

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

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

XV Всероссийская молодежная научная конференция

Том 2



Уфа 2021

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

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

XV Всероссийская молодежная научная конференция

Том 2

Научное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ
ISBN 978-5-4221-1529-7
ISBN 978-5-4221-1531-0 (Т. 2)

Уфа 2021

Мавлютовские чтения : материалы XV Всероссийской молодежной научной конференции : в 7 томах [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2021.

Том 2. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EI_izd/2021-124.pdf

Содержатся статьи, включенные в программу XV Всероссийской молодежной научной конференции, состоявшейся в УГАТУ 26–28 октября 2021 г.

Организационный комитет конференции:

Председатель оргкомитета:

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

Зам. председателя оргкомитета:

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

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

Члены оргкомитета:

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

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

Зуева М. С. – и. о. декана ОНФ, канд. экон. наук, доцент (г. Уфа, Россия);

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

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

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

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

Биглов М. М. – начальник ИВТО, канд. техн. наук, доцент (г. Уфа, Россия);

Мусин Н. Х. – директор Центра трансфера технологий (г. Уфа, Россия);

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

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

Отв. секретарь оргкомитета:

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

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

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

Материалы публикуются в авторской редакции

Ответственный за выпуск *Т. В. Разяпов*

Предпечатная подготовка *Л. А. Вяземская*

Программирование и компьютерный дизайн *М. В. Южакова*

Подписано к использованию: 18.10.2021

Объем 9,57 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Тел.: +7-908-35-05-007

e-mail: rik@ugatu.su

Все права на размножение, распространение в любой форме остаются за разработчиком.

Нелегальное копирование, использование данного продукта запрещено.

СЕКЦИЯ 2.1 НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 538.9

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

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПОВЕДЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ СИЛЬНО ДЕФОРМИРУЕМЫХ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Углеродные нанотрубки (УНТ) обладают уникальным сочетанием физических и механических свойств, что делает их привлекательными для ряда применений. Исследование механического отклика пучка УНТ в условиях плоской деформации (одноосное и двухосное поперечное сжатие), поскольку он может использоваться в качестве упругого демпфера для защиты от вибрации и ударов. В данной работе с помощью цепной модели с уменьшенным числом степеней свободы исследуется поведение пучка УНТ при одноосном боковом сжатии. Квазистатическое нагружение используется для расчета упругих постоянных пучка. Динамическое нагружение выявляет распространение ударных волн двух типов: более быстрое распространяется со скоростью продольного звука и вызывает незначительную деформацию поперечных сечений УНТ, а второе распространяется примерно в три раза медленнее и приводит к схлопыванию УНТ.

Ключевые слова: пучок углеродных нанотрубок; условия плоской деформации; боковое сжатие, упругий демпфер.

Введение

Углеродные нанотрубки (УНТ) притягиваются друг к другу относительно слабыми силами Ван-дер-Ваальса и могут создавать молекулярные кристаллы, также называемые пучками УНТ [1-3]. Пучки УНТ могут быть получены различными способами [4,5]. Они обладают превосходными механическими свойствами, поскольку отдельные УНТ имеют очень высокий предел прочности при растяжении в диапазоне от 11 до 63 ГПа, модуль Юнга при растяжении от 1,0 до 1,3 ТПа и высокую деформацию до разрушения около 10% [6,7]. Кроме того, УНТ гибкие, легкие, имеют хорошие тепловые и электрические проводники; поэтому они могут быть предложены для ряда приложений [8, 9]. Наиболее важными механическими приложениями УНТ являются высокопрочные канаты [2, 10], волокна [11, 12], композиты с полимерной и металлической матрицей [12, 13], твердые смазочные материалы [14], ударопрочные конструкции [15], и т. д.

Компьютерное моделирование способствует лучшему пониманию физических и механических свойств пучков УНТ. Преобразование вертикально выровненного леса УНТ в горизонтально выровненный под действием давления изучалось в [16,17]. Оболочечная модель была использована для описания ансамбля УНТ различной морфологии [18]. Применимость моделей пучка, пластины и оболочки для анализа механических свойств наноматериалов была проанализирована в [19,20]. УНТ, диаметр которых превышает пороговое значение, могут находиться как в круглом, так и в свернутом состоянии [21-23]. Для исследования механического отклика пучков УНТ были разработаны нелинейные крупнозернистые потенциалы [24]. Для уменьшения количества степеней свободы, учитываемых при моделировании некоторых sp^2 -углеродных наноструктур, была разработана цепная модель [25]. Эта модель была успешно применена для моделирования структуры и свойств складок и свитков углеродных нанолент [25-29] и поверхностных рипплокаций [30]. В работах [31,32] цепная модель была распространена на исследование УНТ при боковом сжатии в условиях плоской деформации. Демпфирующие свойства пучка УНТ описаны в [33]. Механические свойства и фазовые переходы в пучке УНТ при боковом сжатии проанализированы в [34,35]. Скрученные графеновые наноленты демонстрируют повышенное сопротивление осевому сжатию [36,37]. Уединенные волны [30,38] и ударные волны [39] в наноматериалах также были проанализированы, хотя динамические проблемы остаются гораздо менее изученными.

До сих пор цепная модель использовалась для анализа статического нагружения пучков УНТ [31-35], а в этой работе мы также рассматриваем динамическое нагружение (ударное сжатие).

Методика

Вычислительная модель, использованная в этом исследовании, схематически показана на рисунке 1. Пучок нанотрубок выровнен вдоль оси z , и УНТ одинакового диаметра создают в поперечном сечении треугольную решетку; они пронумерованы индексами $i = 1, \dots, I$ и $j = 1, \dots, J$ (показан случай $I = J = 2$). Для простоты рассматриваются только зигзагообразные УНТ. Атомы углерода движутся в плоскости (x, y) , и каждый атом представляет собой жесткий ряд

атомов, ориентированных перпендикулярно плоскости (x, y) . Внутри каждой УНТ атомы углерода нумеруются индексом $n = 1, \dots, N$ против часовой стрелки, начиная с атома с максимальной координатой x . Таким образом, общее количество атомов в расчетной ячейке составляет $I \times J \times N$. Позиции атомов определяются радиус-векторами $r_{ijn} = (x_{ijn}, y_{ijn})$. Ставятся периодические граничные условия.

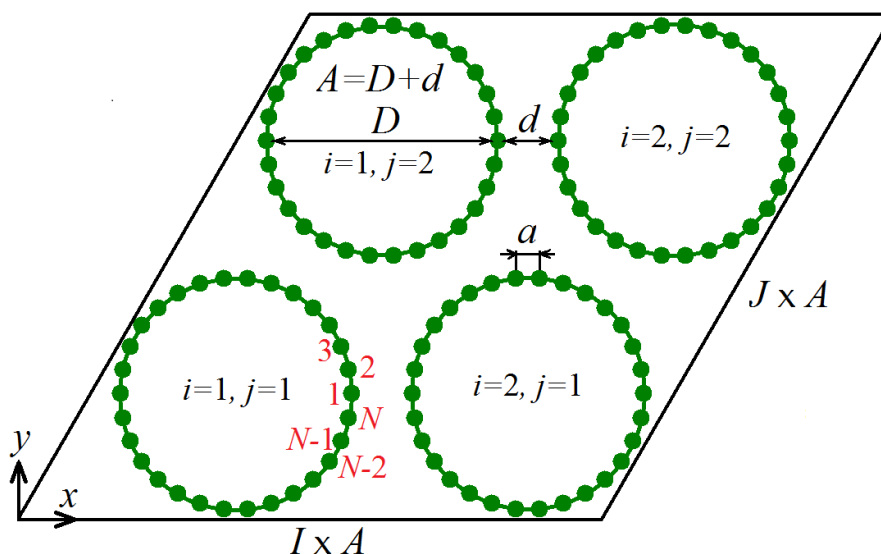


Рис. 1. Схема вычислительной ячейки, включающей УНТ $I \times J$ ($I=10, J=12$ в этой работе и $I=J=2$ на этом рисунке), пронумерованной индексами $i=1, \dots, I$ и $j=1, \dots, J$. Углеродные нанотрубки в поперечном сечении образуют треугольную решетку. Атомы имеют две степени свободы, составляющие вектора смещения в плоскости (x, y) . Цепочки атомов, нормальные к плоскости (x, y) , движутся как твердые тела

Межатомное расстояние в графене $\rho = 1.418 \text{ \AA}$. Расстояние между соседними атомными рядами в зигзагообразной УНТ составляет $a = \rho\sqrt{3}/2 = 1.228 \text{ \AA}$, и это расстояние между атомами в модели цепочки (см. рис. 1). Диаметр углеродных нанотрубок составляет $D = a / \sin(\pi/N)$. Пусть d - кратчайшее расстояние между стенками УНТ, тогда расстояние между центрами соседних УНТ составляет $A = D + d$. Сторонами вычислительной ячейки в форме параллелограмма являются $I \times A$ и $J \times A$. В наших моделях рассматриваем УНТ с $N = 30$ и имеющим диаметр $D = 11,75 \text{ \AA}$ и равновесным значением $d = 3,088 \text{ \AA}$, что можно сравнить с межплоскостное расстояние графита равно $3,3 \text{ \AA}$.

Пучок углеродных нанотрубок при равномерном боковом сжатии может быть эффективно описан гамильтонианом цепной модели

$$H=K+U_B+U_A+U_{vdw}, \quad (1)$$

который включает кинетическую энергию

$$K = \frac{M}{2} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N (\dot{x}_{ijn}^2 + \dot{y}_{ijn}^2), \quad (2)$$

энергию валентных связей

$$U_B = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N V(|r_{ijn+1} - r_{ijn}|), \text{ где } V(r) = \frac{k}{2}(r - a)^2, \quad (3)$$

энергию валентных углов

$$U_A = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N P(\theta_{ijn}), \text{ где } P(\theta) = \varepsilon[\cos(\theta) + 1], \quad (4)$$

и энергетические или ван-дер-ваальсовы взаимодействия

$$U_{vdw} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^J \sum_{n'=1}^N W(|r_{ijn} - r_{i'j'n'}|), \text{ где } |n' - n| > 3 \text{ когда } i = i', j = j' \quad (5)$$

где $|n' - n| > 3$, когда $i = i', j = j'$.

В уравнении (2) M - масса атома углерода, которая составляет 12 а.е.м. В моделях время измеряется в пикосекундах, энергия в эВ и расстояние в ангстремах. В этих единицах $M=12 \times 1.0364 \times 10^{-4}$. Как видно из уравнения (3), гармонический потенциал с жесткостью k используется для моделирования деформации валентных связей. Чтобы воспроизвести продольную жесткость графенового листа, нужно взять $k = 405$ Н/м, что в принятых единицах дает $k = 25,279$.

В уравнении (4) косинус угла между двумя валентными связями, $r_{ijn} - r_{ijn-1}$ и $r_{ijn+1} - r_{ijn}$ вычисляется как

$$\cos(\theta_{ijn}) = \frac{(r_{ijn} - r_{ijn-1}, r_{ijn+1} - r_{ijn})}{|r_{ijn} - r_{ijn-1}| |r_{ijn+1} - r_{ijn}|}. \quad (6)$$

Жесткость на изгиб графенового листа хорошо воспроизводится при значении потенциального параметра $\varepsilon = 3,50$ эВ.

Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия в уравнении (5) задаются потенциалом Леннарда-Джонса (5,11)

$$W(r) = \frac{\varepsilon}{6} \left[5 \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{11} - 11 \left(\frac{\sigma}{r} \right)^5 \right], \quad (7)$$

с энергией взаимодействия $\varepsilon = 0,00166$ эВ и равновесной длиной связи $\sigma = 3,61$ Å.

УНТ достаточно большого диаметра могут иметь как цилиндрическую, так и сжатую равновесную конфигурацию. В настоящей работе мы рассматриваем УНТ относительно небольшого диаметра ($N = 30$, $D = 11,75$ Å), которые в ненагруженном состоянии имеют только круговое стабильное состояние.

Результаты

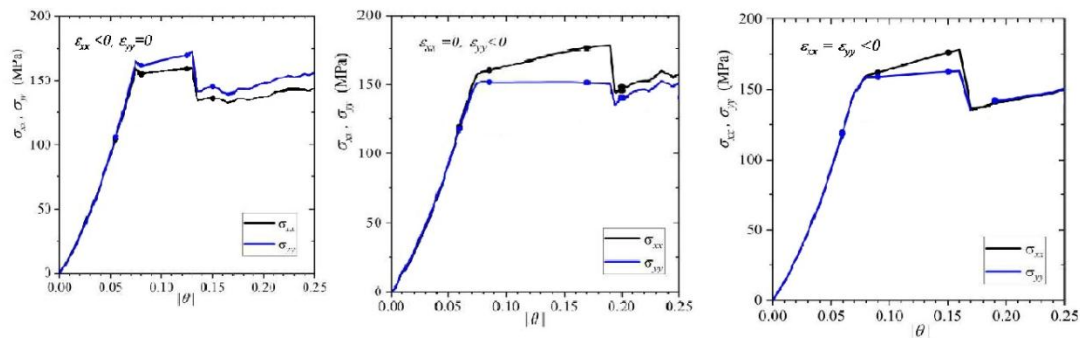


Рис. 2

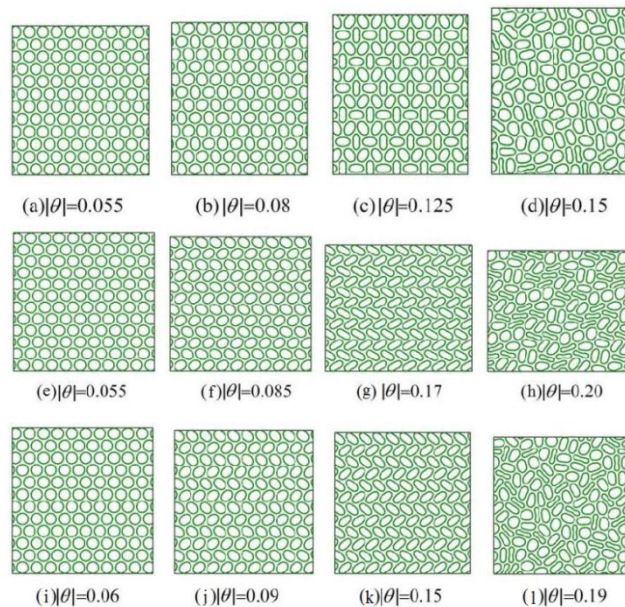


Рис. 3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tersoff J and Ruoff R S. *Physical Review Letters* // 1994. 73 676-679
2. Thess A, Lee R, Nikolaev P, Dai H, Petit P, Robert J, Xu C, Lee Y H, Kim S G, Rinzler A G, Colbert D T, Scuseria G E, Tomanek D, Fischer J E, and Smalley RE. *Science* // 1996. 273 483-487
3. Saether E, Frankland S J V, and Pipes R B. *Composites Science and Technology* // 2003. 63 1543-1550
4. Rakov E G. *Russian Chemical Reviews* // 2013. 82 538-566
5. Bedewy M, Meshot E R, Guo H, Verploegen E A, Lu W and Hart A J. *The Journal of Physical Chemistry C* // 2009. 113 20576-20582
6. Shenderova O A, Zhirnov V V and Brenner D W. *Critical Reviews in Solid State* // 2002. 27 227-356
7. Yu M-F. *Journal of Engineering Materials and Technology* // 2004. 126 271-278
8. Truong T K, Lee Y and Suh D. *Current Applied Physics* // 2016. 16 1250-1258
9. Yao X, Hawkins S C and Falzon B G. *Carbon* // 2018. 136 130-138
10. Yu M-F, Files B S, Arepalli S, and Ruoff R S. *Physical Review Letters* // 2000. 84 5552-5555
11. Bai Y, Zhang R, Ye X, Zhu Z, Xie H, Shen B, Cai D, Liu B, Zhang C, Jia Z, Zhang S, Li X, and Wei F. *Nature Nanotechnology* // 2018.13 589-595
12. Dang Z-M, Yuan J-K, Zha J-W, Zhou T, Li S-T and Hu G-H. *Progress in Materials Science* // 2012. 57 660-723
13. Bakshi S R, Lahiri D and Agarwal A. *International Materials Reviews* // 2010. 55 41-64
14. Reinert L, Lasserre F, Gachot C, Grützmacher P, Maclucas, Souza N, Mücklich F and Suarez S. *Scientific Reports* // 2017. 7 42873
15. Randjbaran E, Majid D L, Zahari R, Sultan M T H and Mazlan N. *Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering* // 2020. 18 229
16. Wittmaack B K, Volkov A N and Zhigilei L V. *Carbon* // 2019.143 587
17. Wittmaack B K, Volkov A N and Zhigilei L V. *Compos. Sci. Technol.* // 2018. 166 66
18. Yakobson B I, Brabec C J and Bernholc J. *Phys. Rev. Lett.* // 1996. 76 2511
19. Rafii-Tabar H, Ghavanloo E and Fazelzadeh S A. *Phys. Rep.* // 2016. 638 1
20. Harik V M. *Solid State Commun.* // 2001. 120 331
21. Impellizzeri A, Briddon P and Ewels C P. *Phys. Rev. B* // 2019. 100 115410
22. Chopra N G, Benedict L X, Crespi V H, Cohen M L, Louie S G and Zettl A. *Nature* // 1995. 377 135
23. Chang T. *Phys. Rev. Lett.* // 2008. 101 175501
24. Ji J, Zhao J and Guo W. *J. Mech. Phys. Solids* // 2019. 128 79
25. Savin A V, Korznikova E A and Dmitriev S V. *Phys. Rev. B* // 2015. 92 035412
26. Savin A V, Korznikova E A and Dmitriev S V. *Phys. Solid State* // 2015. 57 2348
27. Savin A V, Korznikova E A, Lobzenko I P, Baimova Y A and Dmitriev S V. *Phys. Solid State* // 2016. 58 1278
28. Savin A V, Korznikova E A, Dmitriev S V and Soboleva E G. *Comp. Mater. Sci.* // 2017. 135 99
29. Savin A V and Mazo M A. *Adv. Struct. Mat.* // 2019. 94 241
30. Savin A V, Korznikova E A and Dmitriev S V. *Phys. Rev. B* // 2019. 99 235411
31. Korznikova E A, Rysaeva L K, Savin A V, Soboleva E G, Ekomasov E G, Ilgamov M A and Dmitriev S V. *Materials* // 2019. 12 3951
32. Abdullina D U, Korznikova E A, Dubinko V I, Laptev D V, Kudreyko A A, Soboleva EG, Dmitriev S V and Zhou K. *Computation* // 2020.8 27
33. Rysaeva L K, Korznikova E A, Murzaev R T, Abdullina D U, Kudreyko A A, Baimova J A, Lisovenko D S and Dmitriev S V. *Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering* // 2020. 18 1
34. Abdullina D U, Kudreyko A A, Korznikova E A, Shepelev I A and Dmitriev S V. *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE* // 2020. 11459 1145911
35. Babicheva R I, Dmitriev S V, Korznikova E A and Zhou K. *J. Exp. Theor. Phys.* // 2019. 129 66

36. Savin A V, Korznikova E A, Krivtsov A M and Dmitriev S V. *Eur. J. Mech. A-Solid.* // 2020. 80 103920
37. Savin A V, Korznikova E A and Dmitriev S V. *Mech. Mater.* // 2019. 137 103123
38. Korznikova E A and Dmitriev S V. *J. Phys. D Appl. Phys.* // 2014. 47 34
39. Shepelev I A, Chetverikov A P, Dmitriev S V and Korznikova E A. *Comp. Mater. Sci.* // 2020. 177 109549
40. Hosseini-Hashemi S, Sepahi-Boroujeni A and Sepahi-Boroujeni S. *Appl. Surf. Sci.* // 2018. 437 366

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MTEX

Аннотация. Моделирование на разных масштабных уровнях учитывает влияние параметров интенсивной пластической деформации (ИПД) и процессов деления зерен, что позволяет полностью описать получение наноструктурированных материалов в процессе ИПД и адекватно рассчитать поведение при деформации в заданных условиях нагружения. При помощи программного пакета MTEX было описано поведение меди в ходе ИПД с использованием многоуровневого моделирования, а также была воспроизведена характерная деформационная структура простого сдвига.

Ключевые слова: моделирование; масштабные уровни; текстура; ориентация; наноструктура; полюсная фигура.

Введение

Наноструктурные материалы являются предметом пристального внимания ученых в области физики металлов и материаловедения, так как они могут демонстрировать высокие механические и служебные свойства. Это делает их чрезвычайно интересными как с научной, так и с прикладной точки зрения, особенно привлекательны материалы, полученные методами ИПД. [1,2]

Как известно, технологические параметры ИПД (степень деформации, скорость, температура, приложенное давление и др.) могут существенно влиять на специфику микроструктур, формируемых в материалах при наноструктурировании (размер зерен, спектр разориентировки границ зерен, кристаллографическая текстура и т. д.). Но, в свою очередь, параметры наноструктуры оказывают решающее влияние на свойства материалов, подвергнутых ИПД, в первую очередь механических. Описание природы измельчения зерен и формирования новых границ зерен в ходе ИПД представляет собой критически важную задачу для понимания процессов, которые приводят к формированию наноструктур с заданными параметрами. [11]

Таким образом, целенаправленное формирование этих наноструктурных состояний является основным вопросом, позволяющим обеспечить повышен-

ный уровень свойств получаемых НС-металлов. Для практического использования методов ИПД необходимо выяснить взаимосвязь между формируемыми конструкциями, условиями и маршрутами деформации.

При решении этой проблемы, наряду с экспериментальными методами, следует использовать теоретические методы и моделирование, основанные на понимании физических процессов, ведущих к образованию УМЗ (ультрамелкозернистых) и наноструктур. Задача описания формирования данных структур невозможно без моделирования процессов на разных уровнях при ИПД, так как процессы наноструктурирования обусловлены как макроскопическими факторами (особенностями течения материала при определенной картине деформации с учетом технологических параметров) и эффектами коллективной деформации на мезоуровне, а также механизмами деления зерен на микроуровне. Актуальный анализ данных возможно проводить при помощи MTEX, дистрибутива для MatLab. Данная программа имеет множество функций анализа информации полученной в ходе моделирования, в особенности построения полюсных фигур и функции распределения ориентаций.

Детали моделирования

В работе использованы результаты вариационно-разностного метода, реализованного в программном обеспечении, разработанном учеными РФЯЦ ВНИИЭФ и адаптированном для случая РКУП. В рамках этого подхода система уравнений, определяющих процесс деформации среды, определяется в лагранжевых координатах. Чтобы применить этот метод к моделированию РКУП, необходимо было сформулировать задачу в трехмерном варианте, поскольку изменение маршрута прессования приводит к нарушению двумерной симметрии и требует учета деформационных процессов в пространстве.

В дальнейшем, результаты моделирования на макроуровне о напряженно-деформированном состоянии были использованы в данной работе как входные данные для моделирования на мезоуровне.

В рамках моделирования на мезоуровне исследовали коллективное поведение зерен-кристаллитов, для чего использовали модели поликристаллической пластичности, позволяющие рассчитать действие систем скольжения в агрегате

различным образом ориентированных в пространстве зерен относительно приложенной нагрузки. В качестве модели поликристаллической пластичности выбрали вязко-пластичную самосогласованную модель (ВПСС), преимуществом которой является возможность учета взаимодействия зерен в ходе деформирования, что делает ее привлекательной для описания процессов больших деформаций, где важно принимать во внимание деформации соседних зерен.

В результате этих исследований были получены ФРО, описывающие кристаллографическую текстуру, данные об анизотропии полученных материалов, спектры разориентаций и данные о деформационном поведении материалов при ИПД.

Применение многоуровневой схемы для описания процесса РКУП

Разработанная схема, которая реализует концепцию совмещения моделирования была применена к моделированию РКУП (Равноканальное угловое прессование) меди, что позволило установить влияние параметров ИПД и микроструктуру и текстуру получаемых объемных наноструктурных заготовок. Для обеспечения единообразной идентификации различных точек и сечений образца была сделана соответствующая схема (Рис. 1), которая бы позволила рассматривать результаты целого ряда как теоретических, так и экспериментальных исследований в рамках единого обозначения.

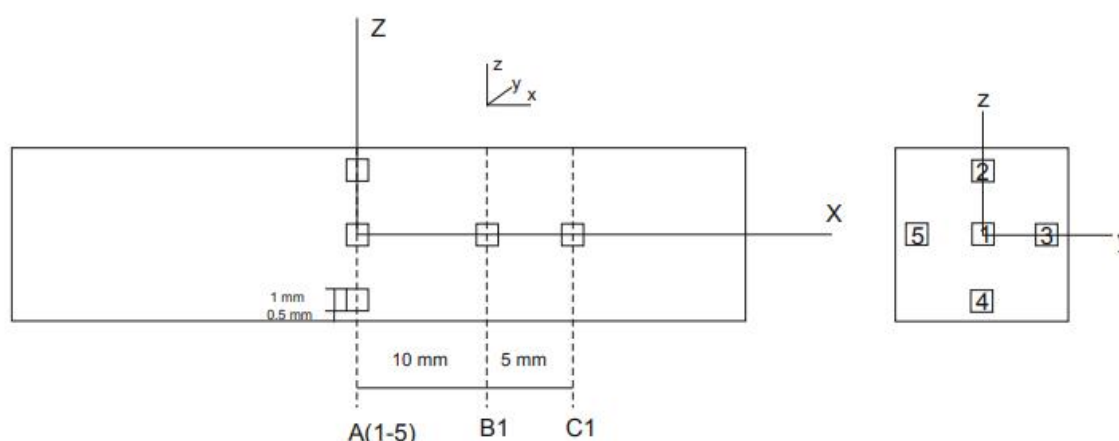


Рис. 1. Схема идентификации точек РКУП образца

Моделирование в MTEX

В ходе данной работы был проведен анализ текстуры чистой меди при помощи MTEX бесплатного набора инструментов Matlab для анализа и моделирования кристаллографических текстур с помощью EBSD или данных полюсных фигур. Он разработан на бесплатной основе с открытым исходным кодом междисциплинарной группой ученых-материаловедов, геологов и математиков.

Для исходных данных MTEX были использованы ФРО, полученные в ходе ВПСС моделирования.

Главным процессом анализа текстуры было построение полюсных фигур из данных ФРО и построение идеальных ориентаций сдвига.

Результаты моделирования

На основе математического аппарата и концепции моделирования, изложенных ранее, были получены численные расчеты процессов ИПД в ходе первого прохода РКУП, на основе объединения моделирования на макро- и мезоуровнях. На Рис. 2 приведены результаты моделирования эволюции текстуры в ходе последовательного прохождения первого прохода РКУП заготовки меди в центральной точке.

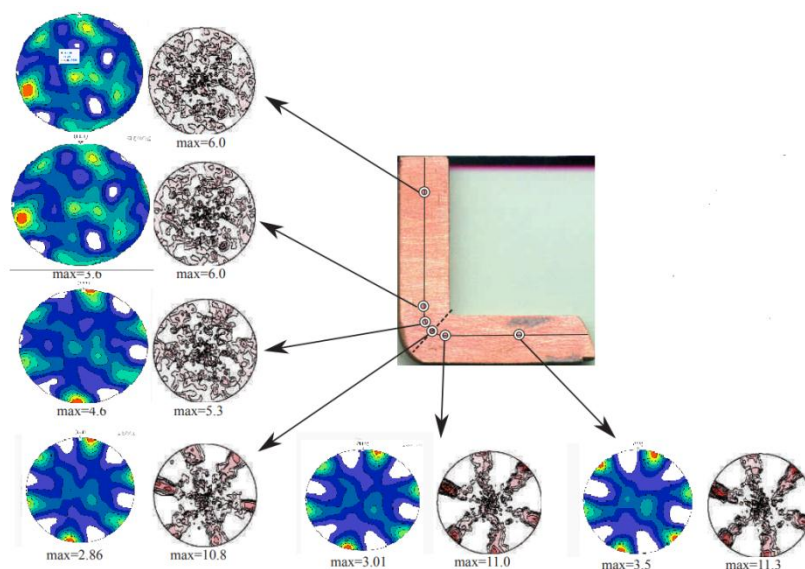


Рис. 2. Эволюция текстуры при последовательном прохождении первого прохода РКУП медной заготовки, рассчитанная с помощью моделирования, объединенного на макро- и мезоуровнях

Основные закономерности формирования текстуры во время первого прохода РКУП можно резюмировать следующим образом:

– Перед переходом в плоскость пересечения каналов исходная текстура практически не претерпевает заметных изменений.

– В зоне пересечения каналов РКУП формируется характерная текстура сдвига, описываемая соответствующими предпочтительными ориентациями и распределением полюсной плотности.

– После прохождения через очаг деформации характер текстуры практически не изменяется.

– Исходная текстура КЗ (крупнозернистого) материала практически не влияет на параметры текстуры, образующейся в результате РКУП.

Эти наблюдения хорошо согласуются с экспериментальными данными по измерениям текстуры половины медной заготовки, пропущенной через инструмент РКУП, выполненным с помощью рентгеновских съемок с диаметром облучаемой области около 0,6 мм.

Другим преимуществом данного подхода является возможность рассчитывать деформационное поведение в любой точке макроскопического образца. Для демонстрации этой возможности было проведено моделирование деформационного поведения меди при первом проходе РКУП в верхней, средней и нижней части медной заготовки.

Из рис. 3 (*a–c*) видно, что в верхней и средней частях заготовки формируются хорошо выраженные ограниченные текстуры простого сдвига. В нижней части заготовки текстура имеет случайный характер, соответствующий исходной отожженной структуре крупнокристаллического материала. Эти полюсные фигуры, будучи перестроенными в плоскость YOZ (Рис. 2 (*d–f*)), находятся в превосходном соответствии с экспериментальными данными (рис. 2 (*g–i*)), полученными рентгеновским методом тех же исследуемых областей заготовки в работах.

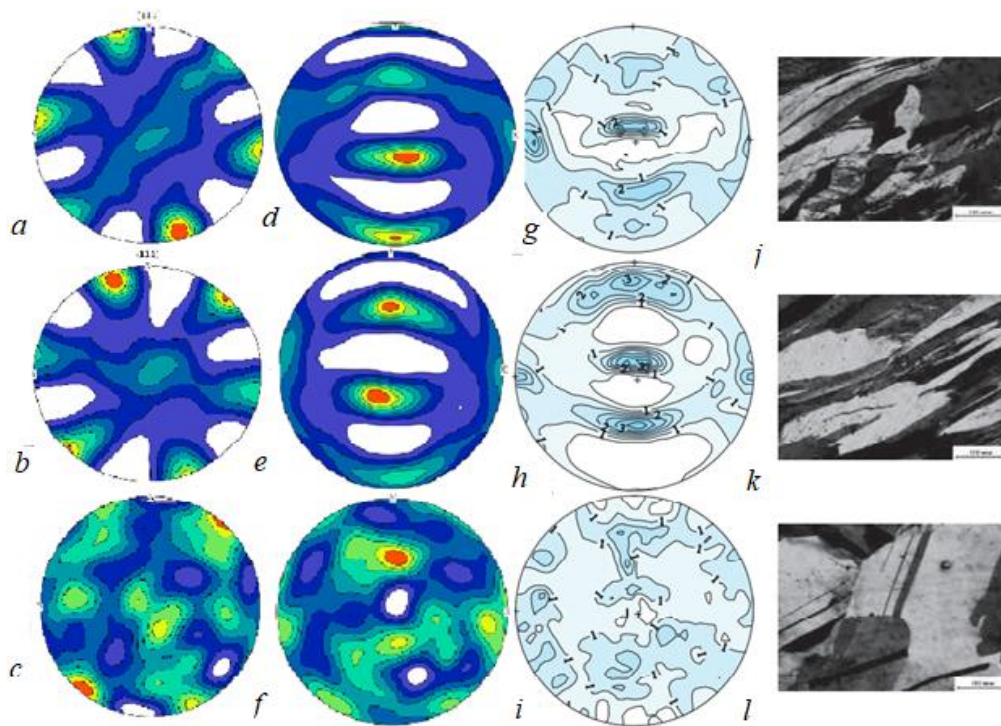


Рис. 3. Моделирование на макро-+мезоуровне текстурной неоднородности на высоте в медной заготовке после первого прохода РКУП для верхней (*a, d, g*), средней (*b, e, f*) и нижней (*c, f, i*) частей заготовки. Полусные фигуры (1 1 1) приведены в плоскости XOZ (*a–c*), перестроены в плоскости YOZ (*d–f*) для наглядного сопоставления с полусными фигурами, полученными для тех же областей заготовки опытным путем. Так же приведены соответствующие изображения структуры в этих областях, полученные при помощи оптической микроскопии (*g–i*)

Из рис. 4 видно, что идеальные ориентации образуют характерное перераспределение полюсной плотности на полюсных фигурах, позволяющей безошибочно распознавать деформацию сдвигом на примере ГЦК материалов. Для случая РКУП необходимо принять во внимание, что направление сдвига изменено на 180° , а плоскость сдвига развернута на угол в 45° относительно системы координат, связанной с образцом, и для корректной интерпретации РКУП текстур (Рис. 3, б) их нужно развернуть на тот же угол в обратном направлении и учесть направление сдвига.

