором пока нет. Хотя, рассматривается проект спутника, который будет испарять космический мусор при помощи лазера или который будет замедлять космический мусор и выводить его в плотные слои атмосферы [2].

Цели экспедиции на Марс:

- Изучение физических характеристик планеты;
- транспортировка космического мусора;
- доставка проб марсианского грунта.

Задачи, которые предстоит решить экспедиции

1. Расчет времени полета.
2. Проверка систем, обеспечивающих безопасность.
3. Установка «мусоросборщика» на самом корабле.
4. Установка мобильной станции по уничтожению мусора на Марсе.

Среди прочих задач, которые придется решить человеку при подготовке экспедиции на Марс, одной из главных является расчёт времени полета. Современная ракетно-космическая техника, использующая принципы реактивного движения, сумела достичь только первой (7,9 км/с) и второй (11,2 км/с) космических скоростей, необходимых для выхода космического корабля на околоземную орбиту и полетов к другим планетам. Но второй космической скорости вполне достаточно для полета на Марс. Космический аппарат, который будет направлен к Марсу, должен стартовать с Земли со скоростью не меньше второй космической скорости. Для Марса она равна 5,05 км/с.

Чтобы КА, запущенный с Земли, попал на исследуемую планету, необходимо заранее с высокой точностью знать траекторию его движения и условия, необходимые для аппарата на эту траекторию. Эти условия требования к ракетным двигателям.

Расчет реальной траектории КА к планете очень сложен. Действительно, в начале полёта аппарат движется в поле тяготения Земли, затем большую часть своего пути – в поле тяготения Солнца, и в конце пути – в поле исследуемой планеты. Обычно для предварительной оценки ограничиваются расчётом простейшей орбиты в поле тяготения Солнца.

Наиболее оптимальной (с точки зрения затрат энергии) является полуэллиптическая орбита движения КА, касающаяся своими вершинами орбит Земли и планеты. В соответствии с первым законом Кеплера Солнце находится

в одном из фокусов этой орбиты, большая ось которой проходит через Солнце и Землю [3].

Земля и Марс вращаются вокруг Солнца с разными скоростями (30 км/с и 24 км/с - соответственно), поэтому Земля при движении по своей орбите всегда "догоняет" Марс. Когда планеты находятся по одну сторону относительно Солнца, и расстояние между их орбитами минимально, происходит противостояние. Такое положение Земли и Марса наступает примерно каждые 780 суток (т.е. 26 месяцев). В периоды противостояний лететь к Марсу наиболее выгодно, но в связи с тем, что орбита Марса сильно вытянута, а орбита Земли почти круговая, расстояние между ними колеблется от 55 до 100 млн. км.

Для полета на Марс предполагается использовать время наибольшего сближения планет, так называемое Великое противостояние. Оно наступает раз в 15-17 лет, когда расстояние между Марсом и Землей минимально, примерно 55-57 млн км. Такое положение Земли относительно Марса было в 2018 году, а следующее будет 2033 году.

Приступим к расчётам. При запуске к любой внешней планете перигелий (П) орбиты КА совпадает с Землёй и отстоит от Солнца (С) на расстояние  $q = a_0 = 1$  астрономической единице (а.е.) = 150 млн км. Афелий (А) находится на пересечении большой оси орбиты КА с орбитой планеты и удалён от Солнца на расстояние  $Q = a_1$  (а.е.). В день сближения с КА планета подойти к афелию. Сам запуск производится в сторону движения Земли, с тем, чтобы использовать ее орбитальную (гелиоцентрическую) скорость  $v_0 = 30$  км/с. Во время полёта в гравитационном поле Солнца космический аппарат подчиняется законам движения планет – законам Кеплера. Большая полуось его орбиты, выраженная в астрономических единицах, равна  $a_{ка} = (q+Q)/2 = (a_0+a_1)/2 = (1+a_1)/2$  (а.е.). Согласно третьему закону Кеплера для всех планет Солнечной системы имеет место соотношение  $a^3/T^2 = 1$ , если большая полуось орбит  $a$  выражена в а.е., а период обращения планеты  $T$  выражен в годах. Отсюда измеренная в годах продолжительность полёта КА  $t = 1/T = 1/2(a_{ка})^{3/2}$ . Так, для полёта к Марсу получим  $a_1 = a_M = 1,5$  а.е.,  $a = 1,25$  а.е. Оптимальное время полёта к Марсу 255 сут. Однако, по прямой в космосе летать невозможно. Космический корабль увлекается силой инерции вращения Земли вокруг Солнца, и поэтому он летит по сильно вытянутой дуге от орбиты Земли к орбите Марса. Поскольку Земля "догоняет" Марс, вылетать нужно заранее, чтобы подлет к нему приходился на период противостояния.

Полёт в обратном направлении будет происходить по той же схеме, только заранее нужно улетать с Марса. Поскольку следующее противостояние произойдет на более значительном удалении планет друг от друга (около 70 млн. км), то и лететь нужно будет дольше (примерно 9 месяцев).

Таким образом, дорога туда и обратно займет 16 месяцев, что составляет около 500 суток.

Но улететь с Марса сразу, к сожалению, нельзя, потому что после Великого противостояния планет Земля стремительно "уходит" вперед за счет разности орбитальных скоростей, а через 3 месяца можно вообще говорить о

"разбегании" планет (за счет быстрого изменения вектора орбитальной скорости у Земли) [4]. У космического корабля просто нет шансов попасть обратно на Землю.

Поэтому необходимо ждать наступления следующего противостояния планет (26 месяцев). В этот срок входит полет обратно к Земле (9 месяцев) и нахождение корабля на орбите вокруг Марса (17 месяцев). Именно за эти 17 месяцев мы предлагаем решить все задачи, поставленные перед экспедицией.

*Технические требования, предъявляемые к космическому аппарату.*

Система кислородообеспечения должна подавать в атмосферу обитаемого отсека кислород в количестве 0,9 кг/сут на человека.

Система очистки атмосферы должна обеспечивать сбор и удаление из атмосферы углекислого газа в количестве 1 кг/сут.

Система водообеспечения должна обеспечивать экипаж питьевой водой в количестве 2,5 кг/сут на человека. Если используются натуральные продукты питания, которые содержат воду (до 0,5 кг/сут), то норма питьевой воды уменьшается до 2 кг/сут на человека.

Система питания экипажа должна обеспечивать космонавта полноценным питанием. Пища будет сублимированная для удобства транспортировки и длительности хранения. В рацион обязательно должны входить продукты, содержащие белки, жиры и углеводы с общей калорийностью до 12500кДж/сут на человека. Меню экипаж будет выбирать себе сам.