Были построены ПФ с наложенными на них идеальными ориентациями простого сдвига для случая РКУП.

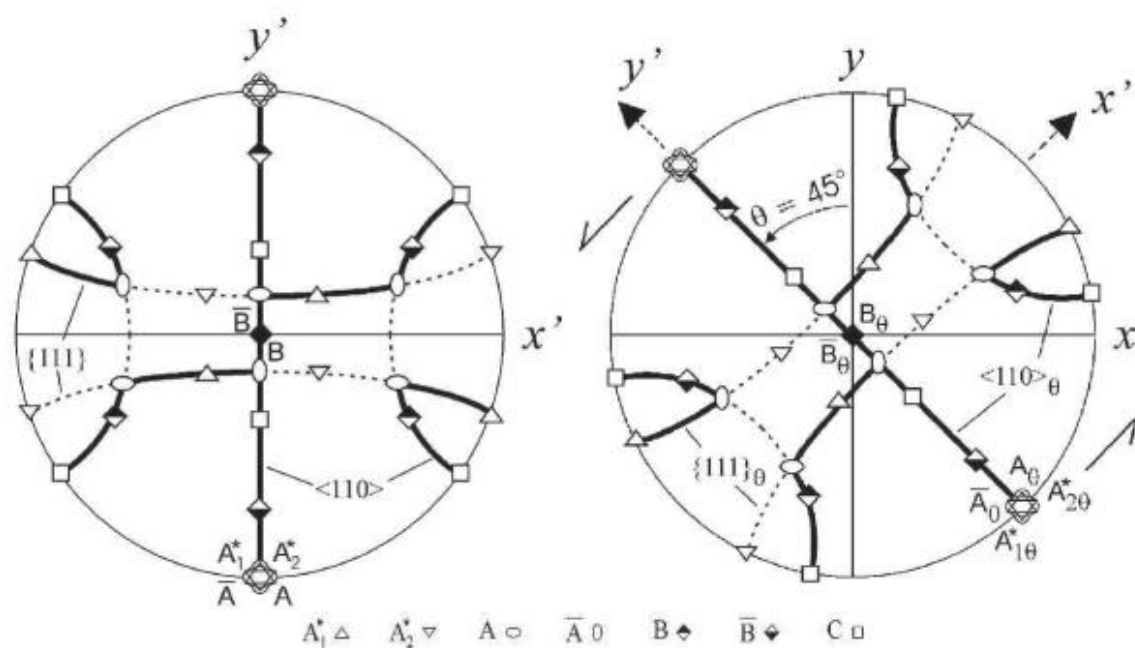


Рис. 4. Идеальные ориентации простого сдвига (а) и РКУП (б) для случая ГЦК решетки, представленные в проекции полусферической фигуры (111) в системе отсчета образца в плоскости, перпендикулярной поперечному направлению

Вывод

Таким образом, использование комбинированной схемы моделирования на макро- и мезоуровне позволило адекватно рассчитать поведение меди при деформации в заданных условиях нагружения - во время первого прохода РКУП. Схема также продемонстрировала способность описывать деформационное поведение поликристаллического материала при ИПД по всему объему деформируемой детали с учетом особенностей конкретной реализации схемы нагружения на примере меди, подвергнутой первому проходу РКУП, а моделирование на мезоуровне (ВПСС) позволило надежно воспроизвести характерную деформационную структуру сдвига.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valiev Ruslan Z., Islamgaliev Rinat K., Alexandrov Igor V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // Progr. Mater. Sci. -2000.-Vol.45. – P.103-189
2. Р.З Валиев И.В Александров. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. –P.272.
3. Alexandrov I.V., Zhulina M.V., Bonarski J.T. Formation of texture inhomogeneity in severely plastically deformed copper // Bull. Pol. Ac.: Tech. – 2006. – Vol.54. – P.199-208.
4. Исследование однородности субструктуры металла прутков полученных равноканальным угловым прессованием (ЕСАР), методами рентгеновской дифрактометрии / М. Исаенкова,

- Ю. Перлович, В. Фесенко, М. Грехов // Вопросы материаловедения. – 2008. – Vol. 52, no. 4. – P. 91-97
5. Formation of inhomogeneous texture and structure in metal materials under equal-channel angular pressing / Y.A. Perlovich, M. G. Isaenkova, V. Fesenko et al. // Mater. Sci. Forum. – 2005. – Vol. 503/504. – P.853 - 858
6. Three-dimensional numerical simulations of multi-pass equal-channel angular pressing by a variation difference method and comparison with experiment / A. A. Smolyakov, V.P. Solovyev, A. I. Korshunov, N. A. Enikeev // Mater. Sci. Eng. A – 2008. – Vol.493, no. 1-2 – P.148-159
7. Макаров П.В. Подход физической мезомеханики к моделированию процессов деформации и разрушения // Физическая мезомеханика. – 1998. – Vol.1, no. 1. – P. 5 - 22
8. Gleiter H. Nanocrystalline materials // Progr. Mater. Sci. – 1998. – Vol.33, no. 4. – P.223-315.
9. Еникеев Н.А., Абдуллин М.Ф., Назаров А.А. Моделирование эволюции субструктуры и текстуры г.ц.к. металлов при равноканальном угловом прессовании. Физика прочности и пластичности материалов // Труды XVI Международной конференции (Самара, 26 – 29 июня 2006 г.) Том I. – Самара: Самар. Гос. Техн. Ун-т, 2006. – P. 109-116
10. Эволюция структуры ГЦК монокристаллов при больших пластических деформациях / Н.А Смирнова, В.И. Левит, В.П. Пилюгин et al. // ФММ. – 1986. – Vol. 61. – P. 1170-1177
11. Н. А Еникеев. Границы зерен и сверхпрочность наноструктурных материалов // Диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук. – Уфа – 2016
12. Программный комплекс ДРАКОН для расчета упругопластичных течений при ударно-волновом нагружении в двумерном и трехмерном приближении / А.И. Абакумов, П.Н Низовцев, А.В. Певницкий, В.П. Соловьев // IV Забабахинские чтения: Доклады межд. Конф. – 1995 – P.227-228.
13. Three-dimensional numerical simulations of multi-pass equal-channel angular pressing by a variation difference method and comparison with experiment A.A. Smolyakov, V.P. Solovyev, A.I. Korshunov, N.A. Enikeev Materials Science and Engineering: A493 (1-2), 148-159, 2008.

УДК 620.3

С. Д. ГУНДЕРОВА

gynderova@mail.ru

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МЕТАЛЛЫ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ, ПОЛУЧЕННЫЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

Аннотация. Сейчас активно развивается направление «получение наноструктурных (НС) металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации (ИПД)». Этот подход основан на измельчении методами очень больших деформации зерен до наноразмеров 100 - 200 нм (0,1 мкм). Проведен анализ литературы по тематике, показано, что с измельчением размера зерна до 100 – 200 нм (при формировании наноструктурного состояния) прочность металлов. значительно возрастает, что делает их перспективными для различных отраслей.

Ключевые слова: металлы; сплавы; интенсивная пластическая деформация.

Металлы и сплавы являются важнейшими материалами для конструкций. В истории человечества роль материалов, металлов очень велика. Целые эпохи развития цивилизации названы по материалам: каменный век, бронзовый век, железный. Освоение новых материалов позволяло обществу перейти на новую ступень. Металлы и сплавы являются основным материалом современной техники. Металлы и сплавы изучает Материаловедение – наука о связи между составом, структурой и свойствами материалов а также о влиянии различных видов обработки на их структуру и свойства.

Взаимосвязь эта выражается следующей схемой:

Состав → Структура → Свойства → Применение

Материаловедение является динамично развивающейся наукой, одним из самых актуальных и перспективных направлений человеческой деятельности.

Металлы в конструкции должны выдерживать внешние механические нагрузки, т. е. не разрушаться и не деформироваться при эксплуатации. Материалы конструкций должны обладать прочностью, надежностью и долговечностью. Иными словами, материал должен надежно работать в условиях эксплуатации в течение длительного времени.

Металлы и сплавы имеют упорядоченное расположение атомов, имеют кристаллическую решетку. Почти все металлические изделия являются поликристаллами, т. е. состоят из огромного числа мелких кристалликов или зерен. Современные методы исследования структуры позволяют увидеть границы зерен, оценить их размер и форму. В каждом зерне атомы расположены закономерно, образуя пространственную кристаллическую решетку. Расположение атомов в кристалле принято изображать в виде точек или кружков и соединять их линиями, означающими межатомную связь (рис. 1).

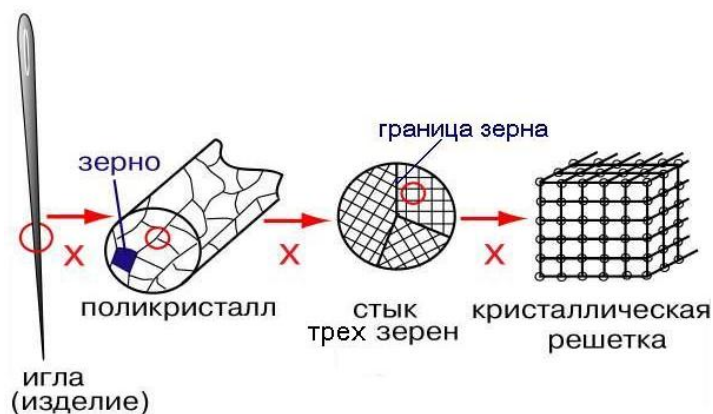


Рис. 1. Схема кристаллического строения металлов

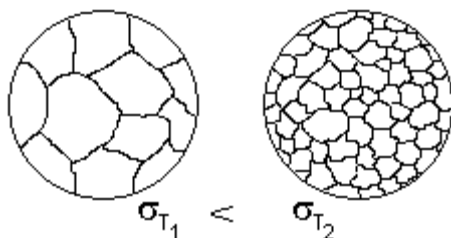


Рис. 2. Упрочнение границами зерен

Давно известно, что деформация упрочняет металлы, поскольку деформация приводит к измельчению зерна в металлических материалах, а это приводит к росту их прочности. Мелкозернистый металл прочнее, так как деформации за счет движения дислокаций препятствуют многочисленным границам зерен.

Вклады в упрочнение (в предел текучести) металлов дают следующие механизмы:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{т.р.} + \Delta\sigma_{д.у.} + \Delta\sigma_{д.} + \Delta\sigma_{з.}$$

где σ_0 -напряжение трения кристаллической решетки; дислокационное упрочнение $\Delta\sigma_{д.у.}$; зернограничное упрочнение $\Delta\sigma_{з.}$; твердорастворное упрочнение $\Delta\sigma_{т.р.}$; дисперсионное упрочнение (из-за наличия частиц другой фазы) $\Delta\sigma_{д.}$.

Крупнозернистые металлы имеют размеры зерна 0,1 мм (100 мкм). После обычных деформаций (ковки, прокатки) получают мелкозернистые металлы с размерами зерна порядка 0,01 мм (10 мкм). 30 лет назад проф. Валиевым Р.З. с коллегами стало развиваться направление «получение наноструктурных (НС) металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации (ИПД)». Этот подход основан на измельчении методами очень больших деформации зерен до наноразмеров 100 - 200 нм (0,1 мкм) [1,2]. Заготовки материалов, обработанные ИПД, обладают повышенной прочностью и долговечностью. Наноструктурные металлы перспективны как новое поколение материалов для деталей и изделий. В связи с этим методы ИПД становится одним из наиболее перспективных направлений в области физического материаловедения. Зародившееся в Уфе научное направление «объемные наноструктурные материалы, полученные ИПД» теперь получило широкое международное признание. УГАТУ является одним из ведущих и известным в мире центром разработки наноструктурных металлов.

К настоящему времени большинство результатов получено с использованием двух методов интенсивной пластической деформации – деформации кручением (ИПДК) под высоким давлением [1] и равноканально-угловым (РКУ) прессованием (рис 3) [1]. Имеются также работы по получению нано- и субмикроструктурных структур в ряде металлов и сплавов методом всестороннейковки, который также можно отнести к методам ИПД. При деформации кручением под высоким давлением образец помещается между бойками и сжимается под приложенным давлением P в несколько ГПа. Нижний боек вращается и силы поверхностного трения заставляют образец деформироваться сдвигом (рис. 3). Внутренний объем материала образцов деформируется под дей-

ствием сдвига внешних слоев образца в условиях квазигидростатического сжатия. В результате деформируемый образец, несмотря на большие степени деформации, не разрушается. Степень деформации образца зависит от числа оборотов бойков.

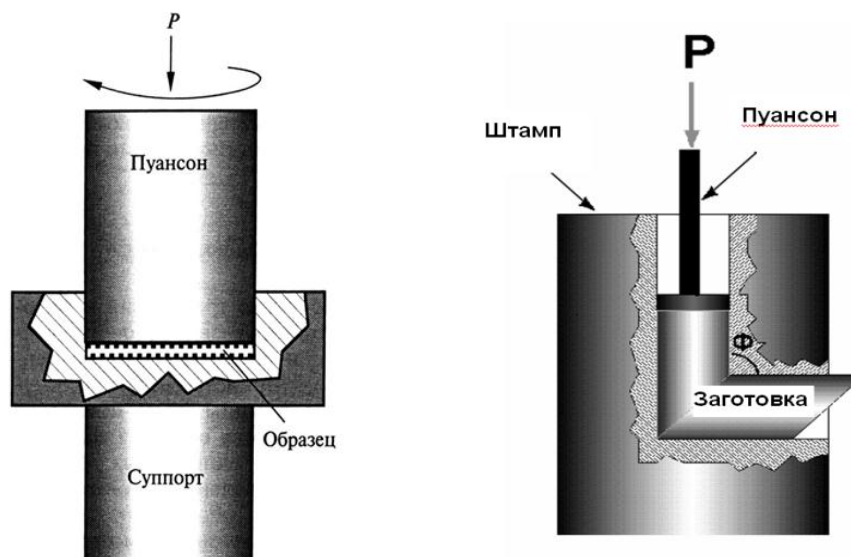


Рис. 3. Схема ИПДК и схема РКУП

Отметим, что особенно важными наноструктурные материалы могут быть для авиации и космической техники, где нужны легкие и высокопрочные материалы, такие как наноструктурный титан и наноструктурный алюминий.

Таким образом, проведен анализ литературы по тематике «получение наноструктурных (НС) металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации (ИПД)». Этот подход основан на измельчении методами очень больших деформации зерен до наноразмеров 100 - 200 нм (0,1 мкм). Показано, что с измельчением размера зерна до 100 – 200 нм (формировании наноструктурного состояния) прочность металлов значительно возрастает, что делает их перспективными для различных отраслей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272с.
2. Валиев Р.З., Рааб Г.И., Мурашкин М.Ю., Гундеров Д.В. Использование методов интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных металлов и сплавов // КШП. 2008. № 11. С 5-12.

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГОМ ПОЛОГО СТЕРЖНЯ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ СТАЛИ 10

Аннотация. В сфере материаловедения большую популярность набирают материалы с интересными физико-механическими характеристиками и с высокими эксплуатационными свойствами, а именно прочности и пластичности, вязкости разрушения. Одним из примечательных методов их получения является метод интенсивной пластической деформации, а именно деформация свободным кручением. Под ее действием происходит формирование градиентной структуры и получение объемных наноструктурных заготовок различной геометрии с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой с повышенными физико-механическими свойствами. Исследование проведено на основе метода свободного кручения полого стержня на примере сплава сталь 10 и его деформационного состояния, характера течения материала, используя компьютерное моделирование DEFORM-3D. Выявлен прикладной потенциал предлагаемого метода ИПД, анализ полученных данных о распределении интенсивности деформаций и интенсивности напряжений в деформируемой модели. Проведено исследование и проанализированы особенности структурообразования, закономерности при образовании градиентной структуры. Изучены микроструктуры и механические свойства заготовки в исходном и деформированном состоянии.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация; свободное кручение; компьютерное моделирование; градиентная микроструктура; механические свойства; интенсивность деформации; интенсивность напряжения.

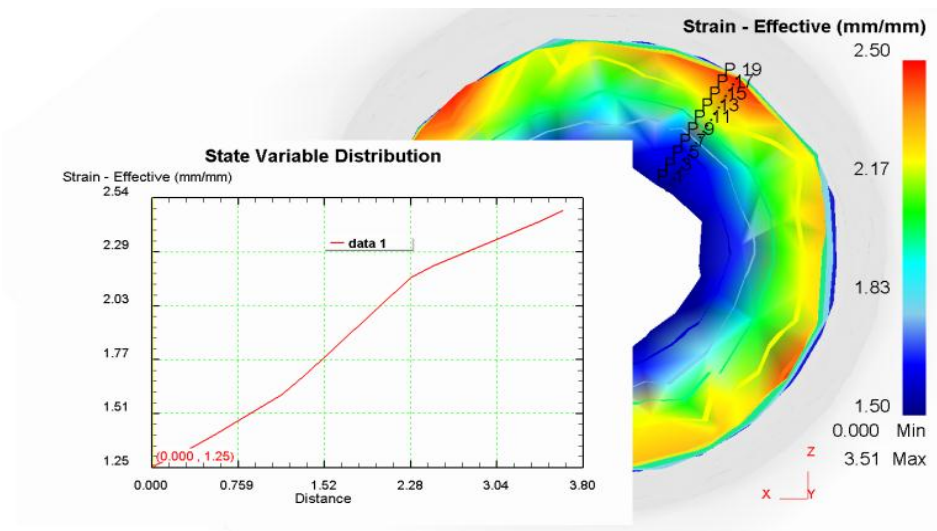
Интенсивная пластическая деформация стала широко известным методом обработки материалов, под ее действием происходит дробление структуры металла, вызванных кручением при сжатии, резким изменением направления деформирования. ИПД металлических материалов позволяет получать объемные наноструктурные заготовки различной геометрии с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой с повышенными физико-механическими свойствами. Основным преимуществом методов ИПД является накопление больших деформаций ($\epsilon=4-12$) при температурах ниже температуры рекристаллизации, которые приводят к качественным и количественным изменениям структуры и свойств. Отсутствие дефектов у получаемых заготовок является главной задачей.

Строение поверхностного слоя материала резко отличается от основного, так как имеет следы технологического процесса обработки, в результате которого, как правило, образуется дефектный слой с искаженной структурой. При эксплуатации изделия постоянно идет процесс изменения свойств поверхности из-за силовых, температурных, окислительных и других воздействий.

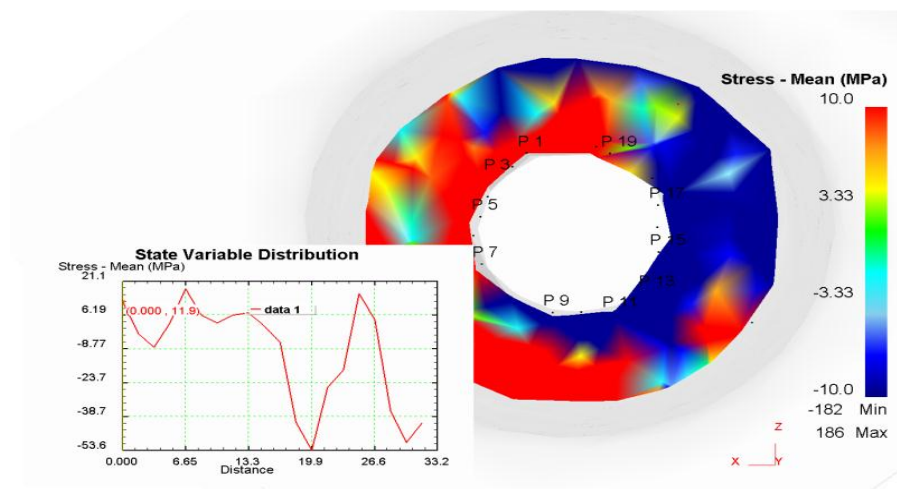
В качестве материала исследования была выбрана низкоуглеродистая сталь марки 10. Материал в исходном состоянии характеризуется четко выраженной зернистой структурой со средним размером зерен 15 мкм. Для решения поставленной задачи предлагается комплексный подход, включающий совокупность компьютерного моделирования в DEFORM-3D и физического эксперимента методом свободного кручения.

Основные выводы по распределению интенсивности деформации и средних напряжений после виртуального эксперимента заключаются в том, что накопленные интенсивности деформации носят градиентный характер, интенсивность накопленной деформации возрастает $\epsilon = 1,25$ единиц в центре с постепенным увеличением к периферии до значений равных $\epsilon = 2,5$. С увеличением количества оборотов интенсивность деформации так же увеличивается.

Анализ картин средних напряжений в продольном и поперечном сечении деформируемой заготовки показывает, что при реализации эксперимента по всему объему деформируемой заготовки происходит динамическое изменение сжимающих и растягивающих напряжений. Места локализации отрицательных значений средних напряжений показывают, что в процессе деформации работают схемы сжатия, а при положительных значениях осуществляются схемы растяжения, которые приводят к образованию трещин, пор и разрушению образца. График распределения деформаций и средних напряжений в поперечном сечении заготовки изображен на рисунке 1.



a



б

Рис. 1. Распределение:
a – интенсивности деформации; *б* – средних напряжений

Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о том, что при свободном кручении в стержне сплава формируется градиентная структура, в которой периферийные области образца подвергаются более интенсивному деформационному воздействию, чем центральные области.

В процессе компьютерного моделирования можно получить картины структурных состояний области локализации деформации, которые позволяют исследовать изменение микроструктуры материала от количества накопленной деформации, а также показывают возможную предварительную картину структурных изменений (рис. 2).

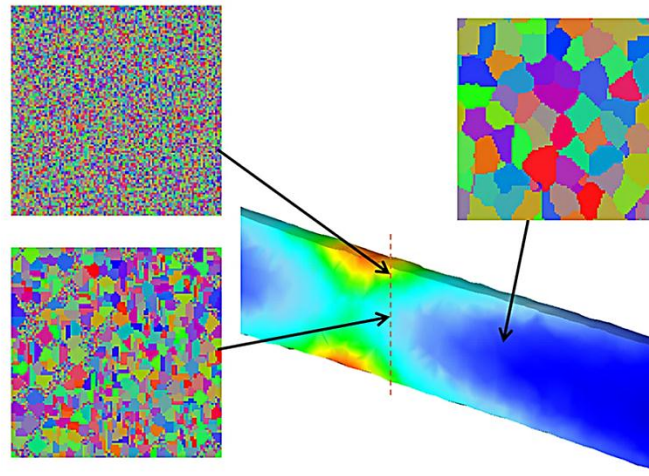


Рис. 2. Распределение структурных изменений в локализованном очаге деформации

По результатам физического эксперимента можно сделать следующие выводы: в центральной области прутка значения микротвердости практически не изменяются; с удалением от центра прутка величина микротвердости HV возрастает, достигая максимальных значений в приповерхностной области. Графики изменения микротвердости HV вдоль радиуса поперечного сечения деформированных прутков представлены на рисунке 3.

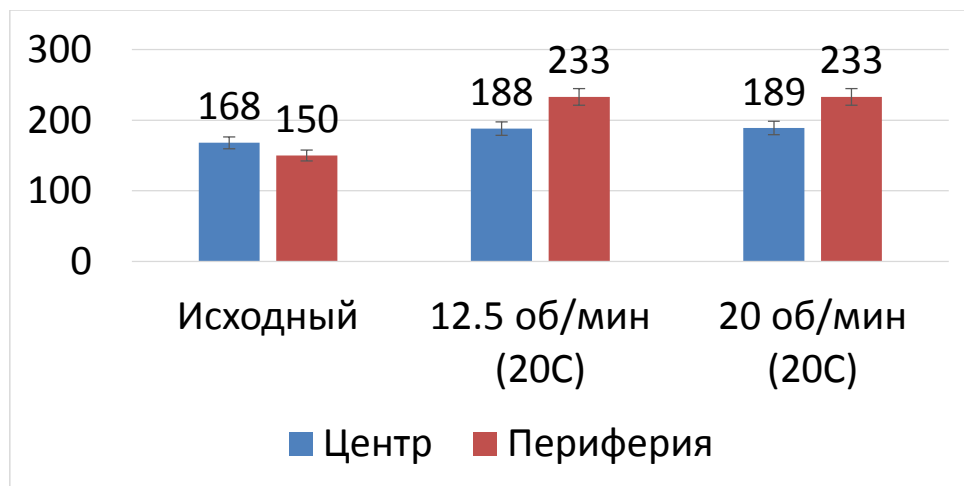


Рис. 3. Распределение микротвердости в поперечном сечении образцов после деформации свободным кручением с различной скоростью

Полученные экспериментальные результаты механических испытаний на растяжение свидетельствуют о заметно более высоких прочностных свойствах после деформационной обработки кручением по сравнению с исходным состоянием, параметры механических испытаний прутков стали на 10-17% превышать прочностные показатели исходных прутков.

Результаты механических испытаний

Состояние			
	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Исходное	295±10	483±16	31
12,5 об/мин	300±10	556±19	41
20 об/мин	320±13	568±19	35

С целью изучения особенностей сформированной градиентной структуры в длинномерных прутках были проведены металлографические исследования исходных и деформированных прутков.

На рисунках 4,5 представлены снимки микроструктуры различных областей поперечного сечения прутков стали 10 после свободного кручения при комнатной температуре со скоростями 12.5 и 20 оборотов в минуту. Снимки микроструктуры получены методом растровой электронной микроскопии. Наблюдаемые на снимках пластины цементита в зернах перлита являются своеобразными маркерами, свидетельствующими о действующих при свободном кручении механизмах пластической деформации, аналогично наблюдаемым при равноканально угловом прессовании механизмам пластической деформации.

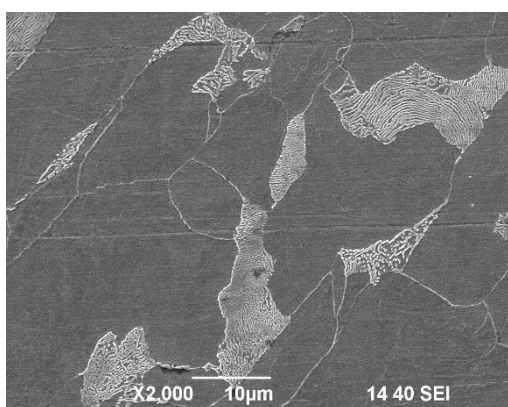


Рис. 4. Микроструктура стали 10 после 5 оборотов СК при КТ со скоростью 20 об/мин, центральная область прутка. РЭМ

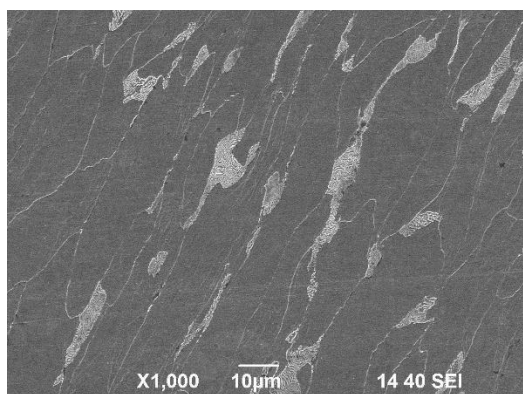


Рис. 5. Микроструктура Стали 10 после 5 оборотов СК при КТ со скоростью 20 об/мин, периферийная область прутка. РЭМ

Наблюдаемое разбиение пластин цементита и разворот относительно друг друга в центральных и периферийных областях прутков (рис. 4, 5) свидетельствуют о действии внутри зерен перлита дислокационного скольжения и поворотных механизмов деформации в процессе свободного кручения прутков. Также характерной особенностью наблюдаемой микроструктуры является наличие вытянутости, как зерен феррита, так и перлита в периферийных областях прутков. Кроме того, следует отметить наличие в зернах перлита и вдоль границ зерен феррита не только вытянутых пластин цементита, но и округлых частиц цементита. Это свидетельствует об активизации диффузионных процессов перераспределения атомов углерода и развитии коагуляции частиц цементита.

Выводы:

1. Распределение накопленной деформации и средних напряжений имеет градиентный характер с максимальными значениями в приповерхностных зонах деформируемого образца;

2. Прочностные характеристики прутков стали 10 после деформации свободным кручением на 15-17% превышают прочностные показатели прутков в исходном состоянии;

3. Проведенные экспериментальные исследования показали, что в соответствии с условиями процесса свободного кручения формируется крайне немонотонная сдвиговая деформация, в прутках формируется градиентная

структура с упрочненным приповерхностным слоем и более крупнозернистой пластичной сердцевиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сегал, В.М. Процессы пластического структурообразования / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов. – Минск: Наука и техника, 1994. – 232 с.
2. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения / Р.З. Валиев, А.П. Жилиев, Т. Дж. Ленгдон. - Санкт-Петербург: Эко-Вектор, 2017. - 480 с.
3. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные материалы: уникальные свойства и инновационный потенциал / Р.З. Валиев, О.Б. Наймарк. – Уфа: УГАТУ, 2007.
4. Рааб, Г.И. Разработка новых методов получения объемных наноструктурных металлических материалов интенсивной пластической деформацией / Г.И. Рааб, Р.З. Валиев, В.М. Капитонов, Н.Г. Баушев, Р.С. Каримов, А.Г. Рааб. - Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2007. - С. 385-388.
5. Ахмадеев, Н.А./ Валиев Р.З., Копылов В.И., Мулюков Р.Р. // Известия РАН. Металлы. 1992. № 5. - С. 96.
6. Valiev R.Z. / Krasilnikov N.A., Tsenev N.K. // Mater. Sci. Eng., 1991. V. A 137. P. 35
7. Максимов, А.Б. Исследование пластической деформации кручением стальных стержней / А.Б. Максимов. – Керчь: ГМТУ, 2008. – 133 с.
8. Гордиенко, А.И. Разработка и применение функционально-градиентных материалов / А.И. Гордиенко, В.В. Ивашко, И.И. Вегера. – Минск: ГНУ, 2006.
9. Fang, T. H., Li, W. L., Tao, N. R. & Lu, K. Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper. Science 331, 1587–1590. 2011.
10. Иванов, Ю.Ф. Структурно-фазовый градиент, индуцированный усталостными испытаниями в условиях промежуточного электростимулирования / Ю.Ф. Иванов, В.В. Коваленко, М.П. Ивахин. - Физическая мезомеханика. - 2004. - Т.3, №7. - С.29 - 34.

УДК 538.951

Р. И. ИШЕМГУЛОВА, И. А. ДАНИЛОВ

Isemgulova119@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О. Б. КУЛЯСОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ СПЛАВА Zn-Li-Mg, ОБРАБОТАННОГО КРУЧЕНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Аннотация. Сплавы на основе магния и цинка, а также сплавы на основе железа представляют большой интерес для медицинских применений, поскольку они являются биоразлагаемыми металлическими материалами. Цинковые сплавы наиболее привлекательны, поскольку обладают хорошей биосовместимостью и достаточной коррозионной стойкостью. Однако промышленные сплавы Zn обладают низкими механическими свойствами, недостаточными для использования в медицине в качестве материалов для медицинских стентов (предел прочности должен быть более 300 МПа, пластичность более 15-18%). В данной работе показано, что измельчение зерна методом кручения под высоким давлением (КВД) приводит к повышению прочности сплава Zn-0,8%Li-0,1%Mg за счет образования ультратонкой зернистой структуры (УМЗ). Сформированная УМЗ структура обеспечивает увеличение микротвердости с 98HV до 185HV. Предел прочности образцов после обработки методом КВД при скорости деформации 10^{-3} с^{-1} составил 595 МПа, относительное удлинение до разрушения 47%, что в несколько раз превышает требуемые параметры для медицинских стентов. Образцы с УМЗ структурой продемонстрировали термическую стабильность, а именно, микротвердость УМЗ образцов не изменяется до 150 °С.

Ключевые слова: цинковые сплавы; ультрамелкозернистая структура; кручение под высоким давлением; термическая стабильность; прочность.

Известно, что сплавы на основе цинка являются новыми и очень перспективными биоразлагаемыми материалами для изготовления ортопедических медицинских имплантатов [1-4]. Биомедицинские сплавы на основе цинка занимают нишу между сплавами на основе железа и магния по следующим причинам: (1) прочность цинковых сплавов ниже, чем у биомедицинских сплавов на основе железа, но выше, чем у магния; (2) разлагаемость цинковых сплавов ниже, чем у биорезорбируемых магниевых сплавов, но выше, чем у сплавов на основе железа. Однако промышленные цинковые сплавы обладают довольно низкими механическими свойствами, значения которых недостаточны для использования их в качестве медицинских стентов (предел прочности должен быть более 300 МПа, пластичность должна быть 15-18%). Для достижения таких высоких значений важно сформировать ультрамелкозернистую структуру,

например, путем кручения под высоким давлением. Однако в литературе нет публикаций о микроструктуре и свойствах сплавов Zn-Li-Mg, обработанных методом КВД. Поэтому целью данной работы было выявить эволюцию структуры в процессе КВД и ее влияние на механические свойства сплава Zn-0,8%Li-0,1%Mg.

Для создания УМЗ структуры сплава Zn-0,8%Li-0,1%Mg был использован метод КВД. При этом методе образцы (диаметром 20 мм и толщиной 0,9 мм) подвергали кручению под давлением 6 Гпа со скоростью 1 об/мин. Образцы для металлографического исследования были подготовлены путем шлифования образцов с постепенным уменьшением зернистости бумаги. Металлографическое исследование макроструктуры проводили на оптическом микроскопе Olympus GX41. Микроструктуру изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (JEM6390) и просвечивающего электронного микроскопа (JEM2100) с ускоряющим напряжением 30 и 200 кВ, соответственно. Фольги готовили методом струйной электрополировки с использованием раствора азотной кислоты – 30% и метанола – 70% электролита. Размер зерна был измерен методом секущих и рассчитан с использованием более 250 измерений зерна. Механические свойства образцов были исследованы с помощью измерений микротвердости (HV) и испытаний на растяжение. Микротвердость образцов HV измеряли методом Виккерса на Микрометр-5101 с нагрузкой 1 Н и временем выдержки 10 с. Каждый образец измеряли по диаметру более 20 раз для получения достоверных результатов. Испытания на растяжение проводили на испытательной машине Instron 5982 при комнатной температуре со скоростью деформации 10^{-3} с^{-1} . Размер рабочей части образцов составил $0,6 \times 1 \times 4,5 \text{ мм}^3$. Для каждого испытания были протестированы как минимум 3 образца.

Структура исходного сплава (рисунок 1) содержит две области (светлую и темную); согласно [5], темная область соответствует первичной бета-фазе LiZn_4 , а светлая область соответствует эвтектике $\text{Zn} + \beta\text{-LiZn}_4$. В темной области имеются крупные первичные дендриты $\beta\text{-LiZn}_4$ размером более 1 мкм. Части-

цы Zn также были обнаружены в первичной фазе β -LiZn₄, эти данные хорошо согласуются с работой [5]. Структура также содержит частицы, расположенные по границам и в теле зерен, скорее всего, это частицы Zn₁₁Mg₂ [6]. Значение микротвердости исходного состояния составляло 98±5 HV.

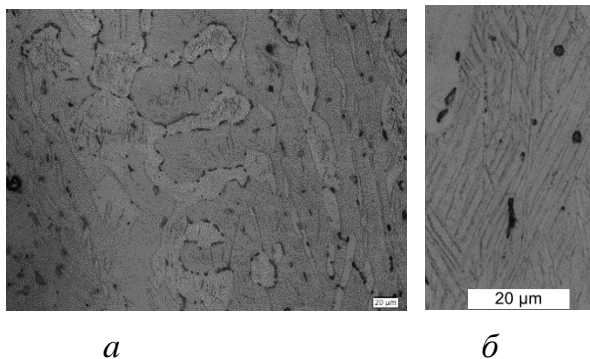


Рис. 1. Микроструктура сплава Zn-0,8%Li-0,1% Mg после термообработки при 300 ° C в течение 72 часов (а), игольчатый Zn осаждается в первичной фазе β -LiZn₄ (б)

В результате КВД структура сплава претерпела значительные изменения. На рис. 2 видно, что в процессе деформации была сформирована УМЗ структура с размером зерна 540 нм. Было замечено, что в теле зерен наблюдается низкая плотность дислокаций, что предположительно указывает на динамическую рекристаллизацию при деформации. Микротвердость в результате деформации была увеличена до 185 HV, что в два раза выше, чем в исходном состоянии. Предел прочности на растяжение образцов с УМЗ структурой составил 595 МПа, а относительное удлинение – 47% (рис. 3а). Полученные значения механических характеристик в 2 раза выше, чем требуется для применения в качестве медицинских имплантатов. Исследования термостабильности образцов показали, что после отжига до температуры 150 °C микротвердость незначительно падает до 160±10HV.

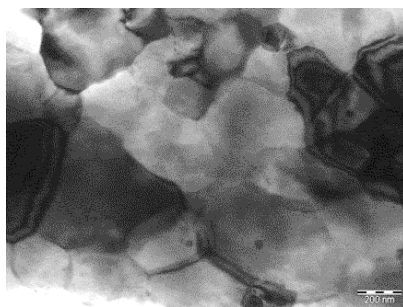


Рис. 2. Микроструктура сплава Zn-0,8%Li-0,1%Mg после КВД

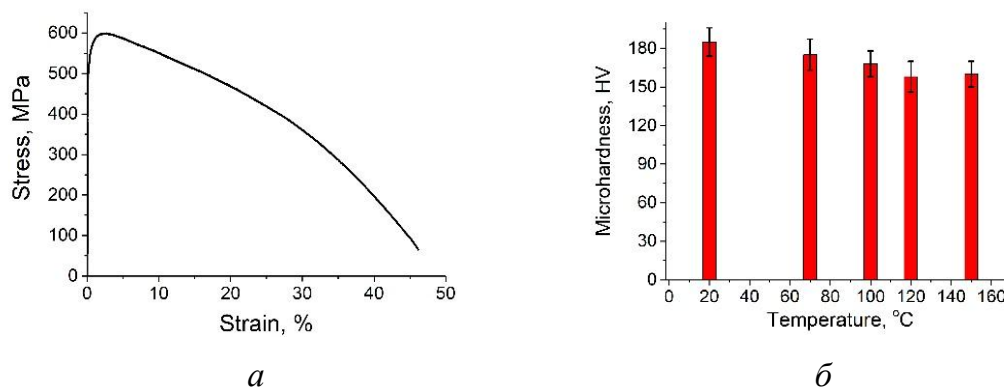


Рис. 3. *а* – испытания на растяжение сплава Zn-0,8%Li-0,1%Mg, подвергнутого КВД; *б* – термическая стабильность исследуемого сплава, подвергнутого КВД и дополнительному отжигу

Таким образом, ультрамелкозернистая структура со средним размером зерна 540 нм сплава Zn-0,8%Li-0,1%Mg, сформированная методом КВД обеспечила высокую прочность, а именно микротвердость составляла 185 HV, предел прочности 595 МПа, а пластичность 47%. Также было установлено, что структура, обеспечивающая высокие прочностные характеристики, стабильна до 150 °С.

Работа выполнена при поддержке РФФИ №21-53-53021. Экспериментальная часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УГАТУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Jia, H. Yang, Yu Han, Z. Zhang, X. Qu, Y. Zhuang, Q. Wu, Yu. Zheng, K. Dai, In vitro and in vivo studies of Zn-Mn biodegradable metals designed for orthopedic applications. *Acta Biomaterialia* 108 (2020) 358-372.
2. H. Yang, Bo Jia, Z. Zhang, X. Qu, G. Li, W. Lin, D. Zhu, K. Dai, Yu. Zheng. Alloying design of biodegradable zinc as promising bone implants for load-bearing applications. *Nature Communications* (2020) 11:401. 10.1038/s41467-019-14153-7.
3. G. Li, H. Yang, Yu. Zheng, Xie-Hui Chen, Jian-An Yang, D. Zhu, L. Ruan, K. Takashima. Challenges in the use of zinc and its alloys as biodegradable metals: Perspective from biomechanical compatibility. *Acta Biomaterialia* 97 (2019) 23-45.
4. H. F. Li, X. H. Xie, Yu. Zheng, Y. Cong, F. Y. Zhou, K. J. Qiu, X. Wang, S. H. Chen, L. Huang, L. Tian, L. Qin. Development of biodegradable Zn-1X binary alloys with nutrient alloying elements Mg, Ca and Sr. *Scientific Reports* | 5:10719 | DOI: 10.1038/srep10719.
5. Zh. Li, Zh. Shi, X. Liu, A.A. Volinsky, H. Zhang, Lu-Ning Wang. High-performance hot-warm rolled Zn-0.8Li alloy with nano-sized metastable precipitates and sub-micron grains for biodegradable stents. *Journal of Materials Science & Technology* 35 (2019) 2618-2624.
6. He Huang, H. Liu, L. Wang, Kai Yan, Yu. Li, J. Jiang, A. Ma, F. Xue, J. Bai. Revealing the effect of minor Ca and Sr additions on microstructure evolution and mechanical properties of Zn-0.6 Mg alloy during multi-pass equal channel angular pressing. *Journal of Alloys and Compounds*, (2020), 10.1016/j.jallcom.2020.155923.

**ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНО ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
КРУЧЕНИЕМ ПО РАЗЛИЧНЫМ РЕЖИМАМ НА СПЛАВ Ti18Zr15Nb**

Аннотация. Изучено влияние интенсивной пластической деформацией кручением на биомедицинский сплав Ti18Zr15Nb. Согласно данным РФА, β -фаза является основной фазой в сплаве как в исходном состоянии, так и после обработки ИПДК. Ширина линии рентгеновского излучения β -фазы после обработки ИПДК резко увеличилась в результате увеличения концентрации дефектов и измельчения зерна. В результате обработки ИПДК микротвердость сплава заметно увеличилась, что свидетельствует о повышении прочности и предела текучести при сохранении β -состояния.

Ключевые слова: титановые сплавы; интенсивная пластическая деформация.

Титан и его сплавы являются наиболее предпочтительными материалами для медицинских имплантатов [1]. Особенно перспективны тройные и четвертичные сплавы на основе Ti (Nb, Zr) с памятью формы (СПФ) [2-4]. Эти сплавы, состоящие из нетоксичных компонентов, демонстрируют уникальное сочетание высокой биомеханической совместимости (низкий модуль Юнга и сверхупругие свойства) с превосходной коррозионной стойкостью. Известно, что традиционная термомеханическая обработка за счет управления структурой Ti-Zr-Nb снижает модуль Юнга, сопротивление функциональной усталости и увеличивает прочность [5, 6]. Однако необходимо дополнительное повышение прочностных характеристик этих сплавов. В [7, 8] показано, что формирование наноструктурированного состояния в чистом титане с помощью обработки с интенсивной пластической деформацией (ИПД) позволяет значительно улучшить его свойства.

Технология интенсивной пластической деформацией кручения под высоким давлением (ИПДК) позволяет максимально измельчить структуру материала [9, 10]. Во время обработки сплавов Ti-Ni с памятью формы сначала наблюдается измельчение зерна до нанокристаллического диапазона, а затем аморфизация [11-13]. При обработке ИПДК низко модульного сплава β -Ti Ti-15Mo наблюдается уменьшение размера β -зерен / субзерен до 80 нм, а ω -фаза появля-

ется на ранних стадиях ИПДК. В некоторых сплавах β -Ti систем Ti-Mo и Ti-Nb-Zr было выявлено измельчение зерна до 50 нм во время обработки ИПДК, в то время как сплавы оставались преимущественно в β -фазе [13-16]. Можно также отметить, что обработка высокопрочных материалов методом ИПДК на самом деле вызывает гораздо меньшую деформацию γ , чем ожидалось, в результате проскальзывания [17, 18], тем не менее структура материалов при ИПДК значительно измельчается. Однако исследования влияния обработки ИПДК на сплавы Ti-18Zr-15Nb до сих пор не проводились.

Использовали слиток сплава Ti-18Zr-15Nb (ат.%) Массой 15 кг, полученный методом вакуумно-дугового переплава. Для устранения исходной структуры отливки слиток подвергали многоосной ковке при температуре нагрева заготовки 1050° С.

Установка ИПДК была снабжена бойками диаметром 20 мм с канавкой глубиной 0,4 мм. Обработка ИПДК проводилась при давлении 6 ГПа, число оборотов $n = 1, 5$ и 10. Структуру и фазовый состав исследовали методом рентгеновской дифрактометрии (Rigaku Ultima IV) в Cu-K α -излучении. Измерения микротвердости проводили на Durascan-50 (нагрузка 100 г, время 10 с). Тонкую структуру образцов исследовали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM-2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ.

В результате ИПДК происходит упрочнение материала, за счет измельчение структуры. Чем больше количество оборотов, тем сильнее упрочняется материал, выше микротвердость, т.к дислокациям становится труднее двигаться, за счет образование мелкозернистой структуры. Упрочнение по данным измерения Hv не столь велико, как у чистого титана. Термическая обработка, отжиг, приводит к разупрочнению материала, так как происходит рост зерна, аннигиляция дислокаций и при нагружении скользящим дислокациям легче двигаться.

Результаты измерения микротвердости сплава Ti18Zr15Nb до и после ИПДК

Hv	Исходный	ИПДК n=1	ИПДК n=10
Край Hv	267	310	340
1/2 R Hv	257	312	342
центр Hv	261	308	341
общее среднее Hv		310	341

Согласно данным РСА, β -фаза является основной фазой в сплаве Ti-18Zr-15Nb как в исходном состоянии (рис 1, табл. 1).

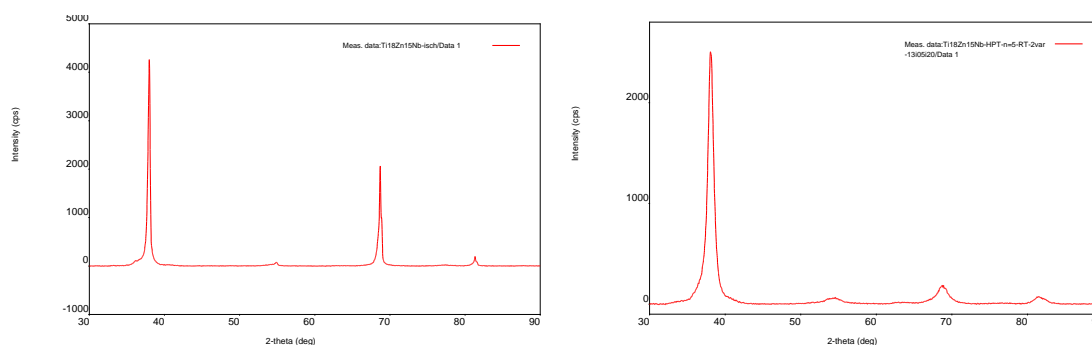


Рис. 1. РСА сплава в исходном состоянии и после ИПДК n=5

Параметры линии 110β и линий фаз α ω α'' , выявляемых на рентгенограммах исследуемых состояний

		2 θ , deg.	D	FWHM, deg	Int. I(cps deg)
Исходный	110 β	37.971(5)	2.3677(3)	0.285(5)	1385(6)
	201 α , 041 α''	77.3(3)	1.234(4)	3.9(5)	102(5)
ИПДК n=1	110 β	37.976(9)	2.3674(5)	0.937(11)	2325(41)
	002 ω , 130 α''	62.55(12)	1.484(3)	2.83(17)	36(50)
	$\alpha\omega\alpha''$	75.49(6)	1.2584(8)	0.8(2)	14.5(19)
ИПДК n=5	110 β	38.058(9)	2.3625(5)	0.873(10)	2271(10)
ИПДК n=10	110 β	37.955(5)	2.3686(3)	0.927(5)	3042(7)
	110 α 002 ω , 130 α''	62.84(13)	1.478(3)	1.8(4)	26(4)

Анализ данных РСА образцов Ti18Zr15Nb, подвергнутых ИПДК, так же позволяет утверждать, что основной фазой после ИПДК является Beta (β), доля второстепенных фаз мала (менее 5 %) Ширина рентгеновской линии β -фазы резко увеличивается после ИПДК (таблица 2), что указывает на увеличение плотности дислокаций и/или измельчение зерна в результате ИПДК.

Работа выполнена за счет средств РНФ № 20-69-47029. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» УГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geetha, M., A.K. Singh, R. Asokamani, and A.K. Gogia, *Progress in Materials Science*, 2009. 54(3): p. 397-425.
2. H.Y. Kim, J. Fu, H. Tobe, J. I. Kim, S. Miyazaki. *Shape Mem. Superelasticity*, 2015, v. 1, p. 107–116.
3. P. Laheurte, F. Prima, A.Eberhardt, T. Gloriant, M. Wary, E. Patoor, *J. Mech. Beh. Biomed. Mater.* 3(8) (2010) 565-573.
4. A.S. Konopatsky, S.M. Dubinskiy, Yu.S. Zhukova, V.A. Sheremetyev, V. Brailovski, S.D. Prokoshkin, M.R. Filonov, *Mater. Sci. Eng. A* 702 (2017) 301-311.
5. S. Prokoshkin, V. Brailovski, S. Dubinskiy, Y. Zhukova, V. Sheremetyev, A. Konopatsky, K. Inaekyan, *Shap. Mem. and Superelast.* 2(2) (2016) 130-144.
6. A. Kudryashova, V. Sheremetyev, K. Lukashevich, V. Cheverikin, K. Inaekyan, S. Galkin, S. Prokoshkin, V. Brailovski. *J.Alloys and Compounds*, 2020, v. 843, 156066.
7. Raab, G.I., R.Z. Valiev, D.V. Gunderov, T.C. Lowe, A. Misra, and Y.T. Zhu, *Mater. Sci. Forum.* 2008. V. 584-586. P. 80-83.
8. Gunderov, D.V., A.V. Polyakov, I.P. Semenova, G.I. Raab, A.A. Churakova, E.I. Gimaltdinova, I. Sabirov, J. Segurado, V.D. Sitdikov, I.V. Alexandrov, N.A. Enikeev, and R.Z. Valiev *Materials Science and Engineering A*, 2013. 562: p. 128-136.
9. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov, *Prog. Mater. Sci.* 45 (2000) 103-189
10. B.B. Straumal, A.A.Mazilkin, S.G.Protasova, D.V.Gunderov, G.A.López, B. Baretzky. *Materials Letters* 161(2015) 735–739 10.1016/j.matlet.2015.09.076..
11. Pushin V.G., Stolyarov V.V., Gunderov D.V., Valiev R.Z., Lowe T.C., Zhu Y.T. *Mater. Sci. and Eng. A*. 2005. V. 410-411. P. 386-389
12. Prokoshkin S.D., Khmelevskaya I.Yu., Dobatkin S.V., Trubitsyna I.B., Tatyarin E.V., Stolyarov V.V., Prokofiev E.A. *Acta Materialia*. 2005. V. 53. P. 2703–2714.
13. Gunderov D., Lukyanov A., Prokofiev E., Kilmametov A., Pushin V., Valiev R. *Materials Science and Engineering A*. 2009. V.503. P. 75–77.
14. M. Janeček, J. Čížek, J. Stráský, K. Václavová, P. Hruška, V. Polyakova, S. Gatina, I. Semenova *Materials Characterization*. – 2014. – Vol.98 – P. 233-240.
15. Gatina, S., I. Semenova, J. Leuthold, and R. Valiev, *Advanced Engineering Materials*, 2015.
16. Ahmad Zafari and Kenong Xia, *Adv.Eng.Mater.* 2020, 22, 1900471, DOI: 10.1002/adem.201900471.
17. Wei Xu, Roberto B. Figueiredo, Xiaolin Wu, Simon Pauly, Mihai Stoica, Jürgen Eckert, Terence G. Langdon, Kenong Xia, *Adv.Eng.Mater.* 2011, 13, No. 12
18. D.V. Gunderov, A.A. Churakova, E.V. Boltynjuk, E.V. Ubyivovk, E.V. Astanin, R.N. Asfandiyarov, R.Z. Valiev, W. Xioang, J.T. Wang *Journal of Alloys and Compounds* Volume 800, 5 September 2019, Pages 58-63

УДК 675

Д. Т. МИФТАХОВ

danil.miftahow@yandex.ru

Науч. руковод. – Г. С. ДЬЯКОНОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ВТ8М-1

Аннотация. В данной работе на основании литературных данных рассмотрено влияние термической и деформационной обработки сплава ВТ8М-1 на его механические характеристики. Проанализированы механические характеристики и микроструктура сплава после обработки.

Ключевые слова: термическая обработка; деформационная обработка; механические свойства; двухфазный титановый сплав.

Титановые сплавы являются одним из основных конструкционных материалов, применяемых в разных отраслях промышленности. Широкое их использование связано с присущими титану и его сплавам комплексу свойств – высокая удельная прочность, коррозионная стойкость в агрессивных средах, немагнитность, хорошая жаропрочность при температурах эксплуатации до 500-600°C. Сплав ВТ8М-1 используется в авиастроении для изготовления лопаток компрессоров авиационных двигателей.[0] Двухфазный титановый сплав ВТ8М-1 содержит 4,8-6,0% Al, 3,5-4,5% Mo, 0,3-1,5% Sn, 0,3-1,5% Zr, 0,08-0,25% Si, 0,5-1,5 Cr, и прочие примеси (Fe, C, N, O, H), его температура эксплуатации не превышает 500°C. Одной из важных проблем в эксплуатации лопаток из сплава ВТ8М-1 является эрозионные повреждения и разрушение входных кромок при соударении с инородными телами. Чтобы решить эту задачу, используют термическую и деформационную обработку. Согласно литературному источнику [2] рассмотрим три вида термической обработки.

1. Серийный: 920°C, 1 ч, охлаждение на воздухе, 580°C, 2 ч, охлаждение на воздухе.

2. Специальный: 980°C, 2 ч, охлаждение на воздухе, 550°C, 2 ч, охлаждение на воздухе.

3. ТЦО: $985 \rightleftharpoons 700^{\circ}\text{C}$, 10 цикл, охлаждение на воздухе, 550°C , 2 ч, охлаждение на воздухе.

Прутки диаметром 25 мм прокатанные по серийной технологии из слитка диаметром 750 мм подвергались термической обработке [2]. Согласно данным представленным в [2], рассмотрим механические характеристики сплава ВТ8М-1 после термической обработки.

Таблица 1

Механические характеристики сплава ВТ8М-1 после трех режимов термообработки

Сплав	Режим термообработки	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	Предел ползучести $\sigma_{0,2/100}$, МПа ($t=500^{\circ}\text{C}$)
		МПа		%		
ВТ8М-1	I - Серийный	1125	1070	14	41	294
	II - Специальный	1030	950	18	43	392
	III - ТЦО	1080	1015	14	44	392

После термической обработки по специальному режиму и ТЦО наблюдаются небольшое уменьшение предела прочности и предела текучести, но заметно вырастает предел ползучести. По сравнению с серийной обработкой предел ползучести вырос на 33%. Так же согласно литературному источнику длительная прочность после специального режима и ТЦО возрастает примерно на 20-30 МПа, по сравнению с серийной обработкой.

Согласно литературным данным [2], структура после специального режима представляет собой микроструктуру, состоящую из глобулярных частиц α -фазы, равномерно распределенных в матрице из α -пластин, разделенных β -прослойками, и малым количеством охрупчивающей α_2 -фазы. Полученная микроструктура – глобулярно-пластинчатая. В случае ТЦО микроструктура – полигональная.

Касательно деформационной обработки, ее цель заключается в получении мелкозернистой структуры. Для сплава ВТ8М-1 формирование мелкозернистой структуры происходит в результате динамической рекристаллизации одновременно с процессом сфероидизации. Согласно данным литературного источника

[3]: перед испытаниями образцы сплава отжигали при 1020°C в течение 1 ч, затем охлаждали в печи. Механические испытания проводились на образцах толщиной 10 мм и диаметром 15 мм, который подвергался сжатию в интервале температур 500-900°C при скоростях деформации $5 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Зависимость напряжения от степени деформации при разных температурах представлены на рис. 1.

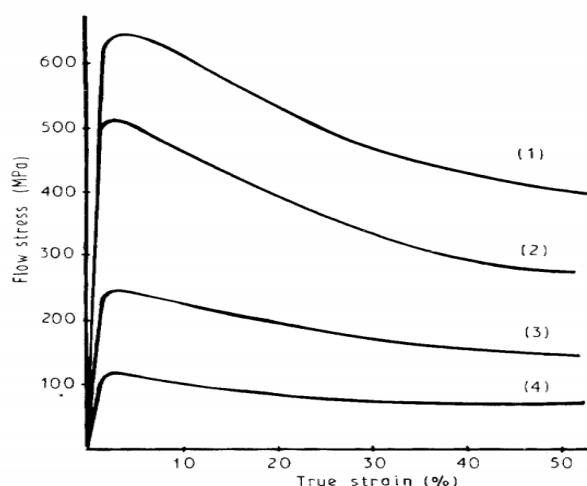


Рис. 1. Зависимость напряжения от степени деформации:
1 – $t=600^\circ\text{C}$; 2 – $t=700^\circ\text{C}$; 3 – $t=800^\circ\text{C}$; 4 – $t=900^\circ\text{C}$

Рассмотрим механические характеристики, взятые из литературных источников [3].

Таблица 2

Механические характеристики сплава ВТ8М-1 при разном размере зерна.
Скорость деформации $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

Размер зерен (мкм)	Температура деформации ($^\circ\text{C}$)	Предел текучести при $\varepsilon=40\%$ (МПа)	Относительное удлинение (%)	Предел прочности при растяжении (МПа)
0,06	600	150	600	-
0,1		230	480	-
0,4		390	225	-
5		650	35	-
0,06	20	-	20 (53) ^a	1400
0,1		-	18 (46) ^a	1350
0,4		-	15 (35) ^a	1310
5		-	20 (45) ^a	1050

^a В скобках указано значения относительного сужения

Опираясь на данные из таблицы 2, можно сказать, что при уменьшении размера зерна, предел прочности сплава VT8M-1 увеличивается. При этом размер зерна слабо влияет на пластические характеристики сплава (относительное удлинение и относительное сужение несильно отличаются).

Таким образом, представленные результаты указывают на то, что термическая и деформационная обработка сплава VT8M-1 обеспечивает повышение его эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Г. Илларионов, А.А. Попов Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов.
2. В.В. Тетюхин, С.З. Бокштейн, А.С. Федотов, Н.П. Зюлина, О.В. Маркович, Н.Н. Лошакова, Л.В. Проходцева, М.П. Кривенко Влияние различных режимов термообработки на структуру, механические свойства и характеристики надежности сплавов VT3-1 и VT8.
3. G.A. Salishchev, O.R. Valiakhmetov, R.M. Galejev Formation of submicrocrystalline structure in the titanium alloy VT8 and its influence on mechanical properties.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ МОДУЛЯЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДЕЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОД В ГЦК МЕТАЛЛАХ

Аннотация. В трехмерных кристаллах можно говорить о нульмерных, одномерных и двумерных дискретных бризерах. В последнем случае предполагается возбуждение атомов вдоль некоторой плоскости, причем, с удалением от данной плоскости, амплитуда их колебаний должна экспоненциально уменьшаться.

Следует заметить, что о возможности существования и свойствах одномерных и двумерных дискретных бризеров в трехмерных кристаллах до настоящего времени ничего не было известно и работы в данном направлении не велись. Описание новых долгоживущих пространственно-локализованных нелинейных колебательных мод в трехмерных кристаллах представляет несомненный интерес для широкого круга исследователей и является актуальной задачей физики твердого тела.

Ключевые слова: гцк-металлы; делокализованные нелинейные моды; дискретные бризеры.

Введение

При изучении нелинейных колебаний в кристаллических решетках большое значение имеет их пространственная размерность. Существуют как одномерные кристаллы (полимерные цепочки, карбин и др.), так и двумерные (графен, силицен, фосфорен, нитрид бора, дисульфид молибдена и др.), однако подавляющее большинство кристаллов, используемых на практике, трехмерны. В одномерных кристаллах, экспоненциально локализованные в пространстве дискретных бризеров (ДБ) являются нульмерными объектами. В двумерных кристаллах возможны как нульмерные ДБ, то есть пространственно локализованные вдоль обоих координатных направлений, так и одномерные ДБ, локализованные вдоль одного направления и делокализованные вдоль другого. По аналогии, в трехмерных кристаллах можно говорить о нульмерных, одномерных и двумерных ДБ. В последнем случае предполагается возбуждение атомов вдоль некоторой плоскости, причем, с удалением от данной плоскости, амплитуда их колебаний должна экспоненциально уменьшаться. До сих пор ра-

боты в данном направлении не велись, поэтому полученные нами результаты будут интересны людям, занимающимся физикой твердого тела.

Детали компьютерного эксперимента

В связи с тем, что на примере решетки морзе было показано, что реализация делокализованных нелинейных колебательных мод (ДНКМ) может приводить к значительной локализации энергии, что впоследствии может сказаться на дефектной структуре материала, в данной работе была поставлена цель проанализировать модуляционную неустойчивость в решетке меди.

ДНКМ являются точными решениями нелинейных уравнений движения атомов независимо от вида межатомного потенциала и полностью определяются симметрией кристаллической решетки.

Амплитуды смещения атомов из узлов кристаллической решетки варьировались в интервале от 0.01 до 0.1 Å. Установившаяся амплитуда определялась путем усреднения размаха колебаний атомов ДНКМ в момент времени равный 1 пс. Периодические граничные условия использовались вдоль всех трех направлений.

Атомы в Cu образуют трехмерную ГЦК решетку с примитивной трансляционной ячейкой, содержащей один атом Cu и размером $10 \times 10 \times 10$. Атомная масса меди равна $m(\text{Cu}) = 63.55$ а.е.м. Параметр равновесной решетки $a = 1.8075$ Å.

LAMMPS используется для проведения моделирования молекулярной динамики с использованием межатомного потенциала. Схема четвертого порядка с шагом по времени 0.0001 пс используется для численного интегрирования уравнений движения атомов. Фононная плотность состояний (DOS) рассчитывается как преобразование Фурье автокорреляционных функций траекторий атомов при температуре 0 К. Нулевая температура выбрана поскольку тепловые флуктуации атомов существенно нарушают колебания атомов моды и тем самым затрудняют наблюдение изучаемого явления. Продолжительность моделирования была ограничена 12000 шагами по времени.

Результаты исследования

На основе процесса компьютерного моделирования были получены амплитудно-частотные зависимости делокализованных мод и значения напряжений, возникающих в результате них. На рис. 1 виды делокализованных мод в ГЦК решетке меди. Мы исследовали моды 1, 2, 5 и 6.

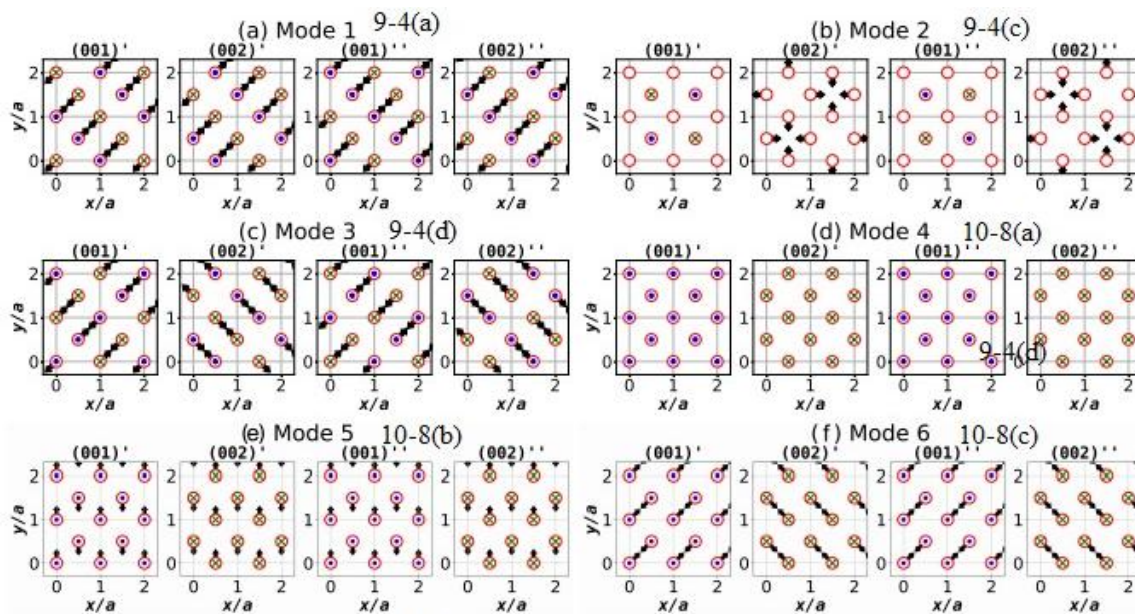


Рис. 1. Виды делокализованных мод в ГЦК решетке меди

Для моды 1 были получены следующие результаты. Больше время «жизни» данной моды составляет порядка 400 пс, а параметр локализации – 0.00055. Мода 1 изотропна, так как движения атомов на различных плоскостях уравновешивают друг друга, поэтому напряжения по плоскостям практически одинаковы.

Если сравнивать параметр локализации для моды 1 и моды 2, то сразу видно, что величина для последней больше на порядок, также и время «жизни» моды сильно возросло – 1400 пс. Нужно заметить, что для амплитуды $A=0.01$ нет пика параметра локализации, а только колебания значений. Это можно объяснить тем, что кристаллической решетки $10 \times 10 \times 10$ уже не хватает, а так как у нас стоят периодические граничные условия, то колебания накладываются друг на друга. Напряжение в этой моде распределяется, как и в предыдущей.

Как и в моде 2, при амплитуде $A=0.01$, мода 5 не может локализоваться из-за размера решетки. Это видно по рисунку 3.11. По сравнению с модой 1 время видно, что время «жизни» моды увеличилось в два раза, а самый большой параметр локализации у амплитуды $A=0,02$, в то время, как у 1 моды, параметр локализации у амплитуды $A=0,01$. Напряжения на плоскостях xx , yy и zz у моды 5 анизотропны, поэтому они распределяется по-разному. Это можно объяснить тем, что на плоскости xx почти нет колебаний, в то время как на других плоскостях они есть, что и дает нам локализацию напряжения с последующим ее снижением. Также и средние напряжения от амплитуды отличаются, напряжение на плоскости yy больше. Для моды 6 хватило размера решетки, поэтому при амплитуде $A=0.01$. Время «жизни» данной моды составляет 500 пс. Плоскости xx , yy и zz у моды 6 изотропны, как и у моды 1. Поэтому зависимости напряжений от времени практически одинаковы, как и их значения.