Система регулирования температуры и влажности атмосферы вместе с общей системой терморегулирования выполняют: отвод из отсека тепла, выделяемого человеком, а также поддерживать заданную температуру (18-22 градуса по Цельсию), относительную влажность (30-70%) и циркуляцию воздуха.

Система удаления отходов должна обеспечивать сбор и изоляцию из атмосферы жидких и твердых продуктов жизнедеятельности. Также можно отделять от урины воду и кислород и запускать в замкнутый цикл станции.

Система регулирования давления должна поддерживать общее давление атмосферы равное 77-107 кПа, осуществлять контроль герметичности отсека и компенсацию утечек воздуха из отсека.

Средства санитарно-бытового обеспечения, предназначенные для личной гигиены экипажа и удовлетворения бытовых нужд – одежда, спальные принадлежности, предметы для санитарной уборки отсеков.

Средства индивидуальной защиты экипажа:

- аварийно-спасательные скафандры, дыхательные маски, обеспечивающие защиту экипажа в аварийных ситуациях – при разгерметизации отсека, возникновении пожара и т.п.

- космические скафандры для обеспечения выхода и работы человека в космическом пространстве вне отсека космического летательного аппарата.

Средства медико-биологического обеспечения, включающие приборы для медицинского контроля состояния экипажа, тренажеры для физической тренировки экипажа в полете, медикаменты.

## Библиографический список

1. Гаврилов В. Космический мусор, обломки недавнего прошлого (Популярная механика. М., июль 2006 г.).
2. Маринин Д.В. Космический мусор-поддается ли решению эта проблема? (Наука и техника; наука и космос. М., май 2006 г.).
3. Л.В. Рыхлова. Проблема космического мусора (Земля и Вселенная, № 6 – 1993 г.).
4. Григал П.В., Замышляев Б.В., Любимов А.Г. и др. О влиянии загрязнения околоземного космического пространства на безопасность длительного функционирования космических аппаратов (Наука, техника, № 11, 1996 г.).

© Мустафин Э.И., 2023

УДК 004.032.26

А.Р. ПАРФЕНОВ

*parfenov-art@mail.ru*

Научный руководитель – аспирант ПИШ "Моторы будущего" УУНИТ

Ш.Н. ШАРАФУТДИНОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

### **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ РАДИАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ**

*Аннотация:* В статье предлагается рассмотреть модель нейронной сети, которая в реальном времени управляет работой электродвигателя на радиальных магнитных подшипниках. Автором рассмотрены особенности применения нейросетей в этой области, представлена программа для автоматизированного управления двигателем.

*Ключевые слова:* магнитный подшипник, нейронная сеть, электродвигатель, автоматизация

Одной из передовых технологий в современной механике является технология активных магнитных подшипников (АМП), которая предлагает новый подход в проектировании электрического оборудования.

В отличие от традиционных механических подшипников, функционирующих на контактных поверхностях, АМП используют принципы магнитных полей для достижения бесконтактной поддержки и стабилизации. Благодаря отсутствию физического контакта и трения АМП обладают целым рядом неоспоримых преимуществ, включая снижение износа, повышение эффективности работы и надежности. Эти качества привлекли внимание к АМП, которые находят применение в таких различных отраслях, как аэрокосмическая промышленность, возобновляемые источники энергии, турбомашин и высокоточное производство.

Однако использование данной технологии требует большое количество расчетов при создании и эксплуатации, и как отмечают в заключении авторы статьи [1]: для успешного применения АМП в реальных системах следует использовать адаптивные алгоритмы для автоматизации и управления.

Данная статья является первым шагом в процессе внедрения нейросетей в блок управления электродвигателя на основе активного магнитного подвеса. В процессе исследования была разработана программа на языке Python, в которой реализована нейронная сеть, которая самостоятельно определяет состояние положения ротора двигателя, используя для этого моментальные значения координат, приходящие с датчиков на самом двигателе во время его эксплуатации.

Все исследование проводилось на базе СКБ «Вега-Газ» ПИШ, где проводятся опытные испытания двигателя на основе радиальных магнитных подшипников. Изначально было проведен запуск двигателя (рис. 1), чтобы подготовить тренировочную информацию для нейросети.

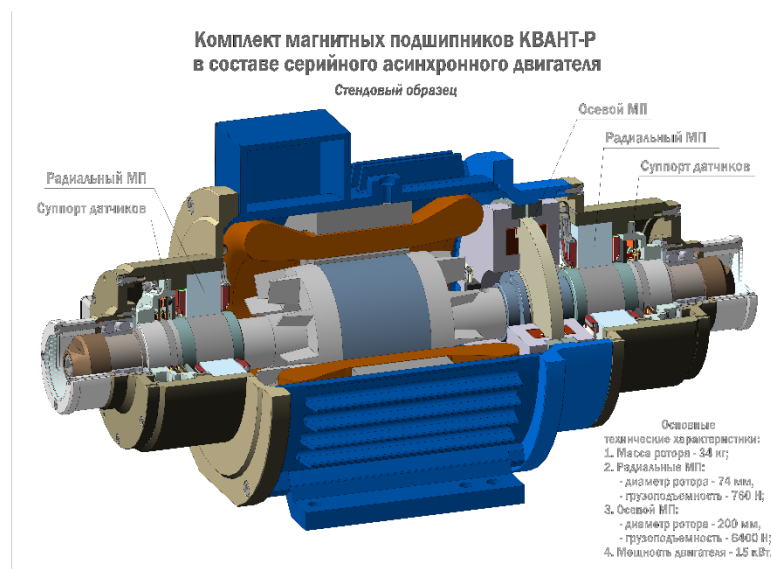


Рис. 1. Схема асинхронного двигателя, на котором проводились испытания

Отметим, что на тот момент управление двигателем происходило с помощью традиционного ПО, где все коэффициенты, регулирующие оборудование задаются в ручную, и процесс работы требует наблюдения оператора. В ходе этого запуска была собрана база данных где каждая строка несет в себе положение X и Y координаты оси ротора двигателя, а также одно из трех значений “опасности” данного положения: 1 – работа в норме, 2 – работа в предупредительном режиме, 3 – критический режим работы. Каждый фрагмент информации был промаркирован вручную исходя из формул представленных в [2], и на выходе был получена база данных содержащая 270 обучающих примеров (рис. 2).