Вывод

Мы установили, что время модуляционной неустойчивости уменьшается по мере увеличения амплитуды, в то время как параметр локализации растет. Мы выяснили, что плоскости кристалла могут быть анизотропны, вследствие чего напряжения распределяются по-разному. А также было установлено, что ДНКМ могут привести к появлению дискретных бризеров, которые локализуют значительную часть энергии и могут влиять на макросвойства металлов, в частности на теплопроводность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korznikova EA, Bachurin DV, Fomin SY, Chetverikov AP, Dmitriev SV. 2017 Instability of vibrational modes in hexagonal lattice. The European Physical Journal B 90, 23.
2. Barani E, Korznikova EA, Chetverikov AP, Zhou K, Dmitriev SV. 2017 Gap discrete breathers in strained boron nitride. Physics Letters A 381, 3553–3557. (doi:10.1016/j.physleta.2017.08.057)
3. Korznikova EA, Shcherbinin SA, Ryabov DS, Chechin GM, Ekomasov EG, Barani E, Zhou K, Dmitriev SV. 2019 Delocalized nonlinear vibrational modes in graphene: second harmonic generation and negative pressure. physica status solidi (b) 256, 1800061.
4. Dmitriev S, Korznikova E, Bokij D, Zhou K. 2016 Auxeticity from nonlinear vibrational modes. Physica status solidi (b) 253, 1310–1317.
5. Nicoletti D, Cavalleri A. 2016 Nonlinear light–matter interaction at terahertz frequencies. Advances in Optics and Photonics 8, 401. (doi:10.1364/AOP.8.000401)

6. Liu B, Bai L, Korznikova EA, Dmitriev SV, Law AW-K, Zhou K. 2017 Thermal conductivity and tensile response of phosphorene nanosheets with vacancy defects. *The Journal of Physical Chemistry C* 121, 13876–13887.
7. Xu X, Chen J, Li B. 2016 Phonon thermal conduction in novel 2D materials. *J. Phys.: Condens. Matter* 28, 483001. (doi:10.1088/0953-8984/28/48/483001)
8. Li X, Maute K, Dunn ML, Yang R. 2010 Strain effects on the thermal conductivity of nanostructures. *Physical Review B* 81. (doi:10.1103/PhysRevB.81.245318)

УДК 675

Р. К. НАФИКОВ

nafickov.ruslan2011@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О. Б. КУЛЯСОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ, КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА Mg-Sr ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ОБРАБОТОК МЕТОДАМИ РКУП И ИПДК

Аннотация. В работе исследовано влияние равноканального углового прессования и интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) на структурные изменения в сплаве Mg-2%Sr. Микроструктуру сплава после ИПДК и дополнительных отжигов изучали методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Для определения механических свойств использовали измерения микротвердости и испытания на растяжение малых образцов.

Металлические ортопедические имплантаты широко используются для замены и/или регенерации поврежденных костных тканей и обладают рядом весомых преимуществ перед полимерными и полимерно-керамическими композитами, применяемыми в тех же целях, за счет более высоких показателей механической и ударной прочности [1, 2]. Материалы на основе магния (Mg) имеют ряд преимуществ перед биоинертными сплавами металлов, основным из которых является биорезорбируемость. Магний – жизненно важный химический макроэлемент, который является нетоксичным, имеет хорошую биосовместимость, высокий предел прочности в сравнении с полимерами и более высокую пластичность в сравнении с керамикой [3]. Однако чистый магний недостаточно прочен для применения его в качестве материала для изготовления имплантатов. Вследствие этого в данной работе рассмотрен сплав магния со стронцием, который так же является жизненно необходимым для человека [4]. Легирование стронцием повышает прочность сплава [5]. Также повышения прочности, возможно, достичь измельчением зеренной структуры различными методами, такими как равноканальным угловым прессованием и методом интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) [6]. Целью данной работы стало изучение механических, коррозионных свойств и микроструктуры сплава Mg-Sr, полученных после интенсивной пластической деформации.

Гомогенизационный отжиг исходных образцов Mg-2% Sr проводили в муфельной печи Nabertherm при $T = 450^{\circ}\text{C}$ в течение 24 часов с охлаждением на воде. Равноканальное угловое прессование осуществляли при 400°C , 4 прохода по маршруту Вс. Затем образцы были подвергнуты интенсивной пластической деформации кручением при 100°C при давлении 6ГПа и 5 оборотах.

Макроструктуру исследовали на оптическом микроскопе Olympus GX51. Анализ микроструктуры проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEM-6390 и просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-2100 с ускоряющими напряжениями 10 кВ и 200 кВ соответственно. Измерение микротвердости (Hv) осуществляли на микротвердомере Micromet 5101 с нагрузкой 50 г и временем выдержки 10 с.

Коррозионные испытания проводили в соответствии с ASTM G1-03-E в растворе Рингегра при температуре 37°C .

Микроструктура исходного гомогенизированного образца (рис. 1) представляет собой твердый раствор ($\alpha\text{-Mg}$) с выделением эвтектики ($\alpha\text{-Mg}+\text{Mg}_2\text{Sr}$), по границам зерен. Анализ микроструктуры сплава показал, что в гомогенизированном состоянии средний размер зерна равен 227 мкм. Объемная доля эвтектики составила $11 \pm 2\%$. Микротвердость гомогенизированного состояния составила $38 \pm 5 \text{ HV}$. После РКУП средний размер зерен сплава Mg-2%Sr составил 10 мкм (рис.2а). Объемная доля эвтектики составила $14 \pm 2 \%$. Исследования тонкой структуры выявили высокую плотность дислокаций, связанную с деформациями в процессе РКУП (рис 2б). Микротвердость в процессе РКУП была увеличена до $54,6 \pm 5 \text{ HV}$.

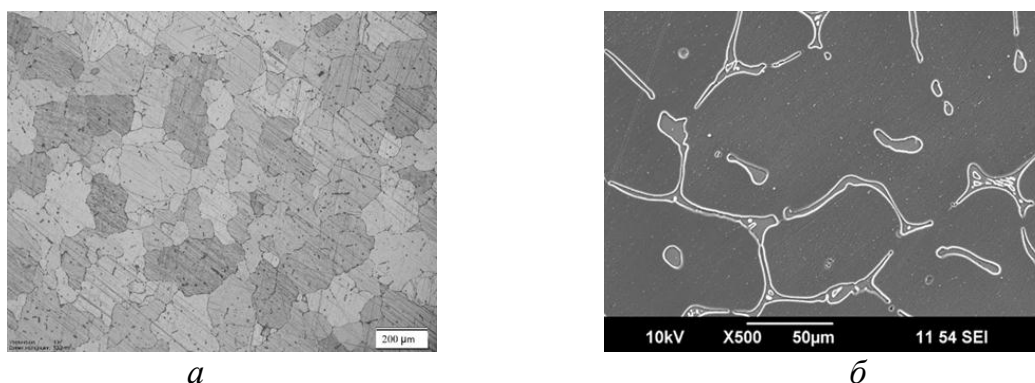


Рис. 1. Структура гомогенизированных образцов, полученных:
а – на оптическом микроскопе; *б* – на РЭМ

Для дальнейшего измельчения зеренной структуры РКУП образцы были подвергнуты ИПДК при 100 °С. В образце исследуемого сплава сформировалась однородная ультрамелкозернистая структура со средним размером зерен 250 нм (рис.3а). Также наблюдали наличие фрагментов раздробленной эвтектической составляющей с объемной долей 12% (рис. 3б). Микротвердость этого состояния увеличилась до 65 ± 6 HV, благодаря сильному измельчению зерна. Вследствие последующей термической обработки при температуре 100 °С (рис. 3, в, г) средний размер зерна незначительно вырос и составил $6,7 \pm 0,7$ мкм. Объемная доля эвтектики составила 14 ± 1 %.

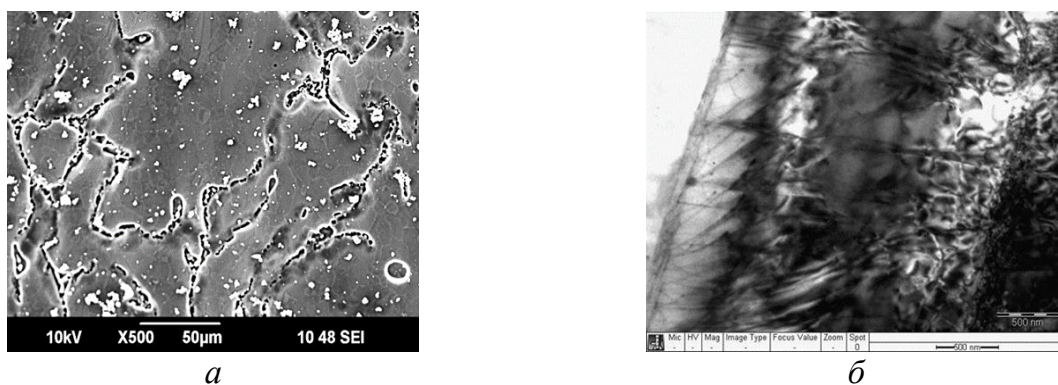


Рис. 2. Структура образцов после РКУП, полученных:
а – на РЭМ; *б* – на ПЭМ

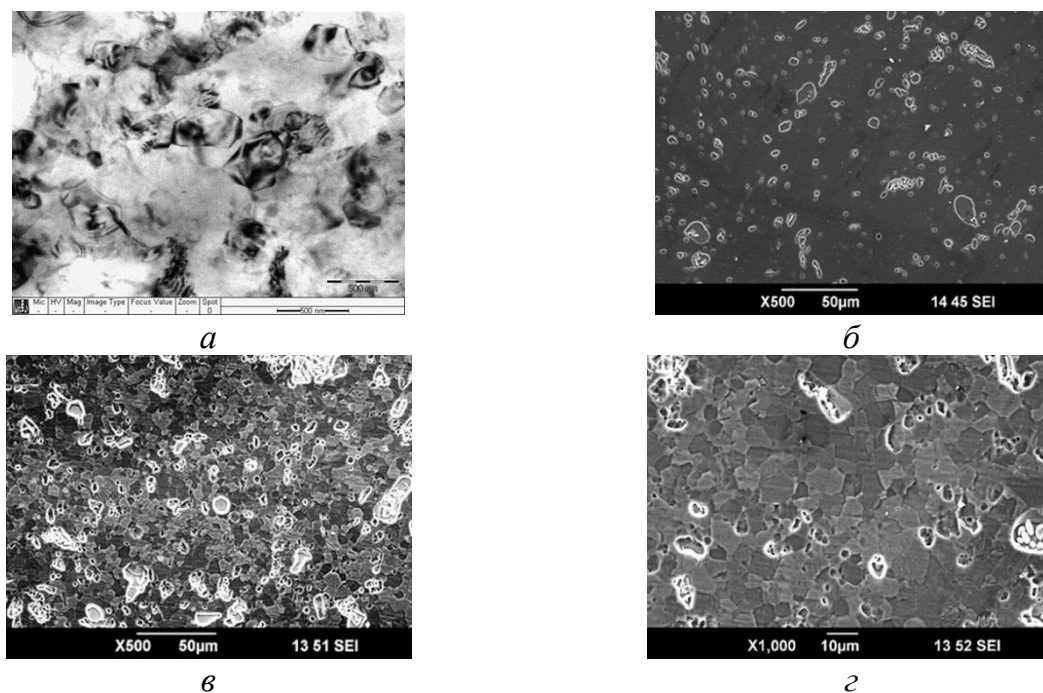


Рис. 3. Структура исследуемых образцов:
а, б – после комбинированной обработки РКУП + ИПДК при 100 °С;
в, г – РКУП + ИПДК при 100 °С и дополнительного отжига при 250 °С

С увеличением степени деформации после процессов РКУП и РКУП+ИПДК идет значительное увеличение значений микротвердости (рис.4а). Эти изменения в первую очередь связаны с измельчением среднего размера зе-рен, увеличения плотности дислокаций, а также твердорастворного упрочнения в результате некоторого растворения эвтектики в твердом растворе в процессе интенсивной пластической деформации.

Исходные образцы не обладают привлекательными механическими свойствами по сравнению с образцами, подвергнутыми пластической деформации с последующей термической обработкой (рис. 4б). После РКУП и ИПДК при температуре 100⁰С образцы имеют высокую микротвердость, что говорит об увеличении предела прочности при растяжении. Однако из-за высоких внутренних напряжений эти образцы показали хрупкое разрушение, даже не достигнув предела текучести. Образцы после РКУП 400⁰С + ИПДК 100⁰С и отжига при 250⁰С продемонстрировали наиболее высокие значения предела прочности 253 МПа, при высоких значениях относительного удлинения 6,5%.

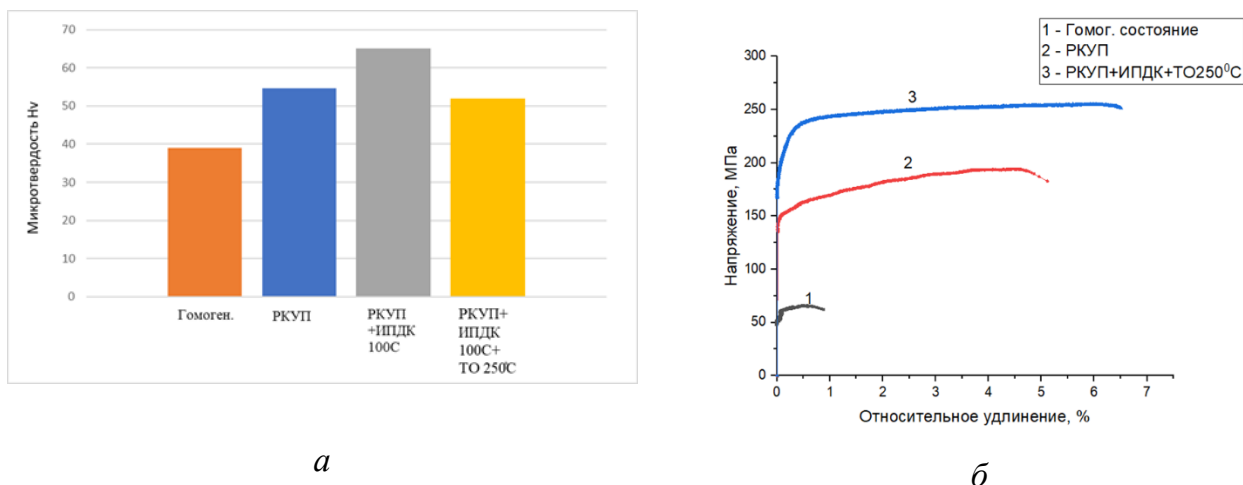
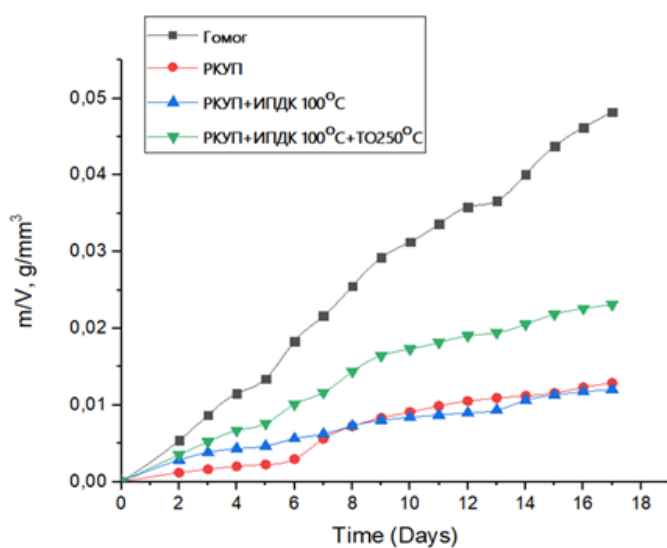


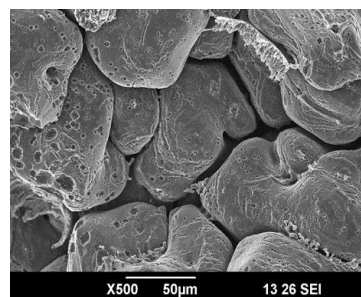
Рис. 4. *а* – зависимость микротвердости от процесса обработки;
б – результаты механических испытаний на растяжение

В гомогенизированном образце наблюдается самая интенсивная скорость коррозии, тогда как образцы с мелкозернистой структурой, полученной после пластических деформаций показывают себя более стабильно (рис.5а). Исследования микроструктуры образцов после 30 дневных вылеживаний в растворе Рингера позволили установить межкристаллитную коррозию, которая активно

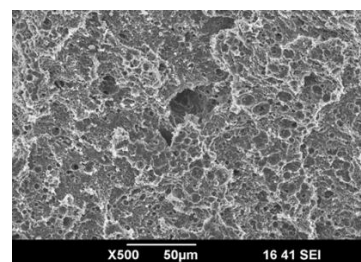
идет на границах зерен, где располагалась эвтектика (рис 5б). В состоянии после комбинированной обработки РКУП + ИПДК при температуре 100⁰С и дополнительного отжига при 250⁰С коррозия происходит в областях скогулировавшейся эвтектики (рис. 5в). Развивается равномерная питтинговая коррозия, которая в дальнейшем приводит к сквозной точечной коррозии металла, так как потенциал металла на этих участках имеет более отрицательное значение, чем потенциал основного металла. В дальнейшем эта тенденция сохраняется и питтинги начинают увеличиваться в диаметре.



а



б



в

Рис. 5. а – зависимость потери массы от воздействия солевого раствора образцов Mg - 2% Sr после различных видов обработок.

Изображение микроструктуры образцов после 30 дней коррозии:

б – гомогенизированное состояние; в – РКУП + ИПДК при 100 °С + ТО 250 °С

В результате исследований было выявлено, что применение дополнительной деформации методом ИПДК при 100⁰С к РКУП образцам ведет к значительному увеличению микротвердости с 54,6 НV (РКУП) до 65 НV (РКУП+ИПДК) за счет измельчения структуры, увеличения плотности дислокаций, а также твердорастворного упрочнения исследуемого сплава Mg-2%Sr. Также было установлено, что гомогенизированный сплав корродирует быстрее, чем образцы после пластической деформации. Причиной меньшей скорости коррозии в ультрамелкозернистом образце может быть разрушение при ИПД-

обработке непрерывной сетки эвтектик, играющей роль катода при коррозионных испытаниях. Проанализированы поверхности сплава до и после пластической деформации в результате чего установлено, что в гомогенизированном состоянии коррозия является межкристаллитной, а после ИПД – питтинговая с разной степенью однородности, зависящей от метода ИПД.

Таким образом, сочетание повышенной прочности и коррозионной стойкости, наблюдаемое в ультрамелкозернистом сплаве Mg-2% Sr, может быть привлекательным для следующих исследований функциональных свойств сплава для улучшения конструкции имплантатов в медицине.

Экспериментальная часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УГАТУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 157–167.
2. Мухина И.Ю. Структура и свойства новых литейных магниевых сплавов // *Литейное производство*. 2011. №12. С. 12–14.
3. Черный В.Н. Перспективы применения биodeградирующих сплавов на основе магния в остеосинтезе. *Запорожский медицинский журнал*. 2013; 6 (81): С. 76–79.
4. Городецкий В.В., Талибов О.Б. Препараты магния в медицинской практике. *Малая энциклопедия магния*. М.: Медпрактика, 2003: 44.
5. Zheng Y.F., Gu X.N., Witte F. Biodegradable metals, *Mater Sci Eng R Rep*, 77 (2014) 1-34.
6. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk nanostructured materials: fundamentals and applications. Hoboken: Wiley/TMS, 2014. - xvi, 440 p.: ill. - Incl. bibl. ref. - Ind.: p.436-440.
7. Клинов И.Я., Удыма П.Г., Молоканов А.В., Горяинова А.В. Влияние механических напряжений на скорость общей коррозии (механохимическая коррозия) // *Химическое оборудование в коррозионностойком исполнении*. С. 79.

УДК 538.9

Ю. Р. НУРИЕВА

yu.nuriewa@yandex.ru

Науч. руковод. – Д. А. АКСЕНОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЛАБОРАТОРНОГО ОБРАЗЦА КОНТАКТНОГО ПРОВОДА ИЗ СПЛАВА Cu-0,65Cr

Аннотация. Использование методов интенсивной пластической деформации (ИПД), позволяет повышать комплекс механических и физических свойств в низколегированных термоупрочняемых бронзах. При этом в условиях высоких нагрузок особое внимание надо уделять деформационному разогреву, который является важным фактором для процессов структурообразования и фазовых превращений в сплавах системы Cu-Cr. Для изучения деформационного разогрева и его влияния на структурообразование и фазовые превращения в данной работе использован метод моделирования в среде Deform -3D. Проведено исследование особенностей изменения структуры лабораторного образца контактного провода и оценка вкладов в упрочнение при РКУП-формообразовании и пост-деформационном старении. Моделирование процесса РКУП с формообразованием провода свидетельствует о разогреве заготовки вплоть до 510°C. Полученная полосовая структура со средним поперечным размером фрагментов 400±18 нм обеспечивает прочность в 540±20 МПа и электропроводность 76% IACS.

Ключевые слова: контактный провод; прочность и электропроводность; низколегированный сплав Cu-Cr; деформационный разогрев.

Развитие современных высокоскоростных (ВС) электрифицированных дорог сопровождается повышенными требованиями к материалам и условиям эксплуатации проводов [1]. В связи с высокими скоростями, а также дополнительными нагрузками на провода. Для получения современных контактных проводов, как наиболее эффективные, используются методы ИПД, позволяющие за счет активного измельчения структуры и деформационного стимулирования фазовых превращений повышать комплекс механических и физических свойств в низколегированных термоупрочняемых бронзах [2-5]. В свою очередь, создание таких процессов представляет определенные сложности и требует тщательного анализа технологичности используемых методов.

Данная работа направлена на изучение деформационного разогрева и его влияния на структурообразование и фазовые превращения, исследование осо-

бенностей изменения структуры лабораторного образца контактного провода, оценка вкладов в упрочнение при РКУП-формообразовании и постдеформационном старении. В работе был исследован сплав с содержанием хрома 0,65%.

Было проведено компьютерное моделирование РКУП с формообразованием сплава Cu-0,65Cr с анализом температурных полей и напряжений. В процессе деформирования происходит максимальный разогрев заготовки до 510°C в очаге деформации формообразования. Также был проведен физический эксперимент – РКУП с формообразованием заготовки сплава Cu-0,6Cr с контролем температуры образца на выходе при помощи тепловизора (Testo 872). Анализ температуры разогрева в процессе РКУП показал корреляцию между данными компьютерного моделирования и физического эксперимента.

На следующем этапе была получена заготовка контактного провода сечением 120 мм² путем деформирования методом РКУП с формообразованием. Деформация проводилась при предварительном разогреве заготовки до 450°C. Анализ структуры образцов подверженных РКУП с формообразованием провода показал, что формируется вытянутая в направлении сдвига структура со средним поперечным размером структурных составляющих 410±18 нм. Предел прочности при этом составляет 470±20 МПа.

Для достижения повышенного комплекса свойств образец был подвержен пост-деформационному старению при 450°C в течении 30 минут. Средний поперечный размер полос практически не изменяется 400±18 нм. По границам фрагментов наблюдаются мелкодисперсные частицы вторых фаз размером 10-12 нм. Прочность образца провода составляет 540±15 МПа и электропроводность 76% IACS.

Таблица 1

Физико-механические характеристики

	HV, МПа	σ_B , МПа	Относительное удлинение, %	Электропроводность, % IACS
РКУП-форм.	1120±50	470±20	16±2	35±2 %
РКУП-форм.+ТО	1450±50	540±20	20±2	76±2 %

Расчет и анализ вкладов механизмов упрочнения показал, что наибольший прирост предела текучести после обработки РКУП с формообразованием происходит за счет вклада зернограничного упрочнения который составляет 42 %, на втором месте по эффективности увеличения предела текучести стоит вклад дисперсионного упрочнения – 32 %. Анализ состояния после РКУП с формообразованием и пост-деформационного отжига показал, что наибольший вклад происходит за счет дисперсионного упрочнения 59%, на 2 месте зернограничное упрочнение 28%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда №19-19-00432.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Loginov, Y. Copper and Deformable Copper Alloys; UGTU: Ekaterinburg, Russia, 2006; p. 136. (In Russian)
2. Асфандияров, Р.Н. Комбинированный процесс изготовления наноструктурных контактных проводов для высокоскоростных магистралей 2017
3. Фаизов, И.А. Роль фазовых превращений в эволюции дисперсных частиц в хромовых бронзах при равноканальном угловом прессовании// И. А. Фаизов, Г. И. Рааб, С. Н. Фаизова, Д. А. Аксенов, Н. Г. Зарипов//Письма о материалах 6 (2), 2016. с.132-137
4. Vinogradov, K. Structure and properties of ultra-fine grain Cu–Cr–Zr alloy produced by equal-channel angular pressing / A. Vinogradov, V. Patlan, Y. Suzuki, K. Kitagawa//Acta Materialia 50 (2002) P. 1639–1651.
5. Исламгалиев, Р.К., Нестеров К.Н., Валиев Р.З. Структура, прочность и электропроводность медного сплава Cu-Cr подвергнутого интенсивной пластической деформации // ФММ. – 2015. – Т. 116, № 2. – с. 219.

УДК 538.951

А. А. ТЕРЕГУЛОВА
ter.adelya@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О. Б. КУЛЯСОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Mg-x%Ca ПОСЛЕ ИПДК

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования структуры и прочностных свойств магниевых сплавов системы Mg-xCa ($x=0.5, 0.7, 1$ и 1.5). Установлено повышение значений микротвердости с 48,8 до 81,4 HV в сплаве Mg-0,5%Ca после применения интенсивной пластической деформации кручением при комнатной температуре. Однако в исходном сплаве Mg-1,5%Ca после ИПДК и дополнительного термического отжига при температуре 150°C микротвердость повысилась с $39,65 \pm 3,27$ до $99,1 \pm 5,03$ HV.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация кручения; магниевый сплав; отжиг.

Магний считается подходящим кандидатом для биоразлагаемых имплантатов в остеосинтезе или других временных медицинских применений, т.к. является физиологически совместимым, биорезорбируемым в организме человека и стимулирует формирование костной ткани [1-3]. Как правило, разлагаемые имплантаты имеют то преимущество, что нет необходимости для повторной операции по удалению имплантата, что позволяет сэкономить средства для системы здравоохранения и полезно для пациента. Кроме того, биоразлагаемые имплантаты также применимы в педиатрических случаях, когда тело находится все еще в процессе роста и постоянные имплантаты пришлось бы менять, чтобы соответствовать росту. В отличие от других материалов для имплантатов, магний имеет и другие преимущества. По сравнению с доступными полимерными биоразлагаемыми материалами, используемыми в остеосинтезе, магниевые сплавы характеризуются более высокой прочностью.

Важной проблемой, которую следует учитывать, является слишком высокая скорость коррозии магниевых сплавов. Лучшим кандидатом на биоразлагаемый имплантат был бы Mg высокой чистоты. Однако чистый магний не соответствует требованиям прочности (более 300 МПа) [6]. Повышение прочности

возможно несколькими способами. Одним подходом является легирование чистого металла другими элементами. Однако большое количество упрочняющих добавок, как правило, резко снижает коррозионную стойкость сплава за счет формирования микрогальванических пар между матрицей зерна и вторыми фазами, и пластичность, что вместе делает сплав непригодным для использования в качестве имплантатов. Следовательно, перспективным направлением для медицинских применений является разработка низколегированных магниевых сплавов. Более того, ввиду растворимости сплава в организме человека, существенно сужается выбор легирующих элементов, которые должны быть биологически инертными, либо быть совместимыми с человеческим организмом и не являться токсичным.

Целью данной работы является повышение прочностных свойств методом ИПДК.

В качестве исходного материала были выбраны магниевые сплавы систем Mg-x%Ca (x=0.5, 0.7, 1 и 1.5). Интенсивную пластическую деформацию кручением проводили при комнатной температуре, с приложенным давлением $P=6$ ГПа, количество оборотов составило $n=10$. Исследование структуры образцов в состоянии поставки проводили на оптическом микроскопе «*Olimpus GX51*». Измерение микротвердости проводили на приборе «*Durascan 50*» при нагрузке 100 г и выдержке в течение 10 секунд (согласно ГОСТ 9450-76). Для исследования термической стабильности проводили отжиг образцов в интервале температур $T=100\div 400^{\circ}\text{C}$, с шагом 50°C и временем выдержки образца в печи – 1 час.

Структура образцов сплава Mg-0,5%Ca в состоянии поставки состоит из крупных зерен средним размером 1094,3 мкм. Границы зерен четкие, тонкие. В границах зерен наблюдались удлиненные по форме границы зерна, либо в виде отдельных точек частицы второй фазы. Объемная доля частиц второй фазы в состоянии поставки составляет 2,7% (Рис. 1 а). Средний размер зерен сплава Mg-0,7%Ca составил 390,9 мкм. Границы зерен плотно заполнены вто-

рой фазой, также в теле зерна находятся частицы глобулярной формы. Объемная доля этих частиц второй фазы в состоянии поставки составляет 5,1% (Рис. 1 б). Структура сплава Mg-1%Ca также состоит из частицы размером 118,53 мкм со средним размером зерен 3,8% (Рис. 1 в). В структуре сплава Mg-1,5%Ca наблюдалась эвтектика, средний размер зерен составил 47,14 мкм, также на теле зерна и на границах зерен присутствовали частицы, объемная доля частиц составил 6,1% (Рис. 1 г).

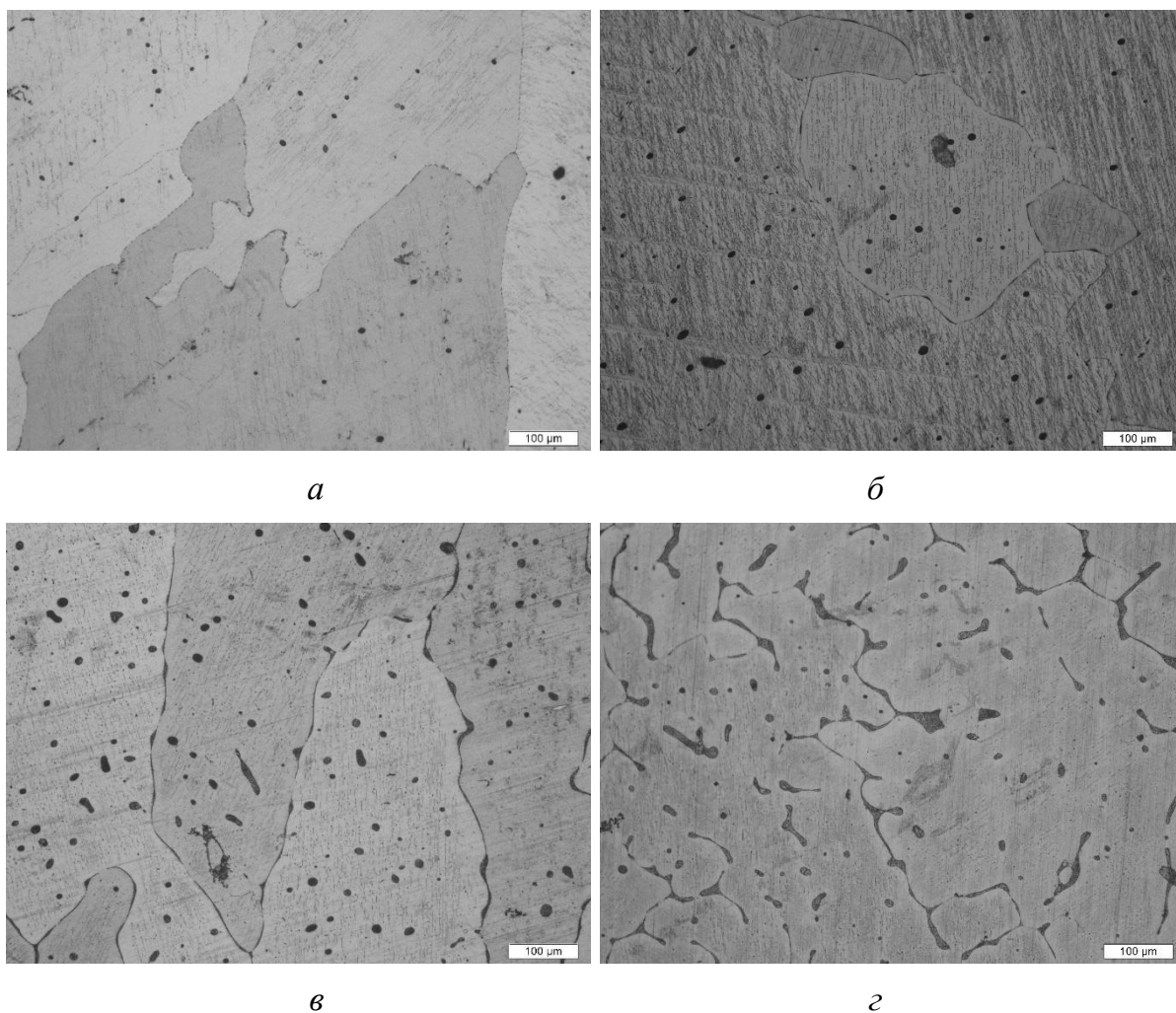


Рис. 1. Структура сплава Mg-хСа в состоянии поставки:
а – Mg-0,5%Ca; б – Mg-0,7%Ca; в – Mg-1%Ca и г – Mg-1,5%Ca

Прочностные свойства сплавов в состоянии поставки и ИПДК были проанализированы также методом измерения микротвердости. Значения микротвердости в состоянии образцов поставки сплавов Mg-0,5%Ca, Mg-0,7%Ca, Mg-1%Ca и Mg-1,5%Ca составили $48,8 \pm 7,3$, $48,8 \pm 7,86$, $45,9 \pm 6,55$ и $39,65 \pm 3,27$ HV, соответственно. В процессе интенсивной пластической деформации круче-

нием микротвердость в исследуемых сплавах повысилась до значений $81,46 \pm 2,15$, $87,25 \pm 1,06$, $82,1 \pm 1,72$ и $89,14 \pm 2,79$, соответственно (Рис. 2а).