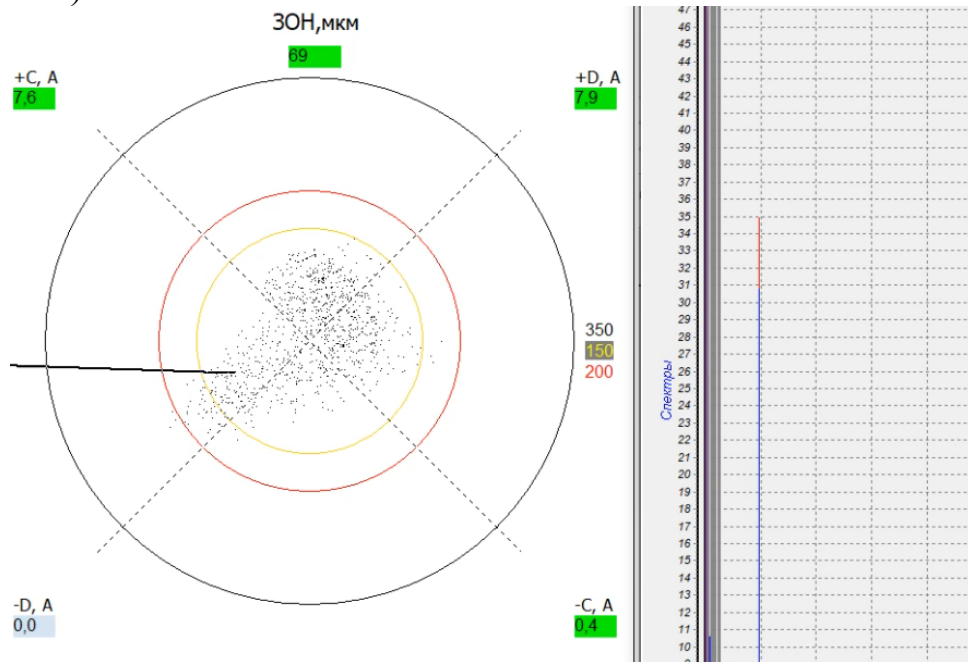


Рис. 2. Процесс сбора информации

Задача нейросети на основе этих данных составить карту зон для представленных ранее значений опасности 1, 2, 3 а также в режиме реального времени контролировать состояние двигателя и если это необходимо вызвать экстренную остановку работы.

С помощью библиотек `pumpy` и `sklearn.preprocessing` полученная база данных была обработан и подготовлена для нейросети путем применения метода стандартизации всех значений, о который написано в [3]. В итоге после всех преобразований база данных выглядит следующим образом (рис. 3):

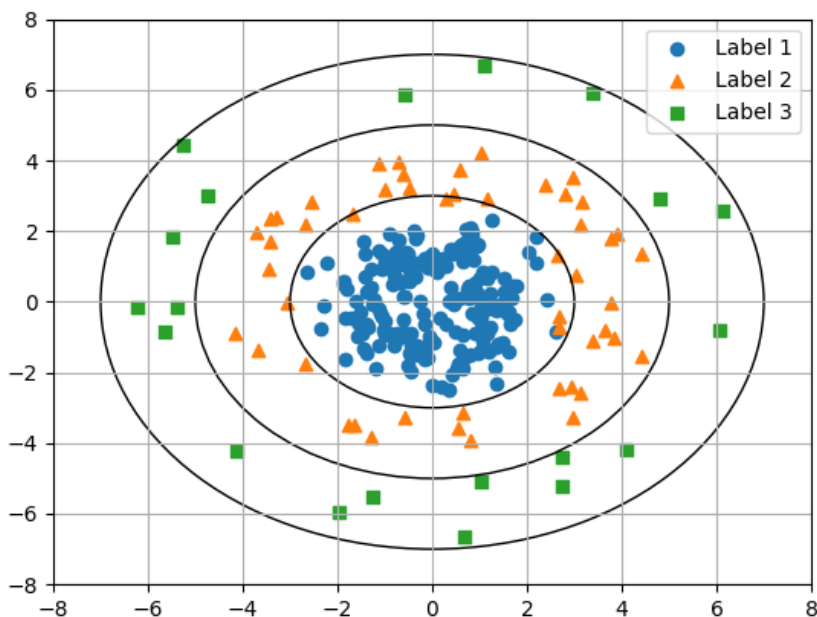


Рис. 3. База данных после стандартизации

Следующий шаг это обучение нейросети. В качестве модели классификатора был выбран дополненный алгоритм машины опорных векторов – `kernel SVM`, о работе которого и доказательстве его эффективности написано в [3] и [4]. Выбор этого алгоритма был связан с тем, что он отлично решает задачи нелинейной классификации объектов, а также имеет много параметров для гибкой настройки. В программе используется реализация алгоритма из библиотеки `sklearn.svm` (рис. 4). Подбор параметров происходил до тех пор пока точность модели не составила 98% (то есть 265 из 270 координат были классифицированы программой, также как и вручную).



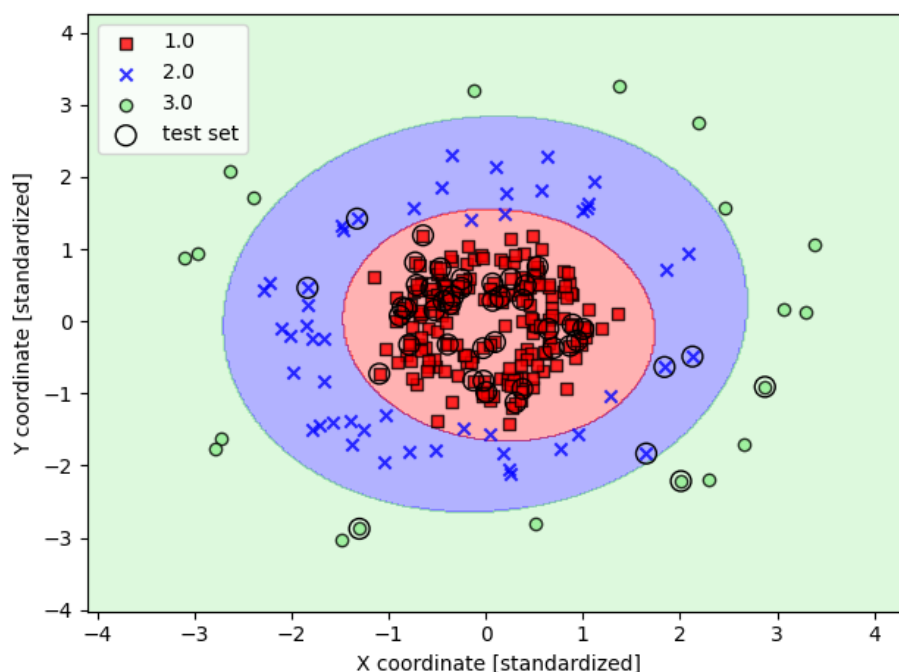


Рис. 4. Визуальное представление полученной модели

В ходе исследования была получена программа, использованная для внедрения адаптивных алгоритмов в работу с элетродвигателем. Испытания по изучению применимости и универсальности данного метода ведутся в процессе написания статьи. В дальнейшем технологию планируется расширять и использовать нейросеть для автоматизации работы PID регулятора – одного из важнейших компонентов управления активным магнитным подвесом.