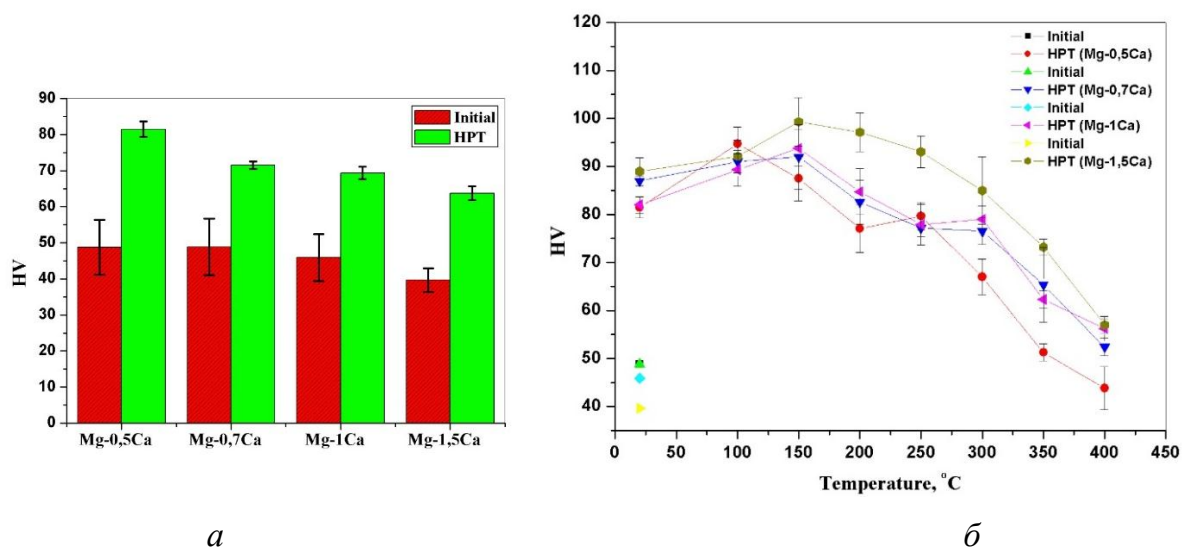


Рис. 2. а – микротвердость сплавов состояния поставки и образцов, подвергнутых методом ИПДК; б – термостабильность образцов сплавов Mg-0,5%Ca, Mg-0,7%Ca, Mg-1%Ca и Mg-1,5%Ca, подвергнутых ИПДК и дополнительным отжигам

Для изучения термической стабильности были проведены изохронные от-жиги и получена зависимость микротвердости от температуры отжига (рис. 2б). Видно, что образцы Mg-1%Ca при отжиге 250 °C микротвердость заметно уменьшается до 79 HV, а при отжиге 350 °C снижается до 63 HV. Предположительно это связано с отсутствием мелкодисперсных частиц второй фазы, которые сдерживают рост зерен, в результате структура стремительно трансформируется в крупнозернистую.

Таким образом, самую высокую твердость показал образец сплава Mg-1,5%Ca после ИПДК и дополнительного термического отжига при температуре 150°C микротвердость повысилась по сравнению с состоянием поставки значение микротвердости увеличилась с $39,65 \pm 3,27$ до $99,1 \pm 5,03$ HV. Соответственно, чем больше процента Ca в сплаве, тем выше значение твердости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E.W. Hey Groves, An Experimental Study of the Operative Treatment of Fractures. *British Journal of Surgery* 1 (1913) 438-501.
2. F. Witte, V. Kaese, H. Haferkamp, E. Switzer, A. Meyer-Lindenberg, C.J. Wirth, H. Windhagen, In vivo corrosion of four magnesium alloys and the associated bone response. *Biomaterials* 26 (2005) 3557-3563.
3. H. Zreiqat, C.R. Howlett, A. Zannettino, P. Evans, G. Schulze-Tanzil, C. Knabe, M. Shakibaei. Mechanisms of magnesium-stimulated adhesion of osteoblastic cells to commonly used orthopaedic implants. *Journal of Biomedical Materials Research* 62 (2002) 175-184.
4. R. Radha, D. Sreekanth. Insight of magnesium alloys and composites for orthopedic implant applications – a review, *J. of Magn. and Alloys* 5 (2017) 286-312, DOI:10.1016/j.jma.2017.08.003.

А. А. ТИТОВА

anastasiat605@gmail.com

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА ОСНАСТКЕ d 10 мм НА СТРУКТУРУ И H_v СПЛАВА $Ti_{18}Zr_{15}Nb$

Аннотация. Рассмотрено изменение структуры, а также свойств, бета-титанового сплава $Ti_{18}Zr_{15}Nb$ после равноканального углового прессования. Исследуемым материалом являлся сплав на основе титана $Ti_{18}Zr_{15}Nb$ с памятью формы, разработанный командой МИ-СиС, который создан для перспективного медицинского применения. Использовано равноканальное угловое прессование для того, чтобы изменить механические свойства. Структура материала при РКУП измельчается до УМЗ состояния. Исследовано механическое поведение титанового сплава до и после РКУП путем испытаний на измерение микротвердости.

Ключевые слова: бета-титановый сплав; РКУП; механические свойства; биомедицина.

Титан – это один из доступных материалов, применяемых в биомедицине, а также сплавы на его основе [1]. Однако большая разница между упругими модулями материала имплантата (Ti) и кости является причиной разнородной упругой деформации, то есть возникновение резорбции ткани вокруг имплантата [1]. Чтобы решить эту задачу, используют титановые сплавы β -типа с наиболее низким модулем упругости на основе Ti-Zr и Ti-Nb для биомедицины. [2,3] Сплавы на такой основе являются нетоксичными, демонстрируют отличное сочетание высокой биомеханической совместимости с костной тканью, то есть имеют низкий модуль упругости и сверхупругое поведение, также отличная коррозионностойкость. Один из эффективных способов воздействия на материал – равноканальное угловое прессование (РКУП) [4,5] и он используется для повышения прочности материалов. В данном исследовании РКУП подверглись бета-титановые сплавы $Ti_{18}Zr_{15}Nb$.

Исследуемым материалом является $Ti_{18}Zr_{15}Nb$ разработанный командой московской командой МИСиС. От них получены исходные образцы сплава $Ti_{18}Zr_{15}Nb$ после ТМО. Прутки сплава диаметром 10 мм длиной 60 мм под-

вергались РКУП при температуре $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, количество циклов составило $n=4$ и $n = 7$ под углом равным $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Фазовый состав заготовок изучали методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре «PANalytical X'pert Pro» при комнатной температуре при использовании $\text{Cu-K}\alpha$ излучения в интервале брэгговских углов 2θ от 30° до 100° . По дифрактограммам определяли условную ширину рентгеновских линий β -фазы, измеряя ее на половине высоты. Расчет параметров решетки α'' и β - фаз проводился по методам наименьших квадратов и экстраполяции параметров решетки β -фазы на $\theta=90^{\circ}$ [6,7]

Фольги для исследования в ПЭМ получали вырезкой диска диаметром 3 мм из предварительно утоненной до 100 мкм пластины. Полученный диск подвергали электрополировке на аппарате Tenipol 5 в электролите: 6 % хлорной кислоты, 35 % бутанола, 59% метанола. Напряжение электрополировки соответствовало 20 В, температура $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Электрополировку проводили до появления сквозного отверстия в полуавтоматическом режиме.

Микротвердость по Виккерсу образцов в различном состоянии измеряли на установке DuraScan 50 по ГОСТ 2999-75 т, при нагрузке 0,01кг в течение 10с. Перед измерением поверхность образца отшлифовали и отполировали.

Полученные рентгеновские дифрактограммы представлены на рис. 1-2.

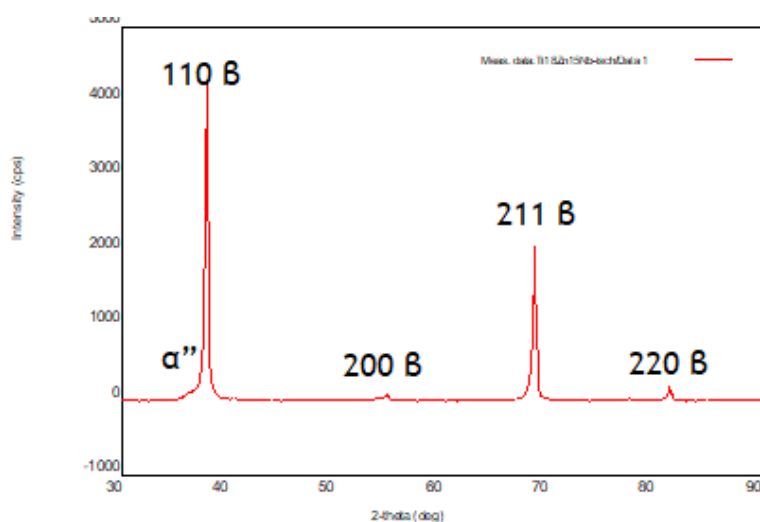


Рис. 1. Рентгенограммы сплава $\text{Ti}_{18}\text{Zr}_{15}\text{Nb}$ в исходном состоянии

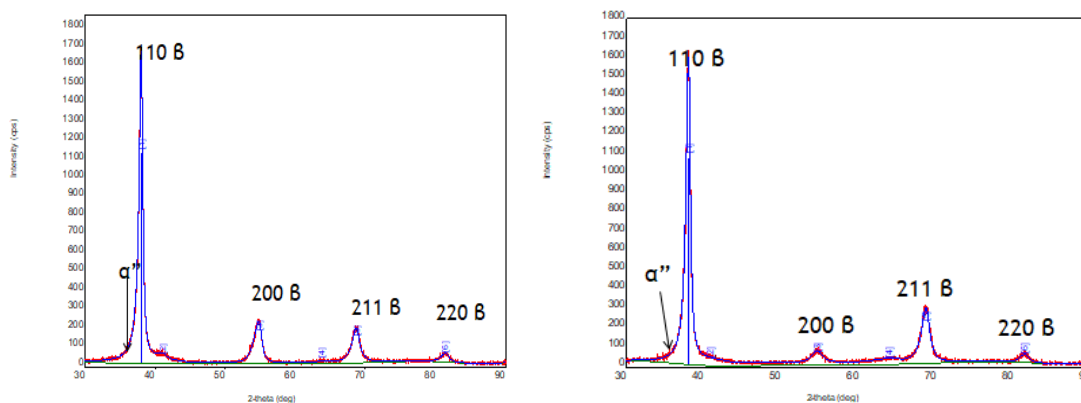
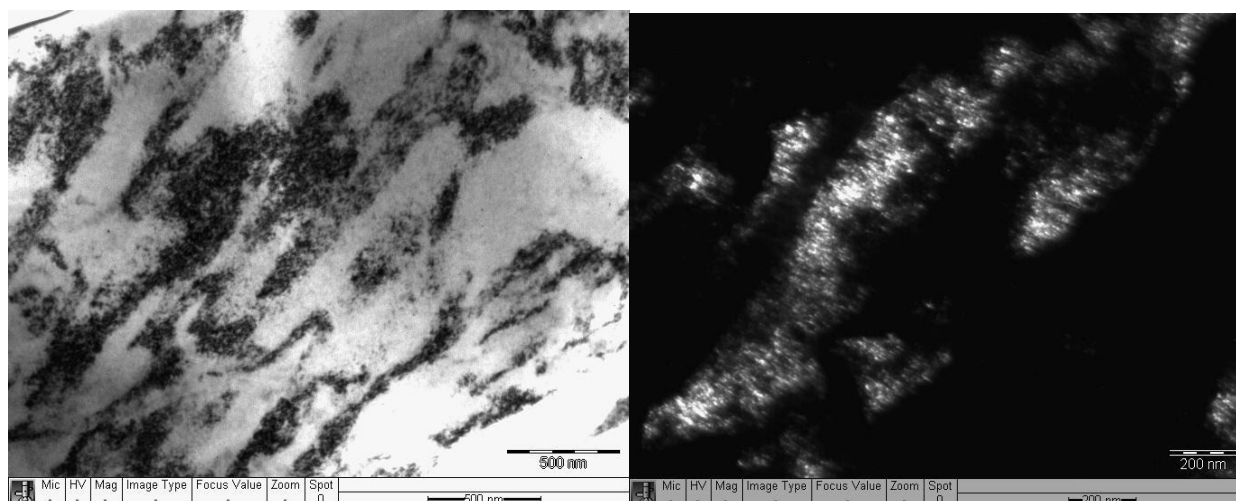


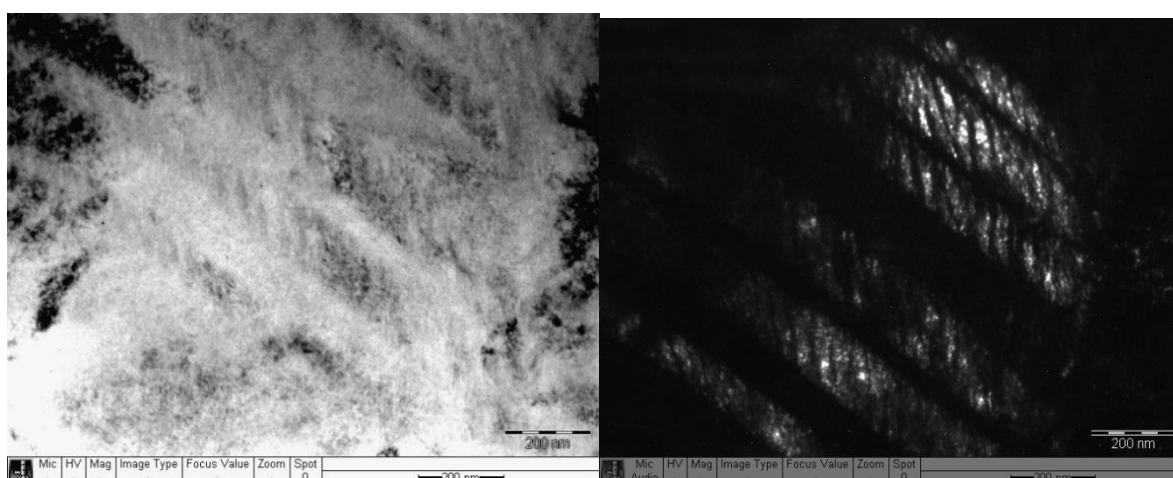
Рис. 2. Рентгенограммы сплава Ti18Zr15Nb после РКУП n=4 и n=7 с углом равным 120 °С

Согласно РСА, фазовый состав сплава в исходном состоянии и после РКУП - основная фаза – Beta (β), второстепенные – мартенситная фаза α'' (α''), возможно даже альфа α и омега ω , которые образуются во многих титановых сплавах бета типа при деформации или термообработки. Образование вторичных и не только фаз в целом - отрицательное явление, ведь повышается модуль юнга сплавов, а ω -фаза делает хрупким данный сплав, за счет включений в образце. Однако с другой стороны, включения данных фаз увеличивают прочность данных сплавов. Однако доля второстепенных фаз мала (менее 5 %).

Данные ПЭМ (рис. 3 и 4) указывают на измельчение зерна при РКУП, увеличение плотности дислокаций. Дислокации, накапливаются при РКУП, образуется ячеистая структура, которая впоследствии становится зернами с высокоугловыми границами, уменьшая тем самым размер зерна. В светлом поле после РКУП n=4 размер структурных элементов составляет около 500 нм (рис. 4), но согласно темнопольным изображениям, эти структурные элементы имеют субзеренную структуру. Размер субзерен, высвечивающихся в данных блоках, составляет порядка 50 нм. Вид картины микродифракции с азимутально размытыми рефлексами подтверждает формирование наносубзеренной структуры после РКУП.



a



б

Рис. 3. Структура сплава Ti-18Zr-15Nb после РКУП:
a – $n=4$; *б* – $n=7$

После РКУП $n=7$ так же формируется наносубзерная структура, несколько более измельченная, чем после РКУП $n=4$. В ТП так же высвечиваются отдельные блоки размером около 200 нм с наносубзеренной структурой. Размер субзерен, высвечивающихся в данных блоках, составляет порядка 50 нм. Вид картины микродифракции с азимутально размытыми рефлексами подтверждает формирование наносубзеренной структуры после РКУП.

В результате РКУП происходит рост микротвердости сплава Ti-18Zr-15Nb (табл 1) - происходит упрочнение за счет измельчение структуры. Чем больше количество проходов РКУП, тем сильнее упрочняется материал, т.к. дислокациям становится труднее двигаться за счет образования мелкозернистой структуры.

Результаты измерения микротвердости сплава Ti-18Zr-15Nb

<i>Hv</i>	Исходный	<i>PKУП n=4</i>	<i>PKУП n=7</i>
<i>Центр Hv</i>	267	282	295
<i>Край Hv</i>	257	275	285
<i>Общее среднее</i>	261	279	290

Работа выполнена за счет средств РНФ № 20-69-47029. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» УГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brunette D.M., Tengvall P., Textor M., Thomsen P. // Titanium in Medicine. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2001, 1019 p.
2. Sheremetyev V.A., Prokoshkin S.D., Dubinskiy S.M., Korotitskiy A.V., Filonov M.R., Petrzhik M.I., Brailovski V. INVESTIGATION OF THE STRUCTURE STABILITY AND SUPERELASTIC BEHAVIOR OF THERMOMECHANICALLY TREATED TI-NB-ZR AND TI-NB-TA SHAPE-MEMORY ALLOYS The Physics of Metals and Metallography. 2015. T. 116. № 4. С. 413-422.
3. Brailovski V., Prokoshkin S., Inaekyan K., Dubinskiy S., Gauthier M. Mechanical properties of thermomechanically processed metastable beta Ti-Nb-Zr alloys for biomedical applications // Mater. Sci. Forum. 2012. V. 706–709. P. 455–460.
4. Valiev R, Islamgaliev R and Alexandrov I. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation 2000 *Prog. Mat. Sci.* **45** 103-189.
5. Gunderov, D.V., A.V. Polyakov, I.P. Semenova, G.I. Raab, A.A. Churakova, E.I. Gimaltdinova, I. Sabirov, J. Segurado, V.D. Sitdikov, I.V. Alexandrov, N.A. Enikeev, and R.Z. Valiev, Evolution of microstructure, macrotexture and mechanical properties of commercially pure Ti during ECAP-conform processing and drawing. *Materials Science and Engineering A*, 2013. **562**: p. 128-136.
6. J.B. Nelson, D.P. Riley, An experimental investigation of extrapolation methods in the derivation of accurate unit-cell dimensions of crystals, *Proceedings of the Physical Society*, 1945, v. 57, pp. 160-177.
7. S.D. Prokoshkin, V. Brailovski, K. Inaekyan, A.V. Korotitskiy, A. Kreitsberg, Thermomechanical treatment in TiNi intermetallic-based shape memory alloys, *Materials Science Foundations*, 2015, v. 81-82, pp. 260-341.

УДК 669.1

В. В. ТИТОВ

molotovmelnik@gmail.com

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ АМОРФНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ Zr ДО И ПОСЛЕ ИПДК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНДЕНТИРОВАНИЯ ВСТЫК

Аннотация. Большой интерес представляет изменение механического поведения аморфных материалов в результате интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК). Ранее был предложен метод оценки особенностей деформационного поведения аморфных материалов при нагружении по схеме индентирования встык. В настоящей работе было выполнено индентирование встык образцов аморфного сплава Vit-105 до (в исходном состоянии) и после ИПДК: два образца аморфного материала с полированными боковыми и верхними кромками зажимались между собой в струбцине, и производилось вдавливание алмазного индентора в область соприкосновения этих образцов. В результате были получены картины полос сдвига на боковых поверхностях образцов аморфного сплава Vit-105, до и после воздействия ИПДК, выявлены различия в характере протекания деформации на этих образцах.

Ключевые слова: аморфные сплавы; ИПДК; индентирование встык, полосы сдвига, гомогенное течение.

Введение

Аморфные материалы вызывают повышенный интерес благодаря своей особой структуре и уникальным свойствам. Высокая прочность на растяжение, большой предел упругой деформации, высокая твердость, низкий коэффициент трения, хорошая устойчивость к коррозии и износу обеспечивают большой потенциал для различных применений аморфных сплавов [1, 2].

Деформация аморфных сплавов осуществляется главным образом за счет формирования и движения полос сдвига – узких, толщиной 10-100 нм, зон деформации. Такая особенность приводит к тому, что при растяжении аморфные сплавы демонстрируют крайне низкую пластичность – первая же образовавшаяся полоса сдвига становится концентратором напряжений, и деформация по ней происходит вплоть до разрушения образца [3,4]. При этом при осадке или изгибе, когда помимо растягивающих напряжений появляются еще и сжимаю-

щие, аморфные сплавы могут показывать некоторую пластичность [5]. В связи с этим были предприняты многочисленные исследования по повышению пластичности за счет структурных модификаций аморфных сплавов. Основным путем - предварительное формирование большой плотности полос сдвига в аморфной фазе или получение неоднородных нанокластерных аморфных структур. В результате общая пластичность повышается за счет разветвления и зарождения вторичных полос сдвига на неоднородностях при нагрузке. Однако обычные способы деформации не позволяют достигать больших деформаций в случае хрупких аморфных материалов. Перспективным способом введения высокой деформации и, следовательно, высокой плотности структурных дефектов в аморфное твердое тело является использование интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК). Исследованию влияния ИПДК на структуру и свойства аморфных сплавов, в частности ОМС, посвящены многочисленные публикации. В частности, было показано, что в аморфных сплавах одних составов ИПДК приводит к частичной нанокристаллизации [6]. В аморфных сплавах других составов нанокристаллизация при ИПДК не наблюдается, однако ИПДК приводит к изменению аморфной фазы, формированию неоднородностей в аморфной структуре.

Однако особенности деформирования аморфных материалов, подвергнутых ИПД, исследованы слабо. В работах [7,8] были описаны характерные особенности протекания деформации при индентировании образцов аморфных сплавов на основе Zr. В частности, в работе [8] исследуются образцы сплава Vit-106 ($Zr_{57}Nb_5Ni_{12,6}Cu_{15,4}Al_{10}$) исходного состояния, которых подвергали индентированию встык с различным набором нагрузок. Было показано, что деформация в упругопластической зоне, непосредственно под индентером, протекает преимущественно за счет формирования множественной полососдвиговой картины с наличием бестекстурной области. Отмечалось также, что деформационное поведение не зависит от формы индентора, но может зависеть пре-

имущественно от величины нагрузки при индентировании и от структурных особенностей исследуемого материала.

Материалы и методики исследования

В качестве материала для исследования были использованы образцы аморфного сплава Vit-105 ($Zr_{53}Cu_{18}Ni_{14}Al_{10}Ti_5$). Из пластины сплава исходного состояния было вырезано несколько дисков диаметром 10 мм. Эти диски подвергались кручению на 1 оборот под давлением 6 ГПа в камере Бриджмена с глубиной канавки рабочей части 0,5 мм и диаметром бойков 10 мм при комнатной температуре. После кручения из полученных ИПДК дисков вырезались заготовки в виде полосок под индентирование встык шириной 2 мм, длиной 10 мм, толщиной 0,75 мм. Такие же заготовки были вырезаны из пластины исходного состояния.

Поверхности заготовок полировались, а сами заготовки впоследствии укладывались в струбцину полированными сторонами друг к другу (рис. 1). Торцевые поверхности зажатых в струбцину образцов ошлифовывались до копланарности и также полировались. Индентирование встык между полированными торцами образцов производилось с нагрузкой 200 грамм на каждую точку.



Рис. 1. Вид образцов в струбцине под индентирование встык

В результате под отпечатком индентора образовывалась картина полос, которая исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM-6490LV.

Результаты

СЕМ анализ поверхности образцов аморфных сплавов после индентирования встык показал, что в исходном состоянии наблюдается множество концентрических полос сдвига, которые локализуются на некотором удалении от точки соприкосновения с индентором, а непосредственно под индентором формируется область, свободная от видимых полос (рис. 2). У образцов после ИПДК такая бестекстурная область имеет больший размер ($d = 11,2 \mu\text{m}$), а плотность полос сдвига при этом заметно меньше по сравнению с образцами исходного состояния (рис. 3). Это указывает на изменение механизма деформации.

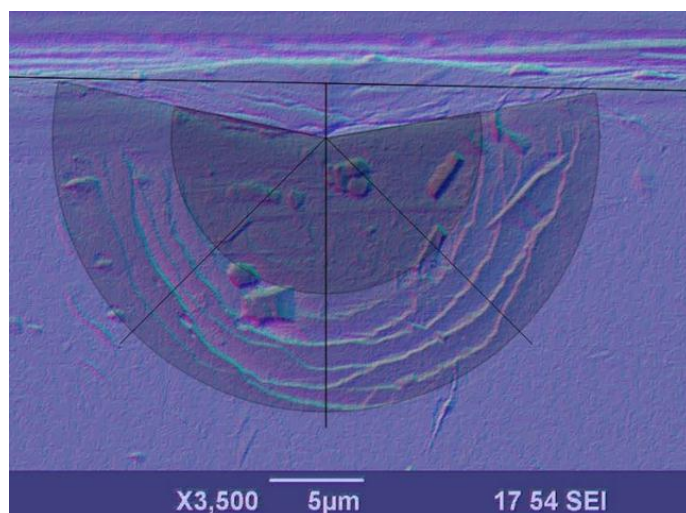


Рис. 2. Характер деформации близи отпечатка на образце исходного состояния

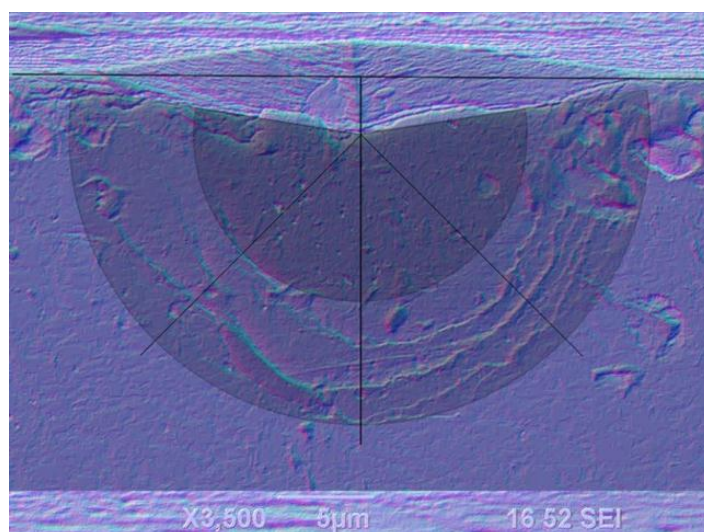


Рис. 3. Характер деформации близи отпечатка на образце после ИПДК

Предположительно, осуществление деформации, как между полосами, так и в бестекстурной области может происходить либо через формирование микрополос, либо за счет большего вклада гомогенного течения; и в ИПДК образцах этот вклад больше.

Заключение

Методом индентирования встык проведены исследования механизмов деформации аморфного сплава Vit-105 до и после ИПДК.

Показано, что после ИПДК бестекстурная зона в области упругопластической деформации больше, чем у исходного состояния. Количество видимых полос сдвига у образцов, подвергнутых ИПДК, наоборот, меньше, что свидетельствует об ином механизме деформации.

Исследования выполнены при поддержке проекта РФФИ-а 20-08-00497. Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Нанотех» УГАТУ (<http://nanotech.ugatu.ac.ru>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Люборский, Ф. Е. Аморфные металлические сплавы / Ф. Е. Люборский, Х. А. Дэвис, Х. Х. Либерман, и др.; под ред. Ф. Е. Люборского; пер. с англ. А. М. Глезера; под ред. А. Ф. Прокошина. – М.: Металлургия, 1987. – 583 с.
2. Судзуки, К. Аморфные металлы / Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К.; перевод с япон. под ред. Масумото Ц. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
3. C.A. Schuh, T.C. Hufnagel, U. Ramamurty. Mechanical behavior of amorphous alloys // Acta Materialia. 2007. Vol. 55. № 12. P. 4067–4109.
4. A.L. Greer, Y.Q. Cheng and E. Ma. Shear bands in metallic glasses // Mater. Sci. Eng. 2013. Vol. 74. № 4. P. 71–132.
5. R.D. Conner and W.L. Johnson, N.E. Paton, W.D. Nix. Shear bands and cracking of metallic glass plates in bending // Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 94, P. 904–911.
6. S.-H. Joo, D.-H. Pi, A.D.H. Setyawan, H. Kato et al. Work-Hardening Induced Tensile Ductility of Bulk Metallic Glasses via High-Pressure Torsion // Sci. Rep. 2015. Vol. 5. A. 9660.
7. C. Su, L. Anand. Plane strain indentation of a Zr-based metallic glass: Experiments and numerical simulation // Acta Mater. 2006. Vol. 54. P. 179-189.
8. Hongwen Zhang, Xiaoning Jing, Ghatu Subhash et al. Investigation of shear band evolution in amorphous alloys beneath a Vickers indentation // Acta Mater. 2005. Vol. 53. P. 3849-3859.

УДК 620.186.5

Э. И. УСМАНОВ, Л. Р. РЕЗЯПОВА

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

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПОВЫШЕННАЯ ПРОЧНОСТЬ ТИТАНА GRADE 4, ПОДВЕРГНУТОГО КОМБИНИРОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. В настоящей работе исследуется влияние различных комбинаций деформационно-термических обработок на механическое поведение технически чистого титана Grade 4. Деформационную обработку проводили методом интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК). Термическую отработку проводили посредством отжигов при различных температурных и временных режимах. По результатам исследования определено, что обработка технически чистого титана Grade 4 используя комбинированный режим: ИПДК + отжиг 700 °С + ИПДК + отжиг 350 °С позволяет достигнуть высоких механических свойств, таких как микротвердость 435 ± 14 НВ и предел прочности 1470 ± 17 МПа.

Ключевые слова: титан Grade 4; ИПДК; термическая обработка; микротвердость; механические испытания.

Введение

Как известно, технически чистый титан является одним из наиболее широко используемых материалов для изготовления медицинских имплантатов в связи с его высокой коррозионной стойкостью, биосовместимостью и отсутствием вредных легирующих элементов, способных спровоцировать воспалительные реакции и отторжение внедренного имплантата [1]. Однако, с активным развитием медицины повышаются и требования к механическим свойствам имплантатов, таким как прочность, в том числе и усталостная, а также пластичность. Биологически совместимый технически чистый титан для этого обладает недостаточно высоким комплексом механических свойств и уступает по данным показателям титановым сплавам, например таким как ВТ6 [2].

Одним из наиболее перспективных способов повышения прочностных свойств технически чистого титана с сохранением его биосовместимости является формирование в нем ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [3].

Наиболее эффективным методом получения УМЗ структуры с точки зрения достижения больших степеней деформации является метод интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК), который позволяет получать в образцах состояние с размером зерен порядка 100 нм [4].

Измельчение структуры титана Grade 4 до УМЗ состояния методами ИПД позволяет значительно повысить его прочность, величина которой достигает уровня высоколегированных титановых сплавов. Однако при этом, наблюдается значительное снижение пластичности материала [3]. В связи с этим, актуальной задачей остается поиск новых режимов деформационно-термических обработок, которые позволили бы сформировать в технически чистом титане высокопрочное структурное состояние с повышенной пластичностью.

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

Материал и методики исследования

В качестве материала для исследований использовался технически чистый титан Grade 4 в состоянии поставки. Химический состав, мас. %: Fe – 0,37; N < 0,05; C – 0,005-0,008; H – 0,0001-0,0006; O – 0,32, остальное – Ti.

Формирование УМЗ структуры в исследуемом материале осуществлялось методом ИПДК на установке СКРУДЖ-200. Деформация проводилась при комнатной температуре с удельным сжимающим давлением 6 ГПа и скоростью вращения бойков – 0,2 об/мин. На обоих этапах ИПДК количество оборотов равнялось 5.

Термическая обработка проводилась посредством отжига в печи “Nabertherm” при различных температурных и временных режимах с охлаждением на воздухе. Первый отжиг осуществлялся при температуре 700 °С в течении 30 мин., а второй при температуре 350 °С в течении 10 мин.

Измерение микротвердости образцов выполнялось на микротвердомере Duramin, путем вдавливания 136-градусной алмазной пирамидки Виккерса. На индентор прикладывалась нагрузка 100 г., время приложения составляло 10 секунд.

Механические свойства материала исследовались путем испытаний на одноосное растяжение малых образцов на установке Instron 5982 (ЦКП «Нанотех» УГАТУ) при комнатной температуре со скоростью растяжения 10^{-4} с^{-1} .

Результаты и обсуждение

Данные измерения микротвердости и результаты механических испытаний на одноосное растяжение титана Grade 4, в различных состояниях, представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

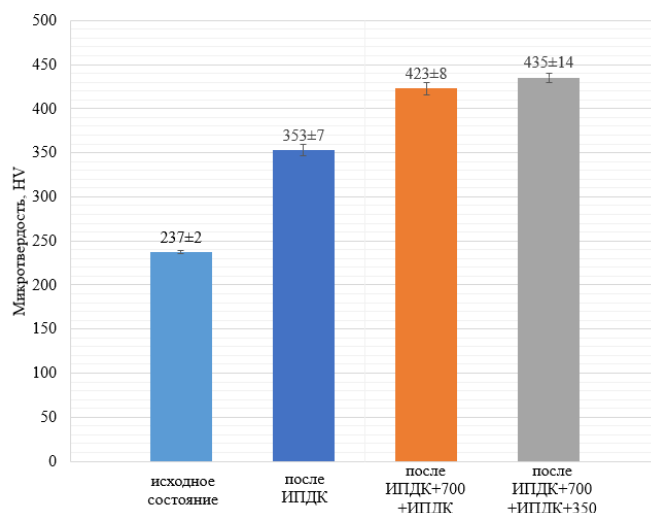


Рис. 1. Микротвердость титана Grade 4 в различных состояниях

В исходном состоянии наблюдаются закономерные для крупнозернистого титана Grade 4 механические свойства. Микротвердость находится в пределах $237 \pm 2 \text{ HV}$, предел текучести и прочности составляют 549 ± 12 и $689 \pm 10 \text{ МПа}$ соответственно. Относительное удлинение при этом достигает $26,5 \pm 3 \%$.

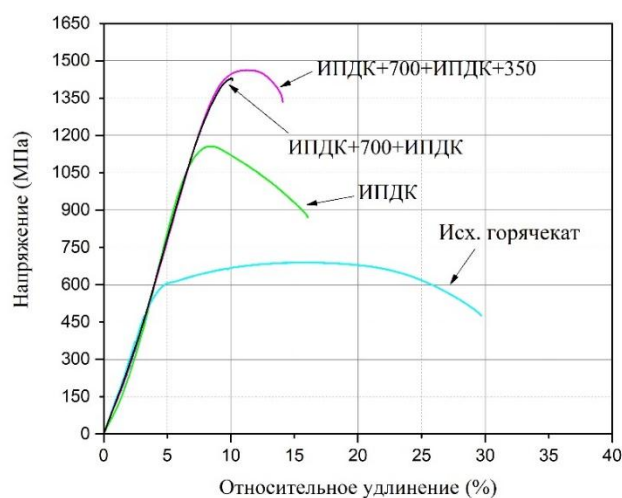


Рис. 2. Результаты механических испытаний титана Grade 4 в различных состояниях

После деформационной обработки методом ИПДК наблюдается значительное повышение микротвердости до значений 353 ± 7 HV, а также рост предела текучести и прочности до значений 1005 ± 11 и 1161 ± 12 МПа соответственно. При этом, происходит снижение пластичности, относительное удлинение составляет $11 \pm 1,5$ %. Следуя из различных источников литературы [3, 4], такое механического поведения характерно для титана Grade 4 при формировании в его объеме УМЗ структуры.

Применение комбинированной деформационно-термической обработки: ИПДК+700+ИПДК приводит к еще большему повышению прочностных свойств технически чистого титана. Микротвердость достигает значений в пределах 423 ± 8 HV, предел текучести и прочности – 1243 ± 20 и 1453 ± 17 МПа соответственно. Однако, при этом сильно падает пластичность, относительное удлинение составляет $1,5 \pm 0,5$ %. Вероятно, такое повышение прочностных свойств связано со вкладом наноразмерных частиц, которые выделяются при отжиге 700 °С, и описаны в работе [5].

Последующий отжиг при 350 °С позволяет добиться повышения пластичности, удлинение до разрушения достигает $5 \pm 0,7$ %. При этом также наблюдается небольшое повышение прочностных показателей: микротвердость находится в пределах 435 ± 14 HV, а предел текучести и прочности – 1280 ± 15 и 1470 ± 16 МПа соответственно. Причины такого одновременного повышения как пластичности, так и прочности еще недостаточно изучены и требуют дальнейших структурных исследований.

Заключение

В настоящей работе было исследовано влияния различных комбинаций деформационно-термических обработок на механическое поведение технически чистого титана Grade 4.

По результатам исследования было определено, что комбинированная деформационно-термическая обработка технически чистого титана Grade 4: ИПДК + отжиг 700 °С + ИПДК + отжиг 350 °С позволяет сформировать в нем

состояние с прочностными характеристиками близкими к рекордным, с сохранением при этом удовлетворительной пластичности. Однако для объяснения причин такого механического поведения необходимы дальнейшие структурные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valiev R. Z., Parfenov E. V., Raab G. I., Semenova I. P. Study and development of nanostructured metals for production of medical implants and equipment // *Materials. Technologies. Design* – 2019, v. 1, n. 1, p. 42–47
2. Dyakonov G. S., Mironov S., Semenova I.P., Valiev R.Z., Semiatin S.L. Annealing behavior of severely-deformed titanium Grade 4// *Materials Science and Engineering: A*. 2019. V. 742. P. 89–101.
3. Valiev R. Z., Estrin Y., Horita Z. et al. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later. *JOM* 68, 1216–1226 (2016).
4. Валиев Р. З., Лэнгдон Т. Д., Жилиев А. П. / Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения. – СПб.: Эко-Вектор, 2017. – 480 с.
5. Резяпова Л.Р., Валиев Р.Р., Ситдииков В.Д., Валиев Р.З. Исследование выделений вторых фаз в наноструктурном технически чистом титане // *Письма о материалах*. 2021. Т. 11, № 3. С. 345–350.

СЕКЦИЯ 2.3 МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

УДК 004

Р. Д. АХМАТГАЛИЕВА

ruzilyahmat@mail.ru

Науч. руковод. – канд. хим. наук, ст. преп. А. Т. НИГМАТУЛЛИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И ИНДУСТРИЯ 4.0 В МЕТРОЛОГИИ

Аннотация. В статье приведены понятия Цифровизации и Индустрии 4.0, также автор знакомит с этапами промышленной революции и принципами Индустрии 4.0. Рассматривается влияние Индустрии 4.0 на современное развитие метрологии. Выделены аспекты метрологии, оказывающие существенное влияние на развитие науки, промышленности, на приборостроение и машиностроение. Указаны основные задачи Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) в соответствии с принципами Индустрии 4.0.

Ключевые слова: Индустрия 4.0; цифровизация; промышленная революция; принципы индустрии; задачи росстандарта.

Будущее метрологии связано с развитием цифровых технологий, которые уже сейчас являются неотъемлемой частью повседневной жизни человека и внедряются в различные отрасли промышленности.

Любое развитие опирается на накопленный опыт в этой деятельности. Отечественная система метрологии, а также принципы ее государственного регулирования были сформированы Д.И. Менделеевым более 120 лет назад.

Сегодня будущее метрологии невозможно представить без интеллектуальных и сетевых технологий, это связано с тем, что метрология должна играть одну из важнейших ролей в управлении производством в индустрии будущего. Профессия метролога будет усложняться, средства измерений продолжают совершенствоваться и автоматизироваться. Простые средства измерений превращаются в сложнейшие измерительные системы и измерительные комплексы. Кроме этого, одно из важнейших направлений развития метрологии, как неотъемлемого условия создания высокотехнологичной продукции – измерения в области больших данных BigData.

Одним из самых перспективных и многообещающих достижений современного общества и закономерным итогом его развития можно считать так называемую концепцию четвертой промышленной революции, реализующуюся в производственной сфере как «Индустрия 4.0». Одним из необходимых элементов модели Индустрии 4.0 является цифровизация.

Цифровизация – это внедрение современных цифровых технологий в различные сферы жизни и производства, внедрение цифровых технологий в бизнес-модели компаний. Понятие «Индустрия 4.0» впервые было введено немецким федеральным правительством как стратегический план развития немецкой промышленности, основанный на объединении в едином информационном пространстве промышленного оборудования и информационных систем, что позволит им взаимодействовать между собой и с внешней средой без участия человека.

Цифры «4.0» означают, что это направление развития промышленности имеет настолько большой потенциал, что неминуемо приведет к четвертой индустриальной (промышленной) революции [1].

Началом первой промышленной революции стало изобретение парового двигателя во второй половине XVII века в Великобритании. Произошел переход от ручного труда к механическому и наблюдался резкий рост производительности.

Вторая промышленная революция связана с изобретением конвейера Генри Фордом и внедрением методов поточного производства. В этот период также родилось множество других изобретений, бессемеровский способ выплавки стали, электрическая энергия, широкое использование химикатов, телефон, телеграф и т.д.

Третья промышленная революция или «Цифровая революция» проходила в конце XX века (с 1970 г.) и связана с развитием электроники, цифровизации, компьютеризации, информационных систем, а также изобретением робота.

Четвертая промышленная революция берет начало в 2011 году, как Германская частно-государственная программа Industrie 4.0, в рамках которой германские компании при поддержке федерального правительства в виде грантов создают цифровые, умные производства, устройства и изделия которых взаимодействуют друг с другом, и обеспечивают персонализированный выпуск продукции.

В Германии были сформулированы некоторые принципы Индустрии 4.0:

1) Взаимодействие – объекты, машины и люди должны иметь возможность общаться через Интернет вещей и Интернет людей.

2) Прозрачность – моделирование и создание виртуальной копии реального мира, возможность отслеживать объекты, существующие в окружающей среде.

3) Возможность работы с цифровыми данными в реальном времени – возможность собирать данные в реальном времени, хранить или анализировать их и принимать решения в соответствии с новыми выводами.

4) Децентрализация – возможность для индивидуальных продуктов и решения проблем, автоматизация различных решений, полное человекозамещение.

Одной из важных составляющих Индустрии 4.0 является не продукт, а данные. Цифровизация производства связана с данными, большими массивами данных, которые нужно считывать, собирать, анализировать, систематизировать, обрабатывать, хранить, передавать, представлять в нужном виде и многое другое. Для этого необходимы соответствующие информационные системы, программное обеспечение, средства беспроводной передачи данных, облачные сервисы для обмена и хранения данных.

Совершенствование информационных технологий, которые определенным образом сказываются на промышленных технологиях, развитие современных сенсорных технологий, т. е. новых датчиков, которые будут использовать-

ся в рамках концепции Индустрии 4.0, также приведет к видоизменению сферы оказания метрологических услуг.

Развитие новой метрической системы единиц, переход к которой произошел в 2019 году – это грандиозный этап в развитии метрологии. Столь высокий уровень точности позволит решать многие проблемные задачи в области метрологии, которые сегодня находятся в стадии решения. Это связано с развитием нанобиоэлектроники, наноразмерных величин, спектрологии и наномagnetизма, терагерцовой метрологии и трехмерной нанометрологии

Находясь в состоянии применения киберфизических систем, четвертой технической революции, которая называется Индустрия 4.0, производители должны изменить модель производства, отказаться от жестких, конкретных схем решений, перейти к настраиваемым гиперпроизводствам, которые смогут работать точнее, быстрее, качественнее и с большим экономическим эффектом.

Определяющую роль будет играть промышленный интернет, позволяющий функционировать всем звеньям в реальном масштабе времени. Для метрологии реализуется сложнейшая техническая задача проведения огромного количества измерений в реальном времени для принятия решений на основании этих измерений о состоянии процесса производства, об изменении и уточнении параметров с учетом всех воздействующих факторов, а также качества продукции. При этом потребуются синхронизация всех производственных звеньев [3].

В мире получает развитие дистанционная телеметрия, совместная обработка данных, новые сенсорные технологии, моделирование процессов, использование численных алгоритмов, которые позволяют проводить измерения непосредственно в нужное время и в нужном месте. В этой ситуации важно понимать, каковы будут основные направления развития промышленной метрологии. С одной стороны – это точность, надежность, гибкость и комплексность. Но за этим стоит очень серьезная работа, связанная с цифровой интеграцией измерительных систем, где используются наноразмерные и сенсорные технологии.

Если говорить коротко – это работа в режиме онлайн, получение очень большого количества результатов измерений, их оцифровка и принятие решений на основании этих результатов. И, естественно, необходимо говорить о понижении уровня неопределенности, повышении точности измерений и принятии решений о том, какой уровень неопределенности допустим при управлении теми или иными аспектами технологического процесса. Нужно принимать решения с учетом неопределенности измерений, причем допуски должны снижаться на уровне неопределенности измерений.

Метрология для Индустрии 4.0 - это интеллектуальная метрология, смарт-метрология, которая должна оперировать большими базами данных и работать с алгоритмами нейронных сетей [4].

Уже несколько лет ученые государственных научных метрологических институтов Росстандарта обеспечивают цифровую трансформацию отечественной метрологии. Для этого решается пять основных задач [5]:

- цифровая трансформация метрологических услуг;
- разработка методов анализа «больших данных» (BigData) и машинного обучения для BigData – метрология в анализе больших данных;
- метрология коммуникационных систем нового поколения;
- метрология интеллектуальных средств измерений – самонастройка и самокалибровка;
- метрология для моделирования и виртуальных приборов.

Будущее метрологии невозможно представить без интеллектуальных и сетевых технологий, поскольку она будет играть одну из важнейших ролей в управлении производством на умных заводах будущего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов И.В. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития // Стратегия бизнеса. 2018. №6 (50). С. 57-63.
2. Индустрия 4.0 — Четвертая промышленная революция//Высокие технологии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vys-tech.ru/2018/04/11/industriya-4-0/>
3. ФБУ Ростовский ЦСМ. Метрология цифровой экономики. Взгляд в будущее// Метрология: взгляд в будущее. 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://unitess.ru/sites/default/files/advpoll/advpoll-field-image/fbu_rostovskiy_csm_esse.pdf

4. Матякубова П.М., Кулуев Р.Р. Индустрия 4.0 в современном направлении развития метрологии//Технические науки//Academy. № 9(20). 2020 с.16-19.
5. Росстандарт // Цифровая трансформация метрологии – пять задач Росстандарта. 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/presscenter/news?portal:componentId=88beae40-0e16-414c-b176-d0ab5de82e16&navigationalstate=JBPNS_rO0ABXczAAZhY3Rpb24AAAABAA5zaW5nbGVOZXdzVmllldwACaWQAAAABAAQ2NzM1AAdfX0VPR19f

УДК 006.91

Э. А. ВАЛЕЕВА

ellinaavaleeva@gmail.com

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПРОВЕДЕНИЕ КАЛИБРОВКИ АНЕМОМЕТРА ЦИФРОВОГО АТТ-1002

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы калибровки анемометра цифрового АТТ-1002. Приведено описание средства измерения, его основные технические и метрологические характеристики, средства и этапы калибровки, а также результаты оценки расширенной неопределенности данного средства измерения.

Ключевые слова: анемометр цифровой АТТ-1002; методика калибровки анемометра цифрового АТТ-1002; калибровка средств измерений; оценивание неопределенности результатов калибровки.

Калибровка средств - один из самых распространенных видов метрологических работ, как в мировой, так и в отечественной практике. На ряде крупных предприятий до 70 % всех применяемых средств измерений подвергается калибровке.

С целью подтверждения работоспособности и достоверности показаний анемометра цифрового АТТ-1002, в рамках данной работы, проводилась калибровка данного прибора.

Анемометр цифровой АТТ-1002 (рисунок 1) предназначен для измерения скорости и температуры воздушного потока. В приборе использован выносной датчик (крыльчатка), который снабжен подвеской на шарикоподшипниках с малым трением. Он обеспечивает точное и быстрое дистанционное измерение скорости воздушного потока, его температуры и мгновенную индикацию на ЖК-дисплее. Прибор может применяться для контроля состояния окружающей среды, скорости ветра или воздушного потока, проводки вентиляции помещений, вытяжных шкафов, нагревательных устройств, холодильных шкафов.

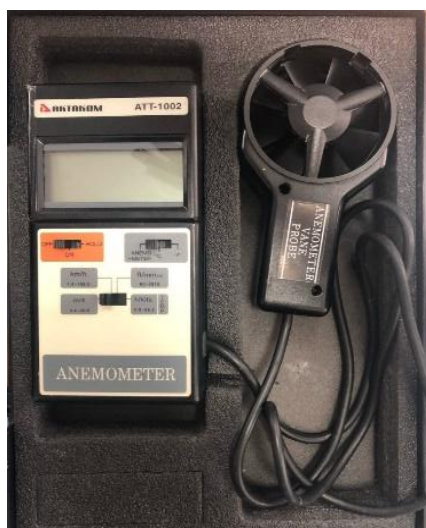


Рис. 1. Портативный анемометр цифровой АТТ-1002

Анемометр АТТ–1002 состоит из следующих элементов [4]:

1. Жидкокристаллический дисплей
2. Переключатель режимов измерений (ANEMOMETR/C/F)
3. Переключатель «OFF/ON/HOLD»
4. Переключатель единиц измерений (m/skm/hf/minknots/temp)
5. Выносной зонд
6. Рукоятка выносного зонда
7. Крышка отсека батареи питания

Основные технические и метрологические характеристики анемометра АТТ–1002 представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Технические характеристики анемометра АТТ-1002

Дисплей	ЖКИ
Единицы измерения скорости воздушного потока	м/с, км/ч, футы/мин, узлы
Единицы измерения температуры	С, F
Рабочие условия: температура	0+50 °С
Рабочие условия: относительная влажность	менее 80%
Питание	9 В батарея типа «Крона»
Потребляемый ток	около 9 мА постоянного тока
Размеры	168x80x35мм, зонд -диаметр 72 мм
Масса	325 г

Метрологические характеристики анемометра АТТ-1002.
Технические параметры (при 23 ± 5 °С)

Скорость воздушного потока			
Единицы измерения	Диапазон	Разрешение	Погрешность*
м/с	0,8...30,0	0,1	$\pm(0,04V+0,2)$ **

* Пределы абсолютной допускаемой погрешности

**V—измеренное значение скорости воздушного потока

Температура (индикаторный канал)	
Диапазон измерений	0...+60°С (32...140F)
Разрешение	0,1°С/0,1F

На основе технического описания и инструкции по эксплуатации был разработан проект методики калибровки анемометра цифрового АТТ-1002, который включает следующие разделы:

- 1) Область применения;
- 2) Нормативные ссылки;
- 3) Технические требования;
- 4) Требования к квалификации работников, выполняющих калибровку средств измерений;
- 5) Требования по обеспечению безопасности;
- 6) Условия и подготовка к калибровке;
- 7) Процедура калибровки;
- 8) Обработка результатов измерений;
- 9) Оформление результатов калибровки.

Методика калибровки распространяется на анемометры АТТ-1002 фирмы «Lutron Electronic Enterprise Co., Ltd.», Тайвань, предназначенные для измерения скорости воздушного потока и устанавливает методы их первичной и периодической калибровок.

Рекомендуемый интервал между калибровками 1 год.

По требованию заказчика рассматриваемый анемометр может быть откалиброван в определенных калибровочных точках. Для этого используют следующие средства:

- Эталонная аэродинамическая установка АУ-2 (рисунок 2);
- Термометр лабораторный электронный ЛТ-300 (рисунок 3).

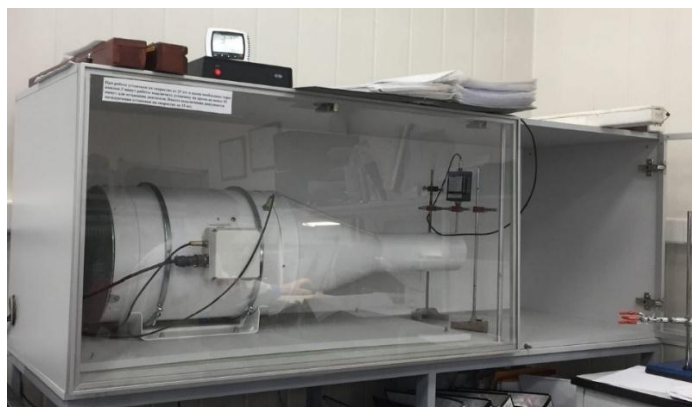


Рис. 2. Эталонная аэродинамическая установка АУ-2



Рис. 3. Термометр лабораторный электронный ЛТ-300

Проведение калибровки анемометра АТТ-1002 включает в себя следующие этапы [1]:

1. Внешний осмотр;
2. Опробование;
3. Определение метрологических характеристик;
4. Оформление результатов калибровки.

Лаборатория, проводящая калибровку, должна соответствовать и требованиям к технической компетентности, и требованиям к системе менеджмента,

которые являются необходимыми для обеспечения получения технически обоснованных результатов испытаний и калибровки.

Точность калибровки оценивается расширенной неопределенностью.

Неопределенность измерения – неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации [3].

Расширенные неопределенности для результатов калибровки рассчитываются в следующем порядке [2]:

1) Определяют стандартную неопределенность по типу А. Для этого вычисляют среднее арифметическое полученных результатов;

2) Вычисляют стандартную неопределенность по типу В. Одной из составляющих данной неопределенности является неопределенность, обусловленная погрешностью эталона;

3) Определяют коэффициент охвата (k) в зависимости от доверительной вероятности;

4) Рассчитывают расширенную неопределенность;

5) Представляют результаты калибровки.

Полный результат измерения включает в себя оценку выходной величины и приписанное ей значение расширенной неопределенности с указанием уровня доверия: $Y = \bar{x} \pm U$.

В процессе калибровки анемометра АТТ-1002 была оценена расширенная неопределенность для измерений скорости воздушного потока, проведенных с помощью эталонной аэродинамической установки АУ-2 для интервала от 0,5 до 30 м/с и номинальных значений 2,00 м/с; 10,00 м/с и 20,00 м/с. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Значения расширенной неопределенности

	Заданные значения скорости воздушного потока, м/с		
	2,00	10,00	20,00
\bar{x}	1,95	9,94	19,90
u_A	0,037	0,04	0,05
u_B	0,04	0,10	0,18
u_C	0,05	0,11	0,19
U	0,10	0,22	0,38
Y	$1,95 \pm 0,10$	$9,94 \pm 0,22$	$19,90 \pm 0,38$

Таким образом, оценка расширенной неопределенности для измерений скорости воздушного потока показывает, что разброс значений показаний анемометра цифрового АТТ-1002 является не существенным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика калибровки анемометра цифрового АТТ-1002.– 8 с.
2. РМГ 115-2019 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенности. – Введ. 2020 – 09 – 01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 36 с.
3. Руководство СМ. Выражение и оценивание неопределенности результатов измерения РИ 03-07.13. – Астана 2017. – 39 с.
4. Техническое описание и инструкция по эксплуатации анемометра цифрового АТТ-1002. «АКТАКОМ». – 27 с.

Э. И. ГАЙФУЛЛИНА

amorieschan@gmail.com

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

ЦИФРОВИЗАЦИЯ В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИИ

Аннотация. В статье были рассмотрены вопросы перехода от бумажного документооборота к электронному, возможности средств измерений подключаться к телекоммуникационным сетям для передачи информации, а также пять задач Росстандарта в области цифровизации.

Ключевые слова: Четвертая промышленная революция; средства измерений; цифровизация; Росстандарт; государственные информационные системы; ФГИС «АРШИН».

В условиях Четвертой промышленной революции сфера измерительной техники и метрологии, как одна из структурных составляющих всей современной экономики, вовлечена в цифровизацию. По мнению экспертов институтов Росстандарта, ключевым является переход от бумажных документов к электронным – фиксация результатов поверок и калибровок в государственных информационных системах (ГИС). Кроме того, потребуется систематизация в виде электронных информационных систем, так как метрологическая инфраструктура обеспечения единства измерений будет порождать большие информационные потоки. В частности, в ГИС Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии уже входят следующие базы данных:

- государственные первичные эталоны РФ;
- эталоны единиц величин;
- утвержденные типы стандартных образцов;
- утвержденные типы средств измерений;
- аттестованные методики измерений;
- сведения о результатах поверки средств измерений.

Само наличие такой информации в электронном виде потенциально позволяет существенно автоматизировать многие процессы.

Главная тенденция цифровизации эксплуатации и метрологической аттестации средств измерений (СИ) – оснащение всех СИ (подлежащих утвержде-

нию типа и поверке) средствами подключения, в том числе беспроводными, к телекоммуникационным сетям для передачи информации в единую информационную базу. Было подтверждено, что все технические решения для этого существуют, необходимо создание соответствующей информационной системы, решение вопросов по стандартизации и внесение соответствующих изменений в законодательство. Рассмотрение проблемы иерархической структуры «интернета СИ», как основы цифровизации, показало возможность выделения трех уровней:

1) аппаратный (физический) уровень подключения к интернету, который может быть реализован на основе существующих сетей Ethernet, WiFi, а также сетей мобильной связи nG;

2) сетевой протокол Интернета TCP/IP, полностью удовлетворяющий поставленным задачам, т.к. применяется повсеместно, обеспечивающий однозначную идентификацию устройства путем присвоения уникального IP адреса и гарантирующий надежную передачу информации;

3) прикладной (пользовательский) уровень сети, требующий разработки.

Решение этих вопросов требует реализации задач по разработке и утверждению единого формата представления данных о средствах измерения; разработке и утверждению вида представления измерительной информации; созданию программной платформы для обмена данными, а также сбора и обработки информации от подключенных к интернету СИ. В настоящее время уже ведутся разработки стандартов для создания сетей измерительных преобразователей, в частности, для «умных сетей».

Специалисты ВНИИМ им. Д.И. Менделеева сообщили, что существующие наработки в области создания интеллектуальных датчиков позволили разработать и утвердить два стандарта, в которых дано основополагающее определение интеллектуального датчика, обладающего следующими возможностями:

1) самообучение – способность к автоматической оптимизации параметров и алгоритмов работы (измерения);

2) самовосстановление при возникновении единичного дефекта – автоматическая процедура устранения метрологических последствий возникновения отказа, то есть процедура обеспечения отказоустойчивости, при которой сохраняются метрологические характеристики в допускаемых пределах при возникновении единичного дефекта оборудования;

3) автоматическая коррекция погрешности.

Кроме того, считается, что наиболее перспективен метрологический диагностический самоконтроль, который должен строиться на основе результатов специального метрологического анализа источников погрешности, характерных для процесса эксплуатации: например, "старение" материалов и дефекты, вызванные нарушениями технологии изготовления СИ, которые проявляются лишь с течением времени [1].

Уже несколько лет ученые государственных научных метрологических институтов Росстандарта обеспечивают цифровую трансформацию отечественной метрологии. Для этого решается пять основных задач:

– цифровая трансформация метрологических услуг, в том числе, создание инфраструктуры для цифровых сертификатов калибровки, создание «метрологического облака»;

– метрология в анализе больших данных – разработка методов их анализа и машинного обучения для BigData;

– метрология коммуникационных систем нового поколения, в том числе для сетей 5G;

– метрология интеллектуальных средств измерений – самонастройка и самокалибровка;

– метрология для моделирования и виртуальных приборов.

Отдельным блоком в этой работе является международное сотрудничество: для развития цифровой экономики должны быть не только сняты метрологические барьеры в торговле, но и сформировано единое метрологическое пространство.

Также в будущем планируется доработка ФГИС «АРШИН» для синхронизации с информационными системами других ведомств и создания метрологического облака. В частности, с ГИС ЖКХ Минстроя России, ФГИС Росаккредитации, Порталом Госуслуг, а также создать отдельное мобильное приложение. Также планируется модернизация модуля «Типы СИ» в III квартале 2021 года [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сясько В.А. Метрология, стандартизация, цифровизация. Вызовы четвертой промышленной революции // Территория NDT, 2019. — 17-19 с.
2. Росстандарт. Цифровая трансформация метрологии – пять задач Росстандарта // [электронный ресурс] — URL: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1//6735> (Дата обращения: 25.05.2021).

Д. Е. ДАНИЛОВ

deniska_danilov_1515@mail.ru

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

АТТЕСТАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены основные вопросы аттестации испытательного оборудования, приведены нормативные базы, проанализированы особенности первичной, периодической и повторной аттестации.

Ключевые слова: аттестация; испытательное оборудование; аттестация испытательного оборудования; виды аттестации.

Аттестация испытательного оборудования (ИО) проводится с целью определения нормированных точностных характеристик оборудования, их соответствия требованиям нормативной документации и установления пригодности оборудования к эксплуатации.

К нормируемым точностным характеристикам ИО относятся установленные нормативными документами (НД) характеристик, которые дают возможность оборудованию воспроизвести и поддержать режимы и условия испытаний с требуемой точностью, в заданных диапазонах и в течении установленного срока.

Аттестации ИО позволяет подтвердить или опровергнуть возможность воспроизведения условий испытаний, учитывая допустимые отклонения. Если такая возможность подтверждается, делают вывод о том, что оборудование пригодно для проведения испытаний, если же возможность опровергается, говорят о соответствующей непригодности аттестуемого испытательного оборудования.

Качество испытаний продукции зависит от состояния и характеристик ИО. Форма подтверждения его соответствия регламентирована ГОСТ Р 8.568-2017 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Аттестация испытательного оборудования. Основные положения». Данный стандарт устанавливает:

- основные цели и задачи аттестации ИО;
- виды аттестации ИО;
- порядок проведения аттестации ИО;
- требования к оформлению результатов аттестации;
- порядок разработки программы аттестации и методики аттестации испытательного оборудования.

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

Выделяют следующие виды аттестации:

- 1) первичную;
- 2) периодическую;
- 3) повторную.

Первичная аттестация испытательного оборудования заключается в экспертизе, эксплуатационной и проектной (при ее наличии) документации, на основании которой выполнена установка испытательного оборудования, а также в экспериментальном определении его технических характеристик и подтверждении пригодности его использования.

Для проведения первичной аттестации заказчиком назначается комиссия. В состав комиссии, как правило, включаются представители:

- заказчика, в том числе лица, ответственные за обеспечение единства измерений и проведение испытаний;
- исполнителя и, если это необходимо, привлекаются для выполнения услуги (работ) представители других юридических лиц и индивидуальных предпринимателей;

– предприятия-изготовителя ИО, если это необходимо или если первичная аттестация оборудования проводится на данном предприятии, и (или) если предприятие-изготовитель является заказчиком

Периодическую аттестацию испытательного оборудования в процессе его эксплуатации проводят в объеме, необходимом для подтверждения соответствия характеристик испытательного оборудования требованиям нормативных документов на методики испытаний и эксплуатационных документов на оборудование и пригодности его к дальнейшему использованию.

В состав комиссии, как правило, включаются представители:

– заказчика, в том числе лица, ответственные за обеспечение единства измерений и проведение испытаний;

– исполнителя и, если это необходимо, привлекаемых для выполнения услуги (работ) других юридических лиц и (или) индивидуальных предпринимателей.

Результаты периодической аттестации испытательного оборудования оформляют протоколом. Протокол с результатами периодической аттестации подписывают лица, ее проводившие. Утверждает протокол руководитель предприятия.

Повторную аттестацию испытательного оборудования после ремонта, модернизации, внесения изменений, при получении отрицательных результатов первичной аттестации, по указанию представителей государственных надзорных органов осуществляют в порядке, установленном для первичной аттестации испытательного оборудования.

Повторную аттестацию ИО осуществляют в порядке, установленном для первичной аттестации ИО, в следующих случаях:

– после ремонта или модернизации;

– после внесения изменений в метрологически значимую часть программного обеспечения;

– при получении отрицательных результатов первичной аттестации (в этом случае допускается не проводить повторную аттестацию по пунктам программы и методики аттестации с положительными результатами);

– при ухудшении качества выпускаемой продукции, вызванном несоответствием характеристик ИО требуемым;

– по указанию представителей государственных надзорных органов.

Таким образом, аттестации испытательного оборудования является важной процедурой, направленной на обеспечение качества и безопасности выпускаемой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 8.568-2017 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Аттестация испытательного оборудования. Основные положения».
2. Федеральное государственное унитарное предприятие (ФГУП) «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации оборонной продукции и технологий» (ВНИИМС) Аттестация ИО, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции. Организация и порядок проведения 2013. С. 7–12.
3. Дедков Д. Г. Аттестация испытательного оборудования: несколько практических рекомендаций // Главный метролог · №1 (112). 2020. С.6-10.