### Библиографический список

1. Исмагилов Ф.Р., Баскакова А.В., Ямалов И.И., Глумов Д.А., Шарафутдинов Ш.Н. Анализ вариантов построения систем активного магнитного подвеса. – УУНИТ: ВКЭМ, 2022.
2. Журавлев Ю.Н., Активные магнитные подшипники. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
3. Raschka S. Python machine learning. – Packt publishing ltd, 2015.
4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. – Издательский дом Вильямс, 2008.

© Парфенов А.Р., 2023

УДК 620.22

В.В. ТИТОВ

*molotovmelnik@gmail.com*

Науч. руковод. – доктор физ.-мат. наук, проф. Д.В. ГУНДЕРОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ЭФФЕКТ КРИОЦИКЛИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ОМС VIT-105**

*Аннотация:* После проведения испытаний на трехточечное изгибание становится ясно, что анализ данных выявляет изменения в поведении материала. После единичного криоцикла материал проявляет более значительную деформацию до разрушения, достигая до 8%, по сравнению с исходным состоянием. Однако при десяти криоциклах наблюдается значительное уменьшение пластичности, что приводит к охрупчиванию образцов и, в конечном итоге, к их разрушению.

*Ключевые слова:* криоциклирование; аморфные сплавы; механические свойства

Аморфные сплавы или объёмные металлические стёкла (ОМС) выделяются множеством положительных характеристик, выражающихся в высокой прочности и способности к более широкой области упругих деформаций (около 2%). Однако ограничение пластичности кроется в образовании и миграции отдельных полос сдвига в ОМС, отличающих их от кристаллических сплавов, которым присущи дислокационные механизмы. Одним из возможных решений для увеличения доли пластической деформации таких сплавов предлагается прибегать к процессу криоциклирования. Этот метод реализуется через цикличное охлаждение образцов до криогенных температур с их последующим нагреванием. Исследования механических свойств образцов сплава Vit-105 (химической формулы:  $Zr_{53}Cu_{18}Ni_{14}Al_{10}Ti_5$ ), подвергнутых криоциклированию, также были проведены в рамках данного исследования.

*Материалы и методики исследования*

Для исследования механических характеристик от режима термообработки был использован сплав ОМС Vit-105 производства КНР.

Образцы в начальном состоянии подвергали процедуре криоциклирования. Этот метод включал последовательное охлаждение образцов в жидкий азот при температуре  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с последующим нагреванием до  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Произведено 1 и 10 криоциклов. Толщина образцов, прошедших этот процесс, не превышала 1 мм, обеспечивая быстрое нагревание и охлаждение.

Процедура трёхточечного изгиба включает свободное расположение образца на паре равных опор, который нагружается (изгибается) пуансоном, расположенным посередине между опорами, с постоянной скоростью до

момента разрушения образца. В ходе испытаний регистрируется нагрузка, действующая на образец, и соответствующие значения прогиба в промежутке между опорами.

На основе собранных в ходе изгиба данных рассчитываются различные характеристики механического поведения, в том числе модуль упругости, предел текучести, величина прогиба и максимальное напряжение в момент разрушения.

#### Анализ полученных результатов

При обычных условиях экспонирования образца аморфного сплава Vit-105 под нагрузкой формируется обширное количество полос сдвига, что влечет за собой проявление пластической деформации материала.

Результаты изгибных испытаний для ОМС Vit-105 представлены в таблице 1.

*Таблица 1*

Расчётные данные изгибных испытаний ОМС Vit-105, подвергнутых криоциклированию:

Образец VIT-105 Китай	Толщ h, мм	Ширина b, мм	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ ., МПа	$\sigma_r$ , МПа	Прогиб	Пластич. течение	Модуль упругос ти, ГПа
Исходный	0,76	1,99	2700	3580	3540	0,0775	0,0375	89,44
1 КЦ	0,76	1,99	2850	3645	3525	0,1155	0,078	93,9
10 КЦ	0,76	2	2400	3470	3450	0,06205	0,024	77,6

Результаты исследования демонстрируют более явное проявление доли пластичности при деформации после единичного криоцикла. При дальнейшем увеличении криоциклов до 10 отмечается уменьшение пластичности сплава.

#### Библиографический список

1. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов, 1975, 208 с.
2. Глезер, А.М. Структура и механические свойства аморфных сплавов. / Глезер А.М., Молотилев Б.В. – М.: Металлургия (1992) – С. 208.
3. Судзуки, К. Аморфные металлы / Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К., Перевод с япон. под. ред. Масумото Ц. – М.: Металлургия (1987) – С. 328.
4. Люборский, Ф.Е. Аморфные металлические сплавы. / Перевод с англ. под ред. Прокошина А.Ф., Люборского Ф.Е. – М.: Металлургия(1987). – С. 9-15.

© Титов В.В., 2023

А.М. ГУМЕРОВ, С.Р. ЯГАФАРОВ, Р.Р. САЛИМОВ

*salavat.yagafaroff@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук, доцент З.А. ЯГАФАРОВА

*Уфимский университет науки и технологий*

## **ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГЛАЗА И ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОСТРОТЫ ЗРЕНИЯ**

*Аннотация:* Статья посвящена оптической системе глаза и использованию биофизических методов для улучшения остроты зрения. Рассмотрены распространенные дефекты зрения глаз- близорукость и дальнозоркость. Приводятся примеры применения различных методов лечения при этих заболеваниях. В экспериментальной части приводятся результаты исследования влияния лечебной гимнастики на улучшение остроты зрения, однако, как следует из результатов опыта, эффект может быть временным.

*Ключевые слова:* оптическая система глаза, методы лечения, физические методы, миопия, острота зрения

Зрение является фундаментальным аспектом отражения действительности, позволяющим человеку воспринимать окружающий мир и ориентироваться в нем. Это сложный процесс, в котором несколько частей глаза и мозга работают совместно, интерпретируя и осмысливая визуальную информацию [1]. Однако на зрение могут повлиять различные факторы, такие как травма, болезнь, возраст и генетические состояния, которые могут повлиять на качество и ясность восприятия. Понимание биофизических основ работы глаза является ключом к поддержанию зрительного долголетия.