УДК 005.6

М. Ю. ЖЕРЕБЯТЬЕВА

zherebyateva.m98@mail.ru

Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук, проф. А. К. ГАЛИМОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ И КОНСТРУКЦИОННЫМ КАЧЕСТВОМ

Аннотация. Предметом настоящей работы является управление качеством перспективных технологий изготовления изделий авиационного машиностроения в состоянии сверхпластичности. Целью является обоснование принципов управления технологическим и конструкционным качеством полых конструкций, изготовленных методом совмещенной формовки и сварки давлением в состоянии сверхпластичности. Областью применения описанного подхода может быть автоматизация системы принятия решений в сложных технологических процессах, в которых требуется не только построение управляющих связей между владельцами бизнес-процессов, но и корректно формализованные знания об объекте воздействия и используемых при этом средств, включая библиотеки этапов технологических процессов.

Ключевые слова: качество; управление; технология; конструкция; операционные продукции.

Наиболее распространенная форма организации работы предприятий, в том числе в машиностроении, основывается на концепции управления по отклонениям. Управление по отклонениям предназначено для управления событиями, обеспечивающими эффективность производства и качество выпускаемой продукции. Это систематическая деятельность, направленная на выявление и оценке значимости сигналов об отклонениях от заданной интегральной величины (связанной с комплексным показателем), отражающей влияние системы единичных параметров качества. Управление сводится к минимизации суммарного отклонения вводимых в рассмотрение координат вектора качества от оптимальных значений [1].

Но сами критерии и значения параметров качества могут меняться в процессе производства. Это в полной мере относится к технологиям совмещенной формовки и сварки давлением в состоянии сверхпластичности (СП). Такие технологии уже находят применение в области авиационного машиностроения [2]. При этом необходимо учитывать, что, во-первых, свойства, определяющие технологическое и конструкционное качество металлов и сплавов существенно

различны. Во-вторых, эти свойства претерпевают существенные изменения в процессе изготовления изделий.

Действительно, материалы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, используемые в технологиях на основе использования явления СП обладают такими привлекательными технологическими свойствами, как повышенная формуемость и твердофазная свариваемость при пониженных температурах. Известно [2], что метод сверхпластической формовки (СПФ), совмещенный со сваркой давлением (СПФ/СД) позволяет изготавливать легкие и, одновременно, жесткие полые конструкции сложной конфигурации из титанового сплава типа ВТ6, который является близким аналогом широко известного зарубежного сплава Ti-6Al-4V. Одним из примеров такой легкой и жесткой конструкции является полая лопатка вентилятора для гражданских авиадвигателей нового поколения (рис.1) [3].



Рис. 1. Полая лопатка из титанового сплава ВТ6 изготовленная методом СПФ/СД [2]

При использовании традиционной СП, проявляющейся в мелкозернистых титановых сплавах в интервале температур 900 – 950 °С [4] сохраняется серьезная экономическая проблема связанная с высокой себестоимостью изготовления указанной продукции из-за высокой трудоемкости, усугубляемая низкой стойкостью дорогостоящей штамповой оснастки при указанных температурах [3,5]. Проблема низкой рентабельности технологического процесса изготовле-

ния полых титановых конструкций методом СПФ на основе традиционной СП при температурах в интервале $T=900\text{—}950\text{ }^{\circ}\text{C}$ универсальна [5], и она в силу экономического фактора сдерживает изготовление значительной номенклатуры полых изделий авиационного назначения [5-7]. По мнению отечественных и зарубежных специалистов [2-3,5,8], одним из кардинальных путей при создании экономически привлекательных технологий СПФ может быть снижение температуры СП обрабатываемого сплава. Так, согласно авторам [9] снижение температуры СП до $T=760\text{ }^{\circ}\text{C}$ — может сделать технологический процесс СПФ титановых сплавов экономически высокоэффективным. При использовании УМЗ титановых полуфабрикатов становится возможной реализация в технологии формообразования эффекта «низкотемпературной» СП с понижением температуры обработки на $100 - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже традиционной. Но, с другой стороны, УМЗ структура является нестабильной при повышенных температурах и может понижать, например, трещиностойкость в готовом изделии, что не всегда совместимо с высоким конструкционным качеством [6].

После проведения СПФ в изготовленных полых конструкциях образуется деформационный рельеф поверхности (ДРП) (рис. 2), приводящий к повышенной шероховатости как внешних, так и внутренних поверхностей [9,10].

Появление ДРП связывают с развитием зернограничного проскальзывания — основного механизма сверхпластической деформации. ДРП может понижать уровень усталостной прочности при эксплуатации изделий в условиях знакопеременных нагрузок [9] и приводить к отклонениям от заданных геометрических параметров, в том числе во внутренних элементах полых конструкций, не поддающихся визуальному контролю. Это требует дополнительных технологических мер и методов контроля, которые позволяют исключить понижение качества применительно к готовой продукции ответственного назначения.

В описанном выше технологическом процессе изготовления полых лопатки из титанового сплава ВТ6 методом СПФ/СД можно выделить следующие показатели две группы качества технологическую и конструкционную.

В этой связи, затруднительно задать постоянный комплексный показатель качества, и даже постоянный набор параметров, определяющих качество изготавливаемого изделия на всех этапах производственного цикла и последующей эксплуатации. А по значению некоего комплексного показателя невозможно однозначно определить, какие из измеряемых параметров вызвали данное отклонение. Рассматриваемое в настоящей работе применение метода операционных продукций [6] позволяет формализовать и интегрировать в единую компьютерную модель производственного процесса библиотеки технологических операций, включая контрольно-измерительные, и соответствующие им модели физических явлений. Это позволяет на основе статистики собранных данных строить обоснованные зависимости между технологическими и конструктивными показателями качества, и, оперативно анализируя выявляемые зависимости, формировать необходимые управляющие воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление по отклонениям // Статьи iTeam @MIUI. URL: <http://blog.iteam.ru/upravlenie-ro-otkloneniya/>
2. Петров Е. Н. и др. Ячеистые конструкции. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2008. 176 с.
3. Валиахметов О. Р. и др. Использование наноструктурных материалов и нанотехнологий для создания полых конструкций // Российские нанотехнологии. 2010. Т.5. №1-2. С. 102-111.
4. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
5. Лутфуллин Р.Я. др. Низкотемпературная сверхпластичность и изготовление полых конструкций из титанового сплава ВТ6 // Письма о материалах. 2015. Т. 5. №2. С. 185 – 188.
6. Тюрганов А.Г., Сафин Э.В., Лутфуллин Р.Я., Галимов А. К. Операционные продукции в системе менеджмента качества предприятий авиационного машиностроения // Качество, инновации, образование. 2012. №7. С. 14-19.
7. Лутфуллин Р.Я., Галимов А. К., Тюрганов А. Г. Моделирование процесса сварки давлением кромок пакета листовых заготовок // Автоматизация и современные технологии. 2007. №6. С. 3-7.
8. Comley P.N. Lowering the heat – the development of reduced SPF temperature titanium alloys for aircraft production // Materials Science Forum. 2004. Vol. 447-448. P. 233-238.
9. Сисанбаев А.В., Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я. Мухаметрахимов М.Х. 3D-контроль рельефа поверхности в полых гофрированных конструкциях из титановых сплавов после сверхпластической формовки // Химическая физика и мезоскопия. 2015. № 1. С. 117-120.
10. Kaibyshev O.A., Safiullin R.V., Lutfullin R.Y. and Astanin V.V. On the Model of Solid State Joint Formation under Superplastic Forming Conditions // J. Mater. Eng. Perform. 1999. Vol. 8. No.2. P. 205-210.
11. Семантические преобразования классических моделей структурного анализа/ Тюрганов А.Г.// Труды Всероссийской научно-технической конференции "Интеллектуальное управление - 99" - Уфа, УГАТУ, 1999.- С. 134-135.

УДК 006.91

А. А. ЗАЙЦЕВА

tatyana-zayceva1@outlook.com

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

АККРЕДИТАЦИЯ ЛАБОРАТОРИИ НА ПРАВО ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы аккредитации лаборатории на право поверки средств измерений. Приведены критерии аккредитации, а также документы, на основе которых проводится данная процедура.

Ключевые слова: аккредитация; поверка средств измерений; лаборатория по поверке средств измерений; критерии аккредитации.

Аккредитация лаборатории на право поверки средств измерений – это официальное подтверждение национальным органом по аккредитации соответствия лаборатории критериям аккредитации, признание его компетентности осуществлять деятельность в определенной области. Аккредитация является важным механизмом для обеспечения общественного доверия к надежности любых исследований, связанных с защитой окружающей среды, безопасностью и здоровьем людей. Данная процедура, проводимая применительно к поверочной лаборатории, имеет своей целью обеспечение единства измерений и общее признание результатов.

Основные вопросы проведения аккредитации изложены в следующих нормативно-правовых документах:

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

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

3) Приказ Минэкономразвития России от 26.10.2020 № 707 (ред. от 30.12.2020) "Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов,

подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации". В данном документе приведены критерии аккредитации, а также перечень документов, подтверждающих соответствия лаборатории критериям аккредитации.

Согласно ФЗ №412 участниками национальной системы аккредитации являются:

- 1) федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области аккредитации;
- 2) национальный орган по аккредитации;
- 3) общественный совет по аккредитации;
- 4) комиссия по апелляциям;
- 5) эксперты по аккредитации, технические эксперты;
- 6) аккредитованные лица;
- 7) экспертные организации.

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

Для прохождения аккредитации заявителям необходимо соответствовать критериям аккредитации, изложенным в Приказ Минэкономразвития России от 26.10.2020 № 707. В числе основных требований к аккредитации поверочных лабораторий можно назвать следующие: наличие системы менеджмента качества обеспечения выполнения поверочных работ; наличие соответствующего

объему предполагаемых работ и номенклатуре проверяемых средств измерений числа сотрудников, аттестованных в качестве поверителей; наличие необходимых рабочих эталонов и вспомогательного оборудования; наличие помещений, обеспечивающий необходимые условия для поверки средств измерений.

Проведение аккредитации лабораторий на право поверки средств измерений имеет несколько этапов:

- Подготовка и представление полного пакета документов на аккредитацию в ФСА;
- Проверка представленных документов в ФСА;
- Проведение оценки лаборатории поверки средств измерений;
- Создание заключения;
- Предоставление аттестата в соответствии с требованиями ФСА;
- Периодическая проверка лаборатории.

Процедура аккредитации включает два основных вида работ: экспертизу документов и сведений, представленных метрологической службой и выездную оценку экспертной группой реального состояния аккредитуемой лаборатории. По завершении комплекса работ по аккредитации формируется документ, носящий название «Область аккредитации», содержащий перечень типов (групп) средств измерений и метрологические требования (диапазон измерений; погрешность и (или) неопределенность (класс точности, разряд)), поверку которых имеет возможность осуществлять аккредитуемая метрологическая служба. Документом, официально подтверждающим компетентность и полномочия аккредитованной метрологической службы осуществлять поверку средств измерений, является выписка из реестра аккредитованных лиц (аттестат аккредитации) – документ, формируемый в автоматическом режиме средствами федеральной государственной информационной системы в области аккредитации и удостоверяющий аккредитацию в определенной области аккредитации на момент его формирования. Информация об аккредитованной лаборатории заносится в электронный реестр ФСА.

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

Таким образом, лаборатории, прошедшие аккредитацию на право поверки средств измерений, подтверждают свое соответствие установленным критериям и, соответственно, свою компетентность в области обеспечения единства измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 № 102-ФЗ.
2. Федеральный закон "Об аккредитации в национальной системе аккредитации" от 28.12.2013 № 412-ФЗ.
3. Приказ Минэкономразвития России от 26.10.2020 № 707 (ред. от 30.12.2020) "Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации".

Е. А. МАКЛАКОВА

maklakatya2404@gmail.com

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

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПРОВЕДЕНИЕ КАЛИБРОВКИ КОМПЛЕКТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ TESTO 440

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы калибровки комплектов измерительных Testo 440. Приведено описание средства измерения, его основные технические и метрологические характеристики, этапы калибровки, а также результаты оценки расширенной неопределенности данного средства измерения.

Ключевые слова: методика калибровки; оценка неопределенности; комплекты измерительные Testo 440; государственная система обеспечения единства измерений.

Комплекты измерительные Testo 440 предназначены для измерений климатических параметров: температуры, относительной влажности, скорости потока воздуха, абсолютного и дифференциального давления, уровня освещенности, концентрации монооксида (СО) диоксида (СО₂) углерода в атмосфере. Рассматриваемой средство измерения представляет собой наборы (рисунок 1), состоящие из:

- аналоговых измерительных зондов, состоящих из одного или нескольких первичных преобразователей, которые преобразовывают измеряемые параметры в эквивалентные электрические сигналы;
- цифровых измерительных зондов, состоящих из одного или нескольких первичных преобразователей и электронного блока;
- цифровых измерительных модулей, состоящих из одного или нескольких первичных преобразователей и электронного блока;
- коммутационных рукояток, предназначенных для подключения к ним цифровых измерительных модулей с целью обеспечения их электропитанием, а также передачи от них цифрового сигнала на средство индикации.

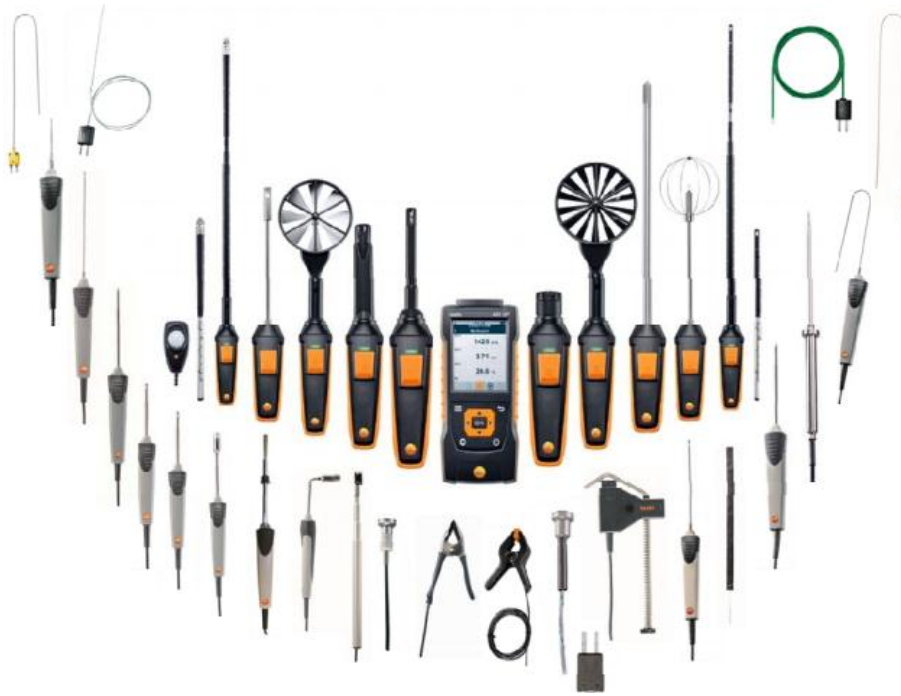


Рис. 1. Комплекты измерительные Testo 440

Комплекты измерительные Testo 440 применяется для измерений объемного расхода в воздуховодах на вентиляционных решетках, измерений с воронкой, измерений степени турбулентности, определения мощности нагрева (охлаждения), выявления плесени.

Основные технические и метрологические характеристики комплектов измерительных Testo 440 представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Основные технические характеристики

<i>Наименование характеристики</i>	<i>Значение</i>
Условия эксплуатации:	
– температура окружающей среды, °C	
аналоговые зонды	от –20 до +70
измерительные приборы Testo 440 и Testo 440 dP	от –20 до +50
цифровой измерительный зонд 0635 1032	от –20 до +70
цифровой измерительный зонд 0635 9532	от –10 до +70
цифровой измерительный зонд 0636 9775	от –5 до +50
цифровой измерительный зонд 0628 0152	от 0 до +50
Температура транспортировки и хранения, °C	
аналоговые зонды	от –20 до +70
измерительные приборы Testo 440 и Testo 440 dP	от –20 до +50
цифровой измерительный зонд 0635 9532	от –10 до +70
цифровой измерительный зонд 0635 9775	от –20 до +60
цифровой измерительный модуль 0632 1270	от +10 до +30
цифровой измерительный модуль 0632 1550	от 0 до +50

Основные метрологические характеристики

Артикул	Измеряемая величина (тип чувствительного элемента)	Диапазон измерений	Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений	
			в диапазоне измерений	погрешность
0635 1032	Скорость потока воздуха, м/с	от 0,3 до 30	от 0,3 до 20 включ. св. 20 до 30	$\pm(0,04+0,04 \cdot W_{\text{ИЗМ}})$ $\pm(0,5+0,05 \cdot W_{\text{ИЗМ}})$
	Температура (терморезистор NTC), °C	от -20 до +70	от -20 до +70	$\pm 0,5$
0635 9532	Скорость потока воздуха (крыльчатка), м/с	от 0,6 до 50	от 0,6 до 25 включ. св. 25 до 50	$\pm(0,2+0,015 \cdot W_{\text{ИЗМ}})$ $\pm(0,2+0,02 \cdot W_{\text{ИЗМ}})$
0628 0152	Температура (терморезистор NTC), °C	от 0 до +50	от 0 до +50	± 1

Для определения фактических значений метрологических характеристик комплектов измерительных Testo 440 была проведена калибровка данного средства измерения. С этой целью была разработана методика его калибровки в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.879-2014 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методика калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению», ГОСТ 34100.3-2017/ ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3 Руководство по выражению неопределенности измерения», на основе технического описания РТ-МП-5737-442-2019 «ГСИ. Комплекты измерительные Testo 440. Методика поверки» и руководства по эксплуатации.

Проведение калибровки комплектов измерительных Testo 440 включает в себя следующие этапы:

- 1) внешний осмотр;
- 2) опробование;
- 3) определение действительных значений температуры;
- 4) определение действительных значений относительной влажности;
- 5) определение действительных значений скорости потока воздуха;
- 6) определение действительных значений дифференциального давления;
- 7) определение действительных значений абсолютного давления;
- 8) определение действительных значений концентраций CO₂ и CO;
- 9) определение действительных значений освещенности.

С целью определения точности калибровки комплектов измерительных Testo 440 была оценена расширенная неопределенность в следующем порядке:

- 1) Оценка стандартной неопределенности по типу А;
- 2) Оценка стандартной неопределенности по типу В, обусловленной погрешностью эталона и вызванной разрешающей способностью калибруемого средства измерения;
- 3) Оценка суммарной стандартной неопределенности;
- 4) Оценка расширенной неопределенности;
- 5) Представление полного результата измерений, которое включает в себя оценку выходной величины и приписанное ей значение расширенной неопределенности с указанием уровня доверия.

В рамках данной работы была оценена расширенная неопределенность для измерений скорости воздушного потока и температуры в нескольких калибруемых точках. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения расширенной неопределенности

	<i>Заданные значения</i>			
	<i>температуры, °С</i>		<i>скорости воздушного потока, м/с</i>	
	<i>30</i>	<i>5</i>	<i>10</i>	<i>25</i>
\bar{x}	29,87	4,78	9,85	24,73
u_A	0,08	0,14	0,13	0,23
u_B	0,01	0,01	0,13	0,31
u_C	0,08	0,14	0,18	0,39
U	0,16	0,28	0,36	0,78
Y	$29,87 \pm 0,16$	$4,78 \pm 0,28$	$9,85 \pm 0,36$	$24,73 \pm 0,78$

Таким образом, оценка расширенной неопределенности для измерений температуры и скорости воздушного потока показывают, что разброс значений показаний комплектов измерительных Testo 440 являются не существенными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 8.879-2014 Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению. – Введ. 2015 – 09 – 01. М. Стандартинформ 2015 – 8 с.
2. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – Введ. 2018-09-01. М. Стандартинформ 2015 – 8 с.
3. РМГ 115-2019 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенности. – Введ. 2020-09-01. М. Стандартинформ 2015.
4. Техническая документация. Комплекты измерительные Testo 440. [электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: [https://mirpriborov.com/upload/iblock/6c2/broshyura_testo_440.pdf].

А. Ф. МУСАКАЛИМОВ

musakalimov.2018@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, зав. каф. Э. В. САФИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

СПЕЦИФИКА ПРИМЕНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ДИАФРАГМЕННЫМИ СЧЕТЧИКАМИ ГАЗА

Аннотация. В данном исследовании рассмотрено влияние подстановочного значения абсолютного давления газа при приведении объема и объемного расхода газа к стандартным условиям на точность результатов измерения, а также достижение соответствия расширенной неопределенности измерений объема газа, который приведен к стандартным условиям.

Ключевые слова: измерительный комплекс; условно-постоянная величина абсолютного давления; неопределенность; точность; стандартные условия.

Принцип действия комплексов основан на измерении объема газа при рабочих условиях с помощью диафрагменного счетчика, температуры газа с помощью датчика температуры, корректора и вычисления объема газа, приведенного к стандартным условиям.

Приведение объема газа к стандартным условиям выполняют с помощью корректора в составе комплекса методом Т – пересчета на основании измеренной температуры и принятых за условно-постоянную величину абсолютного давления и коэффициента сжимаемости.

Объем газа, приведенный к стандартным условиям, определяют по формуле:

$$V_c = \Delta V_p \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{p \cdot T_c}{p_c \cdot K}, \quad (1)$$

где ΔV_p – объем газа при рабочих условиях, м³/ч; p – абсолютное давление газа, принятое за условно постоянную величину, МПа; T_c – температура газа при стандартных условиях, К; T – температура газа при рабочих условиях, К; p_c – абсолютное давление при стандартных условиях, МПа; K – коэффициент сжимаемости газа, принятый за условно постоянную величину.

Требования к условиям измерений приведены в таблице 1.

Условия эксплуатации

Наименование параметра	Значение
Температура окружающей среды, °С	от -30 до +60
Относительная влажность, %	До 98 при температуре +35 °С без компенсации влаги
Атмосферное давление, кПа	От 84,0 до 106,7

Значение абсолютного давления газа, принятое за условно-постоянную величину, P_{Π} , определяют по формуле:

$$P_{\Pi} = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2}, \quad (2)$$

где P_{\max} , P_{\min} – максимальное и минимальное значение абсолютного давления газа в условиях эксплуатации, кПа.

Значение коэффициента сжимаемости, принятое за условно-постоянную величину, K , определяют по формуле:

$$K = \frac{K_{\max} + K_{\min}}{2}, \quad (3)$$

где K_{\max} – максимальное и минимальное значение коэффициента сжимаемости газа, рассчитанное при наибольшем значении температуры и наименьшем давлении; K_{\min} – максимальное и минимальное значение коэффициента сжимаемости газа, рассчитанное при наибольшем значении температуры и наименьшем давлении [1, с. 46].

Контроль точности результатов измерений проводят в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.741 -2019 [2, с. 97].

Данные для расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные

Наименование	Значение
Абсолютное давление газа, P_{Π} , кПа	105
Верхний предел измерения абсолютного давления, P_{\max} , кПа	109,2
Нижний предел измерения абсолютного давления, P_{\min} , кПа	100,8
Пределы допустимой относительной погрешности измерений объема га-за, приведенного к стандартным условиям, с учетом погрешности измерений температуры, без учета погрешности от принятия давления и коэффициента сжимаемости за условно постоянные величины, δ_{Vc} , %	$\pm 2,2$
Максимальное значение коэффициента сжимаемости газа в рабочих диапазонах изменения давления и температуры, K_{\max}	1,0008
Минимальное значение коэффициента сжимаемости газа в рабочих диапазонах изменения давления и температуры, K_{\min}	0.997

Относительная стандартная неопределенность измерений объем газа, приведенного к температуре 20 °С, u'_{Vc} , %, рассчитывается по формуле:

$$u'_{Vc} = 0,5 \cdot \delta_{Vc} = 0,5 \cdot 2,2 = 1,1 \%. \quad (4)$$

Относительная стандартная неопределенность от принятия абсолютного давления условно-постоянной величиной u'_p , рассчитывается по формуле:

$$u'_p = \frac{100}{\sqrt{6}} \left(\frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \right) = \frac{100}{\sqrt{6}} \left(\frac{109,2 - 100,8}{109,2 + 100,8} \right) = 1,633 \%. \quad (5)$$

Относительная стандартная неопределенность определения коэффициента сжимаемости газа при принятии коэффициента сжимаемости условно-постоянной величиной, рассчитывается по формуле:

$$u'_K = \frac{100}{\sqrt{6}} \left(\frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\max} + K_{\min}} \right) = \frac{100}{\sqrt{6}} \left(\frac{1,0008 - 0,997}{1,0008 + 0,997} \right) = 0,078 \%. \quad (6)$$

Относительная суммарная стандартная неопределенность измерений объема газа, приведенного к стандартным условиям, рассчитывается по формуле:

$$u'_{Vc} = \sqrt{u'_p{}^2 + u'_{Vc}{}^2 + u'_K{}^2} = \sqrt{1,1^2 + 1,633^2 + 0,078^2} = 1,97 \%. \quad (7)$$

Относительная расширенная неопределенность измерений объема газа, приведенного к стандартным условиям, рассчитывается по формуле:

$$U'_{Vc} = 2u'_{Vc} = 2 \cdot 1,97 = 4,0 \%. \quad (8)$$

Требования к относительной расширенной неопределенности измерений объема газа, приведенного к стандартным условиям, указаны в ГОСТ Р 8.741-2019 [2 с. 97] и приведены в таблице 3.

Таблица 3

Требования к относительной расширенной неопределенности измерений объема газа

Уровень точности измерений	А	Б	В	Г	Д
U'_{Vc} или U'_{qc}	0,75	1,0	1,5	2,5	4,0

Относительная расширенная неопределенность измерений (при коэффициенте охвата 2) объемного расхода и объема газа, приведенных к стандартным условиям, соответствует требованиям ГОСТ Р 8.741-2019 [2].

Исходя из приведенных расчетов очевидно, что погрешность приведения объема к стандартным условиям при косвенном способе измерения в равной

мере зависит и от температуры газа и от его абсолютного давления. Использование подстановочного значения давления взамен измеренного приводит к расхождению объемов газа переданных поставщиком и измеренных потребителем. Так, при избыточном давлении газа в трубе 2 кПа и вариациях атмосферного давления в диапазоне 84 – 106,7 кПа предельное значение дополнительной погрешности вычисления объема, приведенного к стандартным условиям, при использовании подстановочных значений давления может составлять $\pm 5\%$.

Для доказательства сделанных выводов был произведен расчет относительной расширенной неопределенности измерений объема газа, приведенного к стандартным условиям, при разных вариациях абсолютного давления.

Относительная расширенная неопределенность измерений объема газа, приведенного к стандартным условиям, рассчитывалась с изменением относительной стандартной неопределенности от принятия абсолютного давления условно-постоянной величиной.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4

Данные для расчета расширенной неопределенности измерений объема газа, приведенного к стандартным условиям, при разных вариациях абсолютного давления

Наименование	Значение
Избыточное давление газа, $P_{\text{изб}}$, кПа	2
Относительная стандартная неопределенность определения коэффициента сжимаемости газа при принятии коэффициента сжимаемости условно-постоянной величиной, u'_k , %	0,0078
Относительная стандартная неопределенность измерений объем газа, приведенного к температуре 20 °С, u'_{Vc} , %	1,633
Шаг изменения нижнего предела абсолютного давления	1
Верхний предел измерения абсолютного давления, $P_{\text{макс}}$, кПа	109,2

Расчеты проводились в программе Excel. Результаты расчета приведены в таблице 5.

Из выполненных расчетов видно, что соответствие значения расширенной неопределенности измерений объема газа, приведенного к стандартным условиям, требованиям ГОСТ Р 8.741-2019 [2 с. 97] достигается только при значении атмосферного давления 94 кПа.

Результат расчета расширенной неопределенности измерений объема газа, приведенного к стандартным условиям, при разных вариациях абсолютного давления

Значение атмосферного давления газа, кПа	Избыточное давление газа, кПа	Значение расширенной неопределенности измерений объема газа, %
84	2	6,03
85	2	5,79
85	2	5,56
87	2	5,33
88	2	5,11
89	2	4,88
90	2	4,66
91	2	4,44
92	2	4,26
93	2	4,01
94	2	3,80

Это означает, при атмосферном давлении ниже 92 кПа точностные характеристики средства измерения не соответствуют ГОСТ Р 8.741 – 2019 [2 с. 97] во всем диапазоне изменений условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашкаров А.П. Бытовые современные счетчики газа и газоанализаторы для практического применения: Справочное пособие. – М.: ДМК Пресс, 2015. - 54 с.
2. ГОСТ Р 8.741-2019 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Объем природного газа. Общие требования к методикам измерений.

Д. Д. МУХАЯРОВА

dinara.muhayarowa@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. биол. наук, асс. каф. Г. И. АРДАШИРОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДА В ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОМ МЕТОДЕ АНАЛИЗА

Аннотация. Сделать правильный выбор электродов для выполнения конкретной задачи довольно непросто, требуется учесть множество факторов. В настоящей статье изучены такие критерии выбора, как параметры анализируемой среды, точность измерений, технические требования (ограничения) со стороны применяемых средств измерений. Исследование основано на научных трудах, а также рекомендациях компании «Mettler Toledo» – крупнейшего в мире производителя лабораторного оборудования.

Ключевые слова: потенциометрия; измерительный электрод; сравнительный электрод; электродная функция; диапазон определения; концентрация ионов.

Потенциометрические методы анализа основаны на измерении потенциала электрода, погруженного в исследуемую среду. Для этого используют гальванический элемент (индикаторный электрод и электрод сравнения). Индикаторным (измерительным) называется электрод, потенциал которого зависит от изменения концентрации ионов. Потенциал электрода сравнения не зависит от состава и концентрации анализируемого раствора. Величина и изменение ЭДС гальванического элемента, состоящего из этих электродов, позволяют определить концентрацию анализируемого иона в растворе. Некоторые типы производимых электродов (комбинированные) не требуют применения отдельного электрода сравнения. ЭДС элемента, определяется при помощи специальных приборов - рН-метров или иономеров [1].

Задача выбора электрода сводится к подбору модели, характеристики которой полностью отвечают поставленным требованиям и условиям. Поиск осложняет то обстоятельство, что некоторые из них взаимосвязаны. Если не удастся найти такую модель электрода, придется искать лишенный категоричности вариант либо иной метод измерения [2-3].

Следует учесть ряд следующих факторов [2]:

1. Характер анализируемой среды
2. Методика анализа
3. Необходимая точность измерений
4. Требования и ограничения со стороны применяемых измерительных приборов и прочего оборудования.

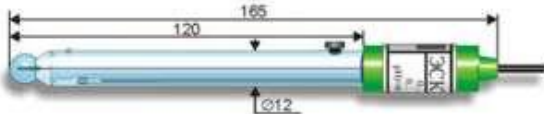
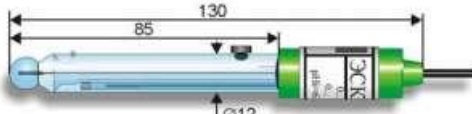
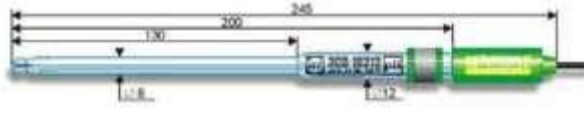

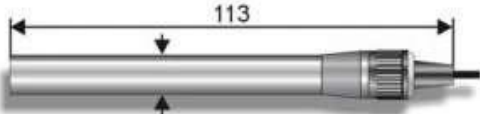
Анализируемая среда характеризуется диапазоном концентраций анализируемого иона, температурой, объемом пробы, физическим состоянием, наличием мешающих ионов и веществ, агрессивных по отношению к электроду.

Целесообразно, когда диапазон измерения электрода полностью охватывает диапазон возможных концентраций анализируемых растворов. В случае необходимости анализа более насыщенных растворов, чем допускает электрод, то возможно разбавление пробы. Следует отметить, что это беспрепятственно осуществляется только при периодических измерениях. Затруднительно выполняется анализ, когда содержание исследуемого вещества в растворе находится на уровне ниже предела определения электрода, но и эта проблема в отдельных случаях бывает решаема [2].

Не менее важной характеристикой анализируемой среды является температурный диапазон работы электрода. По данному параметру богатый выбор доступен только для рН-электродов (таблица 1). Модификаций с широкими температурными диапазонами для ионоселективных электродов, можно сказать, не существует. Если подобрать электрод с нужным температурным диапазоном не представляется возможным, проблема решается подогревом или охлаждением исследуемой среды. Данный способ достаточно бесхитростно реализуется, также и для непрерывных измерений. Не стоит забывать о зависимости электродной функции от температуры.

Особое внимание стоит уделить вопросу присутствия мешающих ионов и веществ, агрессивных к материалам электрода в исследуемой среде. В случае наличия таковых, потребуются их устранение по специальной методике, а осуществление непрерывного анализа станет невыполнимо [2].