Оптическая система глаза представляет собой сложную биофизическую систему, состоящую из нескольких ключевых компонентов, включающих роговицу, водянистую влагу, хрусталик и сетчатку [2]. Свет попадает в глаз через роговицу, которая действует как защитное покрытие и помогает сфокусировать входящий свет на хрусталик. Хрусталик, расположенный за радужной оболочкой, помогает точно настроить фокус падающего света. Свет, проходя через хрусталик, преломляется и фокусируется на сетчатке. Сетчатка содержит миллионы клеток - фоторецепторов, которые преобразуют входящий свет в электрические сигналы, передающиеся в мозг через зрительные нервы. Далее эти сигналы интерпретируются мозгом, что позволяет человеку воспринимать зрительные образы.

Таким образом, свет попадая в глаз, формирует изображение на сетчатке. Полученное изображение изначально перевернуто, но мозг человека обрабатывает эту информацию и интерпретирует ее правильно, так что мы получаем изображение в правильной ориентации.

На качество полученного глазом изображения могут влиять различные факторы, как близорукость, дальнозоркость и астигматизм. Эти факторы приводят к тому, что свет, попадая в глаз, фокусируется не на сетчатке и при этом получается размытое или искаженное изображение. Например, при близорукости преломляющая система глаза обладает увеличенной оптической силой и слишком сильно фокусирует. В результате фокус располагается перед сетчаткой, а на сетчатке получается нечёткое изображение. Человек при этом хорошо видит вблизи, но плохо видит дальние предметы. Близорукость связана с анатомическими изменениями глазного яблока – оно вытягивается или изменяется преломляющая способность роговицы, сосуды могут растягиваться.

Для коррекции близорукости используют специальные оптические приспособления - рассеивающие линзы. За последние десятилетия число лиц, страдающих близорукостью, значительно возросло. Люди в очках стали неотъемлемой приметой современной жизни: всего в мире очки носят около 1 миллиарда человек [3]. Миопия чаще всего развивается в школьные годы и связана главным образом с длительной зрительной работой на близком расстоянии (чтение, письмо, черчение), особенно при неправильном освещении и плохих гигиенических условиях.

Существуют различные методы лечения дефектов глаз. К ним в первую очередь относятся хирургические методы лечения с помощью эксимерного лазера на аппаратах LASIK, PRK, LASEK и др. Эксимерный лазер генерирует ультрафиолетовый свет определенной длины волны (193 нм). Для получения волны с такой длиной волны используется фторид аргона, ионы которого возбуждаются в электрическом поле, далее эти атомы излучают фотоны света. Затем луч света проходит через ряд зеркал и призм внутри аппарата, управляя импульсами эксимерного лазера с помощью компьютера, проводятся операции над роговицей. После проведения операции световые лучи идеально фокусируются на сетчатке без необходимости использования корректирующих линз.

Кроме того, при начальных этапах заболевания можно замедлить прогрессирование миопии, занимаясь профилактикой и внося определенные изменения в образе жизни, то есть чаще бывать на свежем воздухе и сократить время, проводимое перед экраном. Существуют различные упражнения и другие техники для улучшения работы глаз и мозга. Выполнение специальных комплексов упражнений в сочетании с приемом витаминов и способствуют улучшению или поддержанию работы глазного аппарата.

Например, устройство, излучающее свет определенной длины волны-светоизлучающий тренажер для глаз предназначен для тренировки глаз и улучшения остроты зрения. Электрофорез – совершенно безболезненный метод лечения, применимый также для детей раннего возраста и взрослых. С помощью постоянного или импульсного тока в организм человека через слизистые оболочки вводятся специальные препараты, способствующие улучшению состояния органов зрения. Инфракрасный лазер – это метод, суть которого заключается в воздействии на глаз красного луча, за счет чего выравнивается ось

в зрительном аппарате. Магнитотерапия – коррекция зрения путем воздействия на глаза магнитами, которые кладут на плотно закрытые веки.

Синоптофор – комплекс тренировочных упражнений на специальном электронном устройстве, в котором 2 картинки объединяются в одну. Этот метод тренирует возможности зрительного аппарата, увеличивает подвижность глазных яблок. Массаж также является важной частью общего лечения миопии. Больше всего благотворное влияние оказывает ручной массаж воротниковой зоны [4].

В экспериментальной части работы проверялось влияние лечебной гимнастики на коррекцию зрения при миопии.

Острота зрения — это способность глаза воспринимать два изображения одновременно, когда они находятся на разном расстоянии друг от друга, измеряется в определенных единицах. Острота зрения, при которой человек четко видит все буквы проверочной таблицы с расстояния 5 метров, равняется единице. Например, человек видит только седьмую строчку. Это значит, что показатель зрения равен 0,7 или 70%. Чаще всего при сильной близорукости и астигматизме без использования очков человек способен различать только первые строчки и видеть двумя глазами разное количество строк.

Острота зрения – главная функция наших глаз. Возможности нашего зрительного анализатора находятся в зависимости от его оптической силы, а оптическая сила от его анатомического строения: кривизны роговицы и хрусталика, длины глазного яблока, размеров и расположения рецепторов, воспринимающих свет – все играет роль. Когда все эти части зрительного анализатора соответствуют друг другу, то острота зрения 1,0 и выше.

Существует несколько причин падения остроты зрения. Это наследственный фактор, перенапряжение глаз при работе за компьютером, некоторые функциональные и возрастные заболевания (отслоение сетчатки, катаракта, глаукома), различные инфекции.

Для проверки остроты зрения врачи пользуются особыми таблицами. Существуют разные системы измерения остроты зрения: арифметическая, логарифмическая, logMAR. В арифметической системе шкала остроты зрения меняется с одинаковым шагом 0,1. В Европе стандартной является логарифмическая система.

Для участия в эксперименте были приглашены испытуемые в количестве 14 человек, которые были разделены в две группы: контрольную и экспериментальную. С использованием таблицы Сивцева была определена острота зрения испытуемых. На первом этапе испытуемые ответили на вопросы анкетирования, в котором охарактеризовали степень состояния зрения. Использование критерия Манна-Уитни позволило сравнить экспериментальную и контрольную группы. Результаты расчета:  $U_{кр}=11$ ;  $U_{эм}=20,5$ , что означает – различия по исследуемому параметру не значительны, можно сравнивать две группы.

Испытуемые экспериментальной группы выполняли предлагаемое специальные упражнения два раза в день. Острота зрения испытуемых

экспериментальной и контрольной групп проверялась 2 раза в неделю и приводится в виде зависимости от времени.

На рисунках 1 и 2 даются зависимости остроты зрения испытуемых экспериментальной группы от времени для левого и правого глаза, на рисунках 3 и 4 представлены зависимости остроты зрения испытуемых контрольной группы от времени.

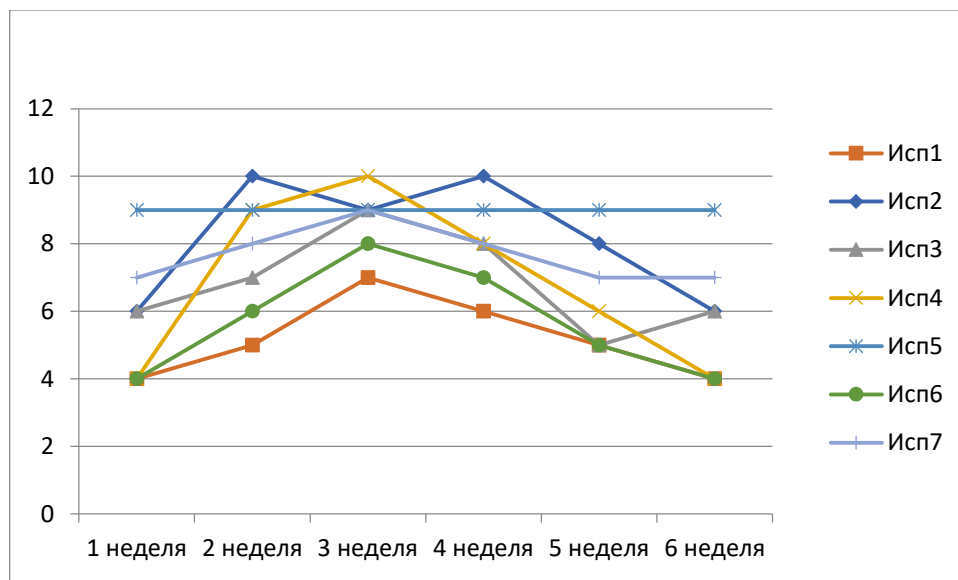


Рис. 1. Зависимость остроты зрения испытуемых экспериментальной группы от времени для левого глаза

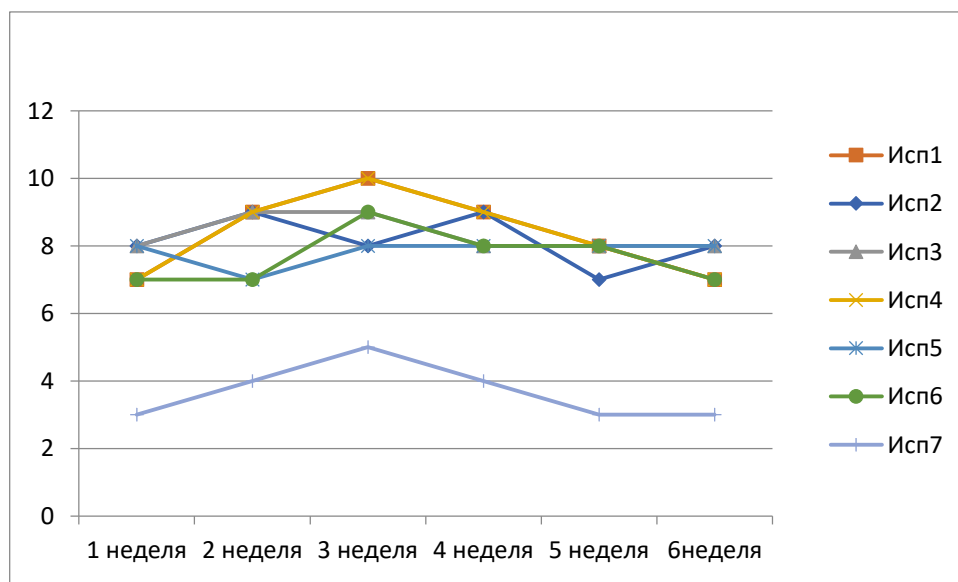


Рис. 2. Зависимость остроты зрения испытуемых экспериментальной группы от времени для правого глаза

Согласно результатам, занятия гимнастикой для глаз постоянно, в течение трех недель привело к повышению остроты зрения 1–3 единиц почти у всех испытуемых. Затем занятия прекратились, величина остроты зрения почти у каждого испытуемого вернулось к прежнему значению.

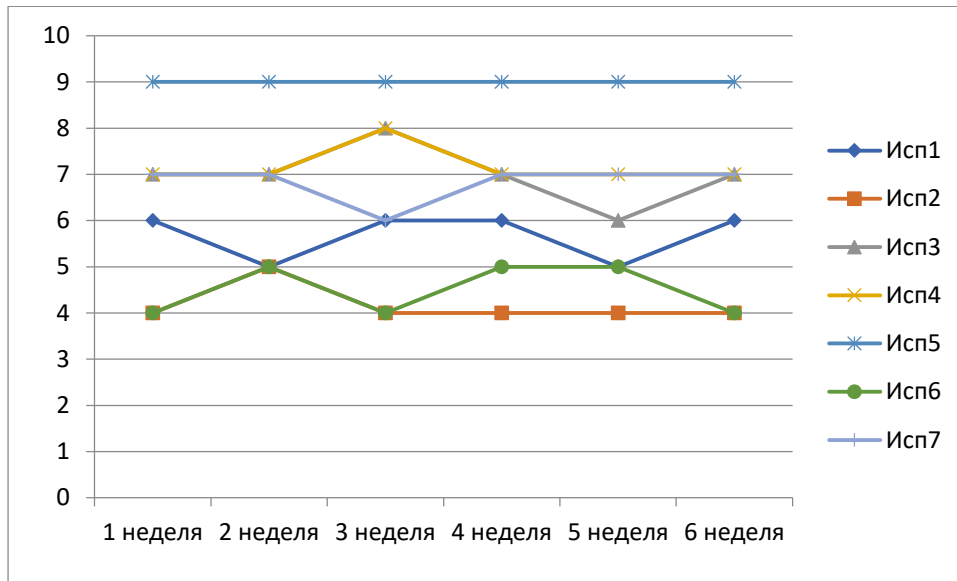


Рис. 3. Острота зрения в зависимости от времени у испытуемых контрольной группы для левого глаза

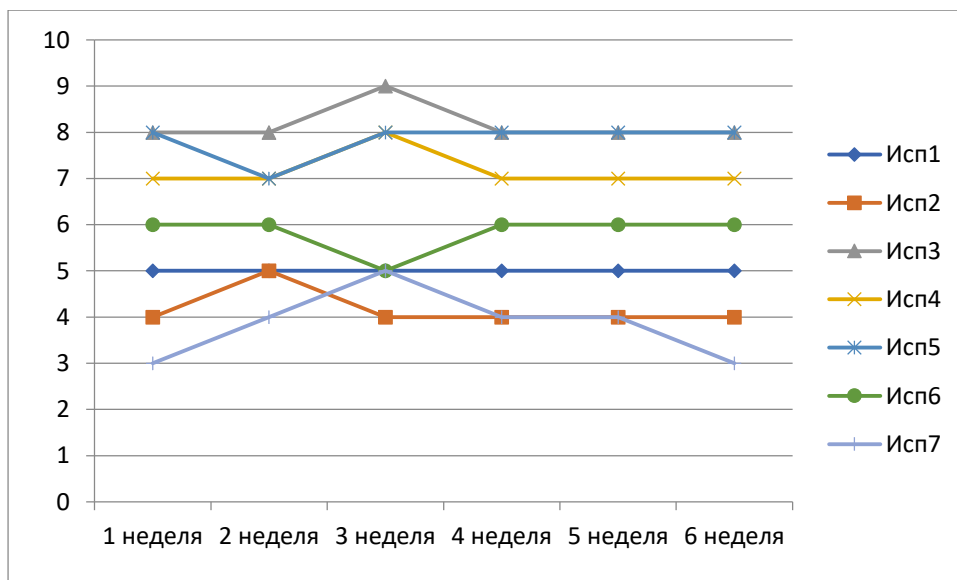


Рис. 4. Острота зрения в зависимости от времени у испытуемых контрольной группы для правого глаза

Таким образом, в экспериментальной части работы изучено влияние лечебной гимнастики на коррекцию зрения при миопии.

Согласно результатам исследований, занятия гимнастикой для глаз периодически в течение трех недель приводит к повышению остроты зрения у испытуемых экспериментальной группы на 1–3 единиц. В контрольной группе, как видно из рисунков 3 и 4, острота зрения осталась на прежнем уровне. Но и в экспериментальной группе после прекращения гимнастики для глаз уже через неделю положительный эффект от физических упражнений исчезает. Данный факт говорит о том, что специальные упражнения для поддержания остроты зрения должны выполняться постоянно.



## Библиографический список

1. Аветисов Э.С. Близорукость. – М.: Медицина, 1999. – 285 с.
2. Молковский А. Зрение человека. – С.: «Слово», 1983. – 347 с.
3. Демирчоглян Г.Г. Тренируйте зрение. – М.: Советский спорт, 1990. – 173 с.
4. Троицкая С.И. Восстанови здоровье глаз без операций и лекарств. – М.: Феникс. 2012. – 224 с.

© Гумеров А.М., Ягафаров С.Р, Салимов Р.Р., 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### **СЕКЦИЯ 2.1. НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

*Р.Н. АСФАНДИЯРОВ, Д.А. АКСЕНОВ, М.А. ШИШКУНОВА*

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Mg-Zn-Zr, ПОДВЕРГНУТОГО РКУП-К..... 3

*М.А. БЕЛЯНСКАЯ*

ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ КРУЧЕНИЕМ СТАЛИ 316..... 6

*А.Р. БОГДАНОВ, А.Е. МЕДВЕДЕВ*

РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ОБРАБОТКИ ТРЕНИЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ (ОТП) НА ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ШИНЕ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА..... 10

*Ф.Ф. ГУМЕРОВА*

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПСЕВДО- $\beta$  СПЛАВА Ti-10V-2Fe-3Al..... 16

*А.Р. ДАЛИМОВА*

ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЁРДОСТЬ СПЛАВА Cu-2%Be В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ..... 21

*А.Р. ЗАЙНУЛЛИНА*

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЛ30..... 26

*Э.И. ИСХАКОВА*

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$  В КРУПНОЗЕРНИСТОМ СОСТОЯНИИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ СТАРЕНИЕМ..... 30

*К.Э. КИРЬЯНОВА, А.Е. МЕДВЕДЕВ*

ПОЛУЧЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДНО-АЛЮМИНИЕВОЙ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ПРОВОЛОКИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ..... 35

*Д.С. МЕЛЬНИКОВ*

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ 110X18M..... 41

*А.А. ПРОТАЦКАЯ*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПОРИСТОСТИ ОБРАЗЦОВ..... 45

*А.А. РИХСИЕВ, Е.В. ПАРФЕНОВ*

СНИЖЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПОЛИРОВКИ..... 50

<i>А.Р. САБИТОВ</i>	
ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ СПЛАВА Ti-18Zr-15Nb И ПЭО ПОКРЫТИЯ НА НЕМ.....	54
<i>С.И. САЛАТОВА, И.А. РАМАЗАНОВ</i>	
МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg В НАНОСТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ.....	59
<i>А.Р. СИРАЗЕЕВА, М.О. ЗАЙДАЛКИЛАНИ, А.М. АБУАЙЯШ</i>	
ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Fe <sub>30</sub> Ni <sub>30</sub> Mn <sub>30</sub> Cr <sub>10</sub> , ПОДВЕРГНУТОГО ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	63
<i>Т.Б. СУМЫНИНА</i>	
ВЛИЯНИЯ РКУП НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ TWIP СТАЛИ.....	66
<i>Н.А. ХАЙБУЛИНА</i>	
РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В СТАЛИ 13X11H2B2MФ-Ш ПОСЛЕ ХОЛОДНОГО ПРОКАТА И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ.....	70
<i>Р.З. ХАМАТДИНОВ, И.А. РАМАЗАНОВ</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ СТАЛИ 20X13 НА РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭЛЕКТРОЛИТА И ИСХОДНЫХ ПОДГОТОВКАХ ПОВЕРХНОСТИ.....	75
<i>Д.А. ШАРАФУТДИНОВ, Э.И. УСМАНОВ</i>	
ВЛИЯНИЕ ИПДК НА МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ.....	81
<i>В.С. ШТАТНОВА, О.М. ХАПКОВ</i>	
РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ.....	86
<b>СЕКЦИЯ 2.2. МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ</b>	
<i>Г.А. АБДУРАСУЛОВА</i>	
МЕЖЛАБОРАТОРНЫЕ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	90
<i>К.В. ГАБДРАХМАНОВА</i>	
СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ГОСТ Р ИСО 9001-2015.....	94

<i>Э.И. ГАЙФУЛЛИНА</i>	
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОФОРМЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРКИ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗАЦИИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....	96
<i>З.Р. ЗАЙДУЛЛИНА</i>	
ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОЛОГИИ ТЕСТИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ВУЗОВ.....	101
<i>А.Р. КАНЗАФАРОВА</i>	
МЕЖЛАБОРАТОРНЫЕ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПО КАЛИБРОВКЕ ЦИФРОВОГО МАНОМЕТРА ДМ5002М.....	105
<i>Г.Р. МУСИНА</i>	
ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ДОКАЗАТЕЛЬСТВО МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ АНАЛИЗАТОРОВ КАЧЕСТВА МОЛОКА.....	108
<i>А.А. НЕСТЕРОВА</i>	
СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.....	113
<i>А.И. НИГМАТУЛЛИНА</i>	
АНАЛИЗ ОПЫТА МЕЖДУНАРОДНОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ В СФЕРЕ СТАНКОСТРОЕНИЯ.....	118
<i>М.Д. НУРМУХАМИТОВ</i>	
ПОВЕРКА СЧЕТЧИКА ГАЗОВОГО ДИАФРАГМЕННОГО ВГ-G6Т.....	121
<i>А.А. ОСИНСКАЯ</i>	
ОЦЕНКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТОЧНОСТЬ СТАНКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН.....	125
<i>Р.Р. ШАВАЛЕЕВ</i>	
ВЛИЯНИЕ СТАНДАРТОВ ОРГАНИЗАЦИИ НА УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ В ПРОЦЕССЕ ОСВОЕНИЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	129
<i>Д.И. ШВЕЦОВА</i>	
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СЧЕТЧИКОВ ХОЛОДНОЙ И ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	132
<b>СЕКЦИЯ 2.3. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ</b>	
<i>С.Ф. ХАЛИЛОВ</i>	
ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ В ХОНИНГОВАНИИ.....	135
<i>Д.П. КРАСНИКОВ</i>	
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ.....	139

<i>С.Е. КУЛЕШОВ</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	143
<i>А.А. САЗАНОВ, Т.Р. ИСМАГИЛОВ, Л.Р. КИЛЬМЕТОВА</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ТОЧЕНИЯ.....	145
<i>М.Р. ХАБИБУЛЛИН</i> ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПЕРФОРАЦИИ ЛОПАТОК ТУРБИН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	151
<i>С.Ф. ХАЛИЛОВ</i> ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ В ХОНИНГОВАНИИ.....	157
<i>С.Е. КУЛЕШОВ</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	161
<b>СЕКЦИЯ 2.4. СВАРОЧНЫЕ, ЛИТЕЙНЫЕ И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b>	
<i>Ж.Ф. ЗАРИФЖОНОВ</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОТЛИВКИ «ПЛИТА» В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ PROCAST.....	164
<i>Р.Р. МУСТАЕВ</i> КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	167
<i>В.С. НАЗАРОВА</i> ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ И ЭФФЕКТИВНОГО КПД ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ КАЛОРИМЕТРИРОВАНИЯ.....	172
<i>В.К. ОРЛОВ</i> ПОРООБРАЗОВАНИЕ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МЕТОДОМ WAAM.....	175
<i>В.М. ПРЯГАЕВ; И.И. ХАЙРУЛЛИН</i> ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ СПЕКАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОКОРУНДА.....	179
<i>И.Ф. ХУЗИЕВ</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ МАШИНЫ СВАРКИ ТРЕНИМ МСТ-35.....	183

<i>Э.И. ШАФИЕВА</i>	
ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТЛИВОК ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	187
<i>А.Р. ЮСУПБАЕВ</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ НА ПРОЧНОСТЬ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ ЛИТЬЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	190
<b>СЕКЦИЯ 2.5. МАШИНОСТРОЕНИЕ</b>	
<i>Д.А. БУЯНОВ</i>	
РАССМОТРЕНИЕ ДВУХ ОСНОВНЫХ ВАРИАНТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЫСТРОСМЕННЫХ КОНДУКТОРНЫХ ВТУЛОК.....	197
<i>А.Д. ГАЛИМОВА</i>	
ОБЗОР РАБОТ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ НОРМАЛЬНОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ИЗМЕНЕНИЮ СТРУКТУРЫ.....	202
<i>И.М. ГАНЕЕВ</i>	
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ И СПОСОБЫ ИХ НАНЕСЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРОШИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА.....	206
<i>Р.Х. ДАМИНОВА</i>	
ОСОБЕННОСТИ СУХОГО ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ.....	211
<i>Е.С. ДМИТРИЕВ</i>	
РАЗРАБОТКА СТАНДАРТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ ДЛЯ ЭФМО (ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ).....	220
<i>А.Ч. МАГИЗОВ</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СУХОГО ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛОПАТОК ДЕТАЛИ «ЗАВИХРИТЕЛЬ».....	223
<i>Т.Е. ПАВЛОВА</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ.....	226
<i>А.С. ПЕТРИКОВ</i>	
АНАЛИЗ КАЧЕСТВА КОМПОНОВОК ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВНЫХ СТАНКОВ.....	228
<i>Д.Р. САФИУЛЛИНА</i>	
ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ДОБАВКОЙ ЧАСТИЦ ЦИНКА ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ.....	232

<i>В.Ю. СУЛЕЙМАНОВА</i>	
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА.....	236
<i>А.Р. ХАЙТКУЛОВ</i>	
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ: МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.....	240
<i>Б.И. ШАКИРОВ</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	245
<i>Г.И. ИСКУЖИНА</i>	
РАЗРАБОТКА ГРУППОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЯ И КОНТУРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	250
<i>Р.Р. МУСТАЕВ</i>	
ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГТД ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ.....	257
<b>СЕКЦИЯ 2.6. СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА</b>	
<i>Т.И. БАЛГАЗИН, М.В. ГОЛОВИН</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	262
<i>Е.С. КИРИЛОВА</i>	
МИКРОСТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ КОМПОЗИТА $Al+TiO_2$ , ПОДВЕРГНУТОГО ОБРАБОТКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ.....	267
<i>Э.И. МУСТАФИН</i>	
УБОРКА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА.....	272
<i>А.Р. ПАРФЕНОВ</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ РАДИАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ.....	276
<i>В.В. ТИТОВ</i>	
ЭФФЕКТ КРИОЦИКЛИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ОМС VIT-105.....	281
<i>А.М. ГУМЕРОВ, С.Р. ЯГАФАРОВ, Р.Р. САЛИМОВ</i>	
ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГЛАЗА И ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОСТРОТЫ ЗРЕНИЯ.....	283

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

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

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.

*Научное издание*

## **МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

**Том 2**

*Материалы*

*XVII Всероссийской молодёжной научной конференции*

*(г. Уфа, 21 – 23 ноября 2023 г.)*

*Электронное издание сетевого доступа*

*За достоверность информации, изложенной в статьях,  
ответственность несут авторы.*

*Статьи публикуются в авторской редакции*

Подписано к использованию 08.11.2024 г.  
Гарнитура «Times New Roman». Объем 11,64 Мб.  
Заказ 180.

*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»  
450008, Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.*

Тел.: +7-908-35-05-007  
e-mail: ric-bdu@yandex.ru