Электроды потенциометрического метода анализа

Наименование и тип электрода	Диапазон измерения	Рабочая температура	Применение
Лабораторный комбинированный рН-электрод ЭСК-10301 общего назначения.	0...14 ед. рН	20...100 °С	 <p>Подходит для большинства случаев лабораторного анализа. Идеален для измерений при повышенной температуре, а также анализа сильнощелочных растворов с высоким содержанием ионов Na⁺.</p>
Лабораторный комбинированный рН-электрод ЭСК-10302 общего назначения уменьшенных габаритов.	0...14 ед. рН	20...100 °С	 <p>Подходит для большинства случаев лабораторного анализа. Идеален для измерений при повышенной температуре, а также анализа сильнощелочных растворов с высоким содержанием ионов Na⁺.</p>
Лабораторный комбинированный «полумикро»электрод ЭСК-10313 для измерения рН	0...14 ед. рН	20...100 °С	 <p>Предназначен для анализа растворов в емкостях с узким горлом, а также проб малых объемов.</p>
Лабораторный комбинированный рН-электрод ЭСК-10616 с ножевым устройством.	0...12 ед. рН	0...100 °С	 <p>Предназначен для анализа мяса.</p>
Электрод ЭЛИС-121К калий-селективный	10 ⁻⁵ ...10 ⁻¹ моль/л	5...50 °С	 <p>Применяется в биохимических и биофизических исследованиях, где требуются измерения концентрации калия в водном растворе.</p>

Основными объектами исследований потенциометрического анализа являются растворы, которые в некоторых случаях могут содержать взвеси твердых частиц, эмульсии, быть гелеобразными и т.д. Твердые материалы тоже

возможно исследовать данным методом при наличии специальной методики (растворение, экстрагирование и т.д.), электрода с определенной формой чувствительной мембраны, например, лабораторный комбинированный рН-электрод ЭСК-10616 с ножевым устройством (таблица 1) [2]. Отдельного внимания заслуживает метод измерения (прямая потенциометрия, потенциометрическое титрование и методы добавок). Достоинством и несовершенством прямой потенциометрии (единственного метода прямого определения активности ионов в растворах) одновременно является зависимость измеряемого потенциала от активности. Аналитиков чаще интересует концентрация, а пересчет активности ионов в концентрацию с применением эмпирических коэффициентов активности приводит к дополнительной погрешности. Метод можно усовершенствовать введением в калибровочные и анализируемые растворы индифферентный электролит, что предоставляет возможность калибровки и последующего анализа в единицах концентрации. Метод потенциометрического титрования кажется более сложным на фоне предыдущего, но имеет ряд положительных моментов. Результаты его точнее и воспроизводимее. Благодаря данному методу возможно косвенное определение веществ, на которые не существует ионоселективных электродов. К электроду не предъявляются требований по поводу высокой линейности и стабильности характеристики. Проблема присутствия мешающих ионов решается подбором реактивов. Минусом метода является его непригодность для непрерывного измерения, и довольно часто им невозможно определять малые концентрации. Методы добавок значительно расширяют границы потенциометрии. В частности, это возможность анализа малых концентраций, лежащих на пределе линейности электродной характеристики, а иногда и ниже. В присутствии избытка комплексообразующих агентов метод стандартных добавок является единственным методом, пригодным для определения общей концентрации ионов, входящих в состав комплексов [1, 4-5].

Касательно методики анализа, из вышеуказанного видно, что помимо метода измерения достаточно важную роль при выборе электрода играет режим измерения (периодический или непрерывный).

При выборе электрода важно учитывать технические возможности, требования и ограничения, обусловленные применяемыми средствами измерения и другого оборудования. Прежде всего, речь идет о габаритных размерах и конфигурации электродов, исполнении чувствительной мембраны, протяженности соединительного кабеля и типе разъема [2]. Существуют электроды уменьшенных габаритов, например, лабораторный комбинированный рН-электрод ЭСК-10302 общего назначения или лабораторный комбинированный «полумикро»электрод ЭСК-10313 для измерения рН. Последний позволяет анализировать растворы в емкостях с узким горлом (пробирки, колбы, бутылки и т.д.), а также пробы малых объемов (~ 0,2–0,5 мл).

Таким образом, в данной работе рассмотрены общие критерии выбора электрода в потенциометрическом методе анализа. Рассмотрены возможные пути устранения мешающих факторов при проведении анализа (слишком высокая либо низкая температура пробы, твердое физическое состояние объекта исследования, содержание исследуемого вещества в растворе ниже предела определения электрода). Приведены конкретные примеры электродов, подходящих для описанных в статье случаев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нечипоренко А.П. Физико-химические (инструментальные) методы анализа. Электрохимические методы. Потенциометрия и кондуктометрия: Учеб.-метод. пособие / Под ред. В.В. Кириллова. –СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013 – 34 с.
2. Справочник по измерению рН: теория и практика лабораторных измерений. – Шверценбах: Mettler Toledo, 2007. – 52 с.
3. Литвинова Т.Е., Луцкий Д.С., Пайгашов И.В., Червяков В.С. Выбор средств измерения рН в сложных гетерогенных и гомогенных системах / Журнал «Научные исследования», 2017. - № 5 (16). – С. 6-9.
4. Лебедева М.И. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. - 216 с.
5. Васильев В.П. Аналитическая химия. Ч.2. - М.: Высш. шк., 2002. - 350с.

УДК 006.91

Д. Д. МУХАЯРОВА

dinara.muhayarowa@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. биол. наук, асс. каф. Г. И. АРДАШИРОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕННЫХ МОДЕЛЕЙ рН-МЕТРОВ-МИЛЛИВОЛЬТМЕТРОВ

Аннотация. В связи с возрастающей потребностью измерений и контроля кислотности среды разрабатываются различные виды рН-метров. Данные приборы используются во многих отраслях производства, где необходим контроль среды. На сегодняшний день перед лабораториями стоит задача выбора подходящего для измерения прибора среди многообразных типов рН-метров-милливольтметров. Целью данной работы является проведение сравнительного анализа рН-метров различных модификаций по техническим и метрологическим характеристикам. Объектами исследования являются рН-метры-милливольтметры модификации рН-410, рН-150М и МАРК-901.

Ключевые слова: сравнительный анализ; рН-метр-милливольтметр; кислотность; водородный показатель; технические характеристики; метрологические характеристики; диапазон измерения; погрешность.

Водородный показатель – мера активности ионов водорода в растворе [1].

Этот показатель важен практически в любой отрасли – от агрохимии до медицины или транспорта, так как влияет на протекание огромного количества химических, биологических и экологических процессов [2].

Для определения рН используют рН-метрию и визуальную колориметрию. рН-метрия предполагает измерение водородного показателя с помощью стационарных (лабораторных) приборов – рН-метров, в то время как визуально-калориметрическое определение проводят с использованием портативных тест-комплектов, основанных на реакции универсального или комбинированного индикатора с водородными ионами [3, 4].

рН-метры могут использоваться во многих производствах, где необходим контроль среды, также приборы имеют широкое применение в научно-исследовательской практике и в стационарных и передвижных лабораториях.

На сегодняшний день на рынке лабораторной продукции существует большое количество моделей рН-метров российского и иностранного производства.

В таблице 1 представлены основные технические характеристики наиболее распространенных рН-метров-милливольтметров, внесенных в Государственный реестр средств измерений.

Таблица 1

Основные технические характеристики рН-метров-милливольтметров

Наименование, тип СИ согласно описанию	рН-метры-милливольтметры		
Модель	рН-410	рН-150М	МАРК-901
Госреестр СИ №	21434-01	10663-98	23927-13
Состав СИ	Преобразователь, зарядное устройство, аккумулятор, набор электродов, датчик температуры, стандартные титры для калибровки стеклянного электрода	Преобразователь, блок сетевого питания, набор электродов	Преобразователь с датчиком температуры и комбинированные электроды
Габаритные размеры, мм	240×100×51	245×110×75	85×170×35
Масса, кг, не более	0,4	0,5	0,3
Средняя наработка на отказ	2500	9000	20000
Условия эксплуатации: Температура окружающего воздуха	От +5 до +40	От +5 до +40	От +0 до +50
Влажность	80	90	80
Электропитание	Автономное или сетевое		Автономное
Применение	Лаборатории, предприятия и научно-исследовательские учреждения различных отраслей промышленности, а также в области охраны окружающей среды		Предприятия теплоэнергетики, в различных отраслях промышленности и в сельском хозяйстве
Средний срок службы	5	10	
Страна-производитель	Россия		Беларусь

pH-метр-милливольтметр модификации pH-410 – это универсальное устройство, предназначенное для измерения активности ионов водорода (pH), окислительно-восстановительных потенциалов (Eh) и температуры воды и водных растворов в системах непрерывного контроля технологических процессов в различных отраслях народного хозяйства.

Принцип работы прибора основан на измерении разности потенциалов в электродной системе с учетом температуры.

Небольшие размеры и вес прибора, а также высокая емкость аккумулятора позволяют проводить диагностику не только в лабораторных, но и в полевых условиях (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид pH-метра-милливольтметра pH-410

pH-метр-милливольтметр модификации pH-150M – прибор, предназначенный для измерений активности ионов водорода (pH), окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и температуры (t) в водных растворах растительной, пищевой продукции, почв, технологических растворов, природных и сточных вод.

Работа измерительного преобразователя pH-150M основана на преобразовании ЭДС электродной системы и других источников ЭДС в пропорциональное по величине напряжение с представлением результатов в цифровой форме.

Портативность, универсальность, быстрота отклика, точность, простота использования и обслуживания, возможность измерения непосредственно в точке контроля в различных климатических условиях, малые габариты и вес, авто-

номное питание обеспечивают значительные удобства при использовании прибора в полевых и лабораторных условиях (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид pH-метра-милливольметра pH-150M

pH-метр-милливольтметр портативный модификации МАРК-901 – прибор, предназначенный для измерения показателя активности ионов водорода (рН), температуры водных растворов и электродвижущей силы (ЭДС) на предприятиях теплоэнергетики, в различных отраслях промышленности и в сельском хозяйстве.

В основу работы pH-метра МАРК-901 положен потенциометрический метод измерений рН анализируемого раствора (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид МАРК-901

Удобство и точность измерения, малые габариты и вес, низкое энергопотребление (до 2000 часов непрерывной работы), а также защитный кожух, который предохраняет электроды от механических повреждений при измерениях и хранении обеспечивают удобство при использовании прибора в полевых и лабораторных условиях.

Наиболее высоким значением средней наработки на отказ обладает рН-метр-милливольтметр модификации МАРК-901, а наименьшим значением – рН-метр-милливольтметр рН-410. Это значение не показывает долговечность прибора, но считается, что рН-метры с более высоким значением надежнее.

Наиболее узким диапазоном температуры эксплуатации обладают рН-метры-милливольтметры модификации рН-410 и рН-150М (от +5 до +40 °С), напротив, наиболее широким диапазоном – рН-метр-милливольтметр модификации МАРК-901 (от 0 до +50 °С).

Таблица 2

Диапазоны измерений преобразователя

Измеряемая величина	рН-410	рН-150М	МАРК-901
	Диапазон измерения		
Активность ионов водорода, рН	От 0 до +14,0	От -1 до +14,0	От 0 до +15
Окислительно-восстановительный потенциал, мВ	От 0 до +999,9 От +1000 до +1999	От -1999 до +1999	От -1000 до +1000
Температура анализируемой среды, °С	От -10 до +100	От -10 до +100	0 до +50

Из анализируемых в данной работе приборов наиболее широким диапазоном измерения активности ионов водорода обладают рН-метры-милливольтметры модификации рН-150М (от -1 до +14) и МАРК-901 (от 0 до +15), наиболее узким диапазоном – рН-метр-милливольтметр модификации рН-401 (от 0 до +14).

Наиболее широким диапазоном измерения окислительно-восстановительного потенциала обладает рН-метр-милливольтметр модификации

pH-150M (от -1999 до +1999), а наиболее узким – pH-метр-милливольтметр модификации МАРК-901 (от -1000 до +1000).

Наиболее широким диапазоном измерения температуры анализируемой среды обладают pH-метры-милливольтметры модификации pH-410 и pH-150M (от -10 до +100).

Таблица 3

Пределы допускаемых значений основной абсолютной погрешности
pH-метров-милливольтметров

Измеряемая величина	pH-410		pH-150M		МАРК-901	
	Пределы допускаемой абсолютной погрешности					
	преобразователя	pH-метра	преобразователя	pH-метра	преобразователя	pH-метра
Активность ионов водорода	-	±0,04	±0,02	±0,05	±0,2	0,1
Окислительно-восстановительный потенциал	±1,0	-	±3	-	±2	-
Температура анализируемой среды	-	±2	±2	±2	-	±0,3

Одним из главных параметров работы прибора является точность измерений, которая определяется допустимой погрешностью [5]. Предел допускаемой погрешности pH-метра-милливольтметра модификации pH-410 при измерении активности ионов водорода составляет ±0,04 pH (pH-метр), при измерении окислительно-восстановительного потенциала - ±1,0 мВ (преобразователь), при измерении температуры анализируемой среды - ±2 °С (pH-метр). Предел допускаемой погрешности pH-метра-милливольтметра модификации pH-150M при измерении активности водорода составляет ±0,02 (преобразователь) и ±0,05 pH (pH-метр), при измерении окислительно-восстановительного потенциала - ±3 мВ (преобразователь), при измерении температуры анализируемой среды - ±2 °С (pH-метр) и ±2 °С (преобразователь). Предел допускаемой погрешности pH-метра-милливольтметра модификации МАРК при измерении активности водорода составляет ±0,2 (преобразователь) и ±0,1 pH (pH-метр), при измере-

нии окислительно-восстановительного потенциала - ± 2 мВ (преобразователь), при измерении температуры анализируемой среды - $\pm 0,3$ °С (рН-метр).

Со временем точность измерений может ухудшиться. Чтобы этого не произошло, прибор необходимо калибровать. Чем больше точек калибровки, тем выше точность измерений. Калибровка всех анализируемых рН-метров-милливольтметров осуществляется по двум точкам.

Таким образом, в данной работе был проведен сравнительный анализ технических и метрологических характеристик таких рН-метров-милливольтметров, как рН-410, рН-150М и МАРК-901.

Изучены принципы действия и конструктивные особенности портативных рН-метров-милливольтметров различных модификация, определены преимущества и недостатки приборов.

Однако трудно выделить определенный прибор среди всех рассмотренных, поскольку выбор рН-метра зависит от целей, условий измерения и от измеряемой среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водородный показатель (рН-фактор) – URL: <https://floragrowing.com/ru/encyclopedia/vodороднуу-pokazatel-ph-faktor>
2. Что такое рН и зачем его измерять? – URL: <https://www.эксперт-рн.рф/articleph>
3. Муравьев А.Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами / Науч.-произв. об-ние ЗАО «Крисмас+», 2009 - №3 – 229 с.
4. Петин А.Н., Лебедева М.Г., Крымская О.В. Анализ и оценка качества поверхностных вод / Учебное пособие - Белгород: Изд-во БелГУ, 2006. – 252 с.
5. Гвоздев В.Д. Прикладная метрология: Точность измерений / Учебное пособие. - М.: МИ-ИТ, 2011. – 72 с.- Ред. 2014 г.

УДК 006.91

А. Е. ПОСАШКОВА

alena.zhdanova.98@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, зав. каф. Э. В. САФИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация. Данная статья посвящена метрологическому надзору. Рассмотрена тема метрологического обеспечения, а также его составляющая – метрологическая экспертиза технической документации. Рассмотрены вопросы, касающиеся целей, задач, объектов и процессов.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение; метрологическая экспертиза; метрологический надзор; техническая документация; предприятие.

В наши дни целью любого производства является достижение и поддержание высокого качества выпускаемых изделий, что является главным показателем конкурентоспособности и стабильного развития предприятия. Качество производимой продукции на предприятии зависит от двух факторов – это технологический процесс производства, а также метрологическое обеспечение измерений. Так как по результатам измерений можно сделать объективное заключение о выпускаемой продукции, перед работниками возникают вопросы должной организации проведения измерений, а также обработки их результатов, согласно принципам метрологии и действующим нормативным документам. Актуальность данной работы заключается в том, что особо важную роль в метрологическом обеспечении измерений играет метрологическая экспертиза технической документации, так как задачами экспертизы является оценка правильности выбора методики и средств измерений, а также измеряемых параметров и их точности.

Метрологическое обеспечение (МО) – это утверждение и использование метрологических норм, совокупность методов обучения и правил проведения измерений, а также формирование, производство и использование технических средств для обеспечения единства и необходимой точности измерений.

Главные цели метрологического обеспечения: повышение качества продукции, эффективности управления производством и уровня автоматизации

производственных процессов; обеспечение взаимозаменяемости деталей, узлов и агрегатов, создание необходимых условий для кооперирования производства и развития специализации; повышение эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, экспериментов и испытаний; обеспечение достоверности учета и повышение эффективности использования материальных ценностей и энергетических ресурсов; повышение эффективности мероприятий по профилактике, нормированию и контролю условий труда и быта людей, охране окружающей Среды, оценке и рациональному использованию природных ресурсов.

МО включает в себя следующие основы: технические основы – техническая составляющая (средства измерений, испытаний, контроля, в том числе эталоны и государственные стандартные образцы); научные основы – теоретическая метрология; нормативно-законодательные основы (Федеральные законы, различные методики выполнения измерений); организационные основы (метрологическая служба, метрологические службы юридических лиц, государственная метрологическая служба).

В соответствии с ГОСТ Р 8.820-2013, метрологическое обеспечение измерений (МОИ) – систематизированный, строго определенный набор средств и методов, направленных на получение измерительной информации, обладающей свойствами, необходимыми для выработки решений по приведению объекта управления в целевое состояние. Таким образом, метрологическое обеспечение включает комплекс действий, направленных на обеспечение единства измерений, при котором результаты измерений выражены в узаконенных единицах величин, а погрешность измерений определена с требуемой вероятностью.

Целью метрологического обеспечения измерений является создание условий для получения измерительной информации, обладающей свойствами, необходимыми и достаточными для выработки определенных решений как в областях деятельности, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, так и вне этой сферы.

Предметом метрологического обеспечения измерений являются измерения, выполняемые при производстве и эксплуатации продукции, проведении научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ, экспериментов и испытаний изделий, профилактики, диагностики, лечении болезней, контроле условий труда и безопасности, учете материальных ценностей и ресурсов и при осуществлении других видов работ и оказании услуг.

Метрологическая экспертиза технической документации – это процесс подтверждение пригодности элементов МОИ необходимым требованиям. Кроме того, характерной частью МЭ технической документации служит метрологический контроль. Процесс проверки осуществляется путем контроля технической документации на соответствие условий, требуемых нормативными документами.

Существует четыре формы организации метрологической экспертизы:

Централизованная - силами экспертов-метрологов метрологической службы предприятия (эта форма организации метрологической экспертизы предпочтительна при сравнительно небольших объемах разрабатываемой технической документации);

Децентрализованная - силами специально подготовленных экспертов из числа разработчиков документации в конструкторских, технологических, проектных и других подразделениях предприятия (эта форма предпочтительна при больших объемах разрабатываемой технической документации);

Смешанная - силами специально создаваемой комиссии либо группы специалистов при приемке технических (эскизных, рабочих) проектов сложных изделий или технологических объектов, систем управления, а также на других этапах разработки технической документации;

«Внешняя» - силами группы или отдельных специалистов, привлекаемых к проведению метрологической экспертизы по договору.

Большой частью процедура проведения МЭ включает в себя несколько стандартных этапов. Вдобавок, трудность и длительность исполнения во мно-

гом будут зависеть от типа целей, возникающих при осуществлении экспертизы, а также от объема работ. Так, общепринятыми этапами такой процедуры являются:

1 этап - Осуществление метрологического анализа содержания представленных на экспертизы документов.

2 этап - Формирование экспертного заключения относительно содержания представленной документации.

3 этап - Реализацию мероприятий в области повышения эффективности обеспечения метрологических процедур.

4 этап - Разработку рекомендаций по модификации содержания представленных на экспертизу документов.

Для проведения МЭ необходимо обладать знаниями теоретической, прикладной и законодательной частями метрологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.И. Дмитриев, Метрологическое обеспечение производства в машиностроении/ С.И. Дмитриев, И.Г. Ершова. – Красноярск, 2017. – 18 с.
2. И. В. Трифанов, Метрологическая экспертиза нормативной документации/ И. В. Трифанов, А. А. Снежко, Л. В. Русяева.- Красноярск, 2017. – 22 с.,
3. Колчков В.И. Метрология, стандартизация и сертификация. М.:Учебное пособие, 2010. – 89 с.
4. ГОСТ Р 8.820-2013 «Метрологическое обеспечение. Основные положения». – Москва: Стандартинформ, 2019.

УДК 006.91

Э. Д. СИБАГАТУЛЛИНА

elina.sibagatullina.sm219@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, зав. каф. Э. В. САФИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

ВОПРОСЫ ВЫБОРА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Аннотация. Цель работы заключается в анализе нормативных документов: ГОСТ 8.820-2013, ГОСТ 8.051-81, РМГ 29-2013, ГОСТ Р 53442-2015, стандартов организации, действующих на предприятии ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ПАО «ОДК-УМПО»), применении их на практике и предложении варианта решения вопроса по выбору средств измерений иностранных производителей.

В данной статье приведено описание теоретических основ метрологического обеспечения измерений, изучен процесс выбора отечественных средств измерений на предприятии. Далее описывается проблема различия отечественных и импортных средств измерения и решение вопроса выбора импортных средств измерений.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение измерений; стандарт организации, детали и сборочные единицы; эталон; средство измерений; импортные средства измерений; поверка средств измерений; методика поверки; нормативная документация; измерительная лаборатория предприятия.

Сегодня на моторостроительном предприятии ПАО «ОДК-УМПО» активно применяются средства измерений иностранных производителей, которые обладают высоким качеством и точностью. Они применяются для решения основных задач в центральной измерительной лаборатории. Однако, не во всех случаях требования стандартов к средствам измерений иностранных производителей совпадают с требованиями отечественных стандартов. Вследствие этого возникает вопрос о разработке нового стандарта организации, методики выполнения измерения, методики калибровки средств измерений и других нормативных документов по вопросам метрологического обеспечения касающийся выбора импортных средств измерения. На предприятии ПАО «ОДК-УМПО» действует стандарт организации, определяющий выбор средств измерений отечественных производителей, но метрологические характеристики импортных средств измерений отличаются от отечественных. Поэтому необходимо разработать новые нормативные документы.

Для решения задачи «Метрологическое обеспечение производства, испытаний и ремонта, выпускаемой продукции для достижения единства и требуемой точности измерений геометрических величин» лаборатория внедряет государственные и отраслевые стандарты предприятия, разрабатывает, согласовывает стандарты предприятия, методики выполнения измерений, методики калибровки средств измерений, разрабатывает документы для проведения аккредитации метрологической службы на право поверки и калибровки средств измерений, занимается внедрением современных средств измерений, методов выполнения измерений, информационных технологий по метрологическому обеспечению; проводит работы по своевременному устранению недостатков в области обеспечения единства измерений, разработка проекты перспективных и текущих планов внедрения новой измерительной техники, предложений к планам по совершенствованию метрологического обеспечения производства, средств и методов измерений.

Для решения задачи «Контроль качества изготовления и ремонта деталей и сборочных единиц» центральная измерительная лаборатория проводит контрольные проверки деталей и сборочных единиц по графикам и служебным запискам на соответствие требованиям конструкторской и технологической документации; выбирает средства и методы измерений; занимается измерением контрольных образцов деталей и сборочных единиц продукции, имеющих нормированные характеристики; выполняет арбитражные и высокоточные измерения для оценки качества продукции с привлечением при необходимости сторонних организаций; внедряет современные средства измерений, методы выполнения измерений, информационные технологии по метрологическому обеспечению.

Для решения задачи «Проведения поверки и калибровки» лаборатория проведит аттестацию, эксплуатацию, поверку, техническое обслуживание и хранение эталонов единиц величин, оборудование для поверки и калибровки средств измерений; проводит поверку и калибровку средств измерений с при-

влечением при необходимости сторонних организаций; проведение технические осмотры и юстировку контрольно-измерительного оборудования; разрабатывает локальные поверочные схемы, обеспечивающие передачу размеров единиц физических величин от рабочих эталонов к рабочим средствам измерений; определяет потребности лаборатории в рабочих эталонах единиц величин, средствах измерений, формирует заявки на их приобретение; оптимизирует межкалибровочные интервалы средств измерений на основе анализа их использования; контролирует выполнение графиков поверки и калибровки средств измерений в объединении и в сторонних организациях.

Для решения задачи «Проведение проверки технологической оснастки приспособлений и средств контроля» лаборатория занимается проверкой геометрических параметров оснастки на соответствие требованиям конструкторской документации; выбирает средства и методы измерений; контролирует предъявления оснастки по графикам периодической проверки; занимается установлением оптимальной периодичности проверки с учетом интенсивности и условий эксплуатации приспособлений или периодичности, указанной в технической документации.

При выборе и назначении средств измерений необходимо руководствоваться следующими принципами:

1) Соотношение погрешности средства измерений и допуска измеряемого параметра должно соответствовать требованиям нормативных документов.

2) Условия эксплуатации должны соответствовать рабочим условиями выбираемых средств измерений.

3) Средство измерений должно обеспечивать достоверность измерений при минимальных экономических затратах.

4) При прочих равных условиях следует отдавать предпочтение средствам измерений с более высоким уровнем автоматизации.

5) Предпочтительней применять унифицированные средства измерений.

Процесс выбора средств измерений.

1) На основании конструкторской документации составляется модель объекта измерения и выделяется параметр, который должен быть принят за измеряемую величину. Определяется принципиальная схема измерения, номинальные и предельные размеры, точки или плоскости, в сечениях которых будет проводиться измерение. Требуется выбрать средство измерения для данного размера.

2) Определяется вид измерения (прямое или косвенное). Решение принимается в зависимости от измеряемого параметра. Для измерения длины, диаметра применяется прямой метод, для измерения площади, радиуса дуги и т.п. – косвенный метод.

3) В соответствии с технологической документацией определяется метод измерения (абсолютный или относительный). В зависимости от типа производства (серийное или штучное), требований контроля (выборочный или сплошной), функционального назначения контролируемого элемента, технологической документации определяют, требуется ли контролировать номинальный размер или его отклонение.

4) На основании технологической документации определяются допускаемая погрешность, требуемый диапазон измерения и разрешение средства измерений. Следует уделить особое внимание выбору точности средства измерений, так как именно она влияет на точность измерений.

При приемочном контроле погрешность измерения накладывается на погрешность средства измерения и оказывает влияние на достоверность результатов контроля. Детали, у которых размеры находятся близко к границам поля допуска, могут быть неправильно оценены. В этом случае могут возникнуть ошибки 1 рода (часть годной продукции бракуют) или ошибки 2 рода (часть бракованной продукции принимается как годная).

Для определения предельной погрешности средства измерений (Δu), прежде всего, необходимо определить правильную допустимую погрешность измерений (δ). Допустимая погрешность определяется, исходя из номинального

размера и допуска контролируемого параметра. После этого по допустимой погрешности, качеству и допуску определяют индекс средства измерения. По индексу средства измерения определяют тип средства измерения. Исходя из типа средства измерения определяют условия и предельные погрешности измерения.

Таким образом, после внедрения в рабочий процесс разработки новых стандартов и методик касающихся импортных средств измерений будет улучшен процесс работы, эффективность группы оперативного измерения, группы эталонирования и группы проверки технологического оснащения, а также инженеров по поверке и лиц, проводящих аттестацию оборудования и аттестацию лаборатории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.820-2013 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрологическое обеспечение. Основные положения.
2. ГОСТ 8.051-81 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм.
3. ГОСТ Р 53442-2015 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Установление геометрических допусков. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения.
4. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрология. Основные термины и определения.

В. Ю. СУЛТАНМУРАТОВА

Sult-vil@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. А. Н. ИЛЬИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

ОЦЕНКА РИСКОВ ОРГАНА ПО СЕРТИФИКАЦИИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Аннотация. В данной работе рассматривается риск-менеджмент органа по сертификации систем менеджмента качества. В данной статье выявлены основные риски органа по сертификации методом анализа и оценки вероятности возникновения и последствий риска. Исследования заключаются в разработке мероприятий для минимизации рисков.

Ключевые слова: риск-менеджмент; оценка риска; орган по сертификации; методы оценки; карта риска; мероприятия; предприятие; ранг рисков.

Риск – явление, присущее всем сферам жизни человека. В том числе и на уровне организации. Процесс менеджмента риска предполагает систематическое применение политик, процедур и действий по обмену информацией и консультированию, определению среды, а также по оценке, обработке риска, мониторингу, пересмотру, документированию рисков и подготовки отчетности.

Процесс менеджмента риска должен быть неотъемлемой частью управления и принятия решений и интегрирован в структуру, операционную деятельность и процессы организации. Он может применяться на стратегическом, операционном, программном или проектном уровнях.

Оценка риска – это процесс, охватывающий идентификацию риска, анализ риска и сравнительную оценку риска. Оценка риска это структурированный процесс, где достигаются поставленные цели, делается анализ последствия и вероятности ошибок, чтобы принять решение обработки риска при необходимости. Оценка помогает выявить причину опасных событий, их последствия и возникновения, уменьшить опасные ситуации, когда они возникают.

Основная цель оценки риска – это с помощью данных решить способы обработки риска. Цель обеспечивает понятие опасностей для поставленных целей, получение информации для принятия решений и обмена информации о

риске. Чтобы узнать, где нужно провести менеджмент риска для этого надо определить главные параметры управления, применения его, где признаки процесса. Но для начала надо рассмотреть анализ внутренних и внешних параметров, область применения, как и в организации, так и в узком направлении.

Построение карты рисков позволяет определить уровень каждого выявленного риска для дальнейшего принятия решения о снижении уровня его воздействия.

Рассмотрим какие риски могут возникнуть у органа по сертификации при сертификации СМК предприятия:

- нехватка людей в комиссии по сертификации;
- компетентность комиссии очень низкая для проведения сертификации;
- заявка не соответствует требованиям инструкции;
- предприятие не все документы отдала комиссии по сертификации;
- некачественное распределение обязанностей между органами по сертификации;
- несоблюдение безопасности для органов по сертификации внутри производства;
- некорректная установка времени для планирования и полного выполнения результативного аудита СМ;
- сертификат соответствие заполнен с нарушением;
- нежелание повышать уровень знаний.

Рассматривая все риски, возникающие при сертификации СМК, мы выбрали самые основные. Для оценки риска применяем метод анализа и оценки вероятности возникновения и последствий рисков.

Метод анализа и оценки вероятности возникновения и последствий рисков позволяет эффективно оценивать возникающие риски. При распределении рисков следует акцентировать, что вероятность риска зависит от разных условий и событий, поэтому нужно дать комплексную оценку риска.

На первом этапе нужно идентифицировать, выделить всевозможные риски в той сфере, где происходит оценка.

На втором этапе проводится оценка вероятности и последствия риска в ранговой системе (таблица 1, таблица 2).

Таблица 1

Шкала вероятности риска

Бальная оценка событий риска	Вероятность событий риска	Интерпретация
1	Максимально низкая	Событие очень маловероятно, ожидаемая частота проявления один раз в 5 лет
2	Очень низкая	Событие очень маловероятно, ожидаемая частота проявления один раз в 3 года
3	Низкая	Событие маловероятно, ожидаемая частота проявления один раз в год
4	Максимально средняя	Событие вероятно, ожидаемая частота проявления один раз в полгода
5	Средняя	Событие вероятно, ожидаемая частота проявления два раза в полгода
6	Высокая	Событие очень вероятно, ожидаемая частота проявления один раз в месяц
7	Очень высокая	Событие весьма вероятно, ожидаемая частота проявления один раз в неделю
8	Максимально высокая	Событие может произойти в любое время

Таблица 2

Шкала оценки тяжести последствий риска

Условная оценка влияния риска	Степень влияния на процесс	Тяжесть последствий
1	Очень слабое влияние	Практически незаметны
2	Слабое влияние	Приведут к некоторым неудобствам
3	Слабое значительное влияние	Поддающиеся к контролю
4	Значительное влияние	Серьезны
5	Сильное незначительное влияние	Очень несерьезные
6	Сильное значительное влияние	Очень серьезные
7	Сильное влияние	Весьма очень серьезные
8	Очень сильное влияние	Катастрофические

На третьем этапе определяется ранг (значимость) риска по формуле:

$$X=A*B,$$

где X- ранг риска; А – ранг вероятности риска; В - ранг последствий риска.

Все полученные данные сводятся в таблицу «Матрица вероятностей/последствий».

Риск «нехватка людей в комиссии по сертификации»: оцениваем вероятность возникновения в 4 балла, последствие в 4 балла. Перемножаем вероятность возникновения и последствие, получаем 16 баллов, результат записываем в Таблицу 3.

Риск «компетентность комиссии очень низкая для проведения сертификации»: оцениваем вероятность возникновения в 5 баллов, последствие в 7 баллов. Перемножаем вероятность возникновения и последствие, получаем 35 баллов, результат записываем в Таблицу 3 .

Риск «заявка не соответствует требованиям инструкции»: оцениваем вероятность возникновения в 6 баллов, последствие в 1 балл. Перемножаем вероятность возникновения и последствие, получаем 6 баллов результат записываем в Таблицу 3.

Риск «предприятие предоставило не все документы комиссии по сертификации» оцениваем вероятность возникновения в 3 баллов, последствие в 8 баллов. Перемножаем вероятность возникновения и последствие, получаем 24 балла, результат записываем в Таблицу 3.

Риск «некачественное распределение обязанностей между членами комиссии» оцениваем вероятность возникновения в 3 балла, последствие в 3 балла. Перемножаем вероятность возникновения и последствие, получаем 9 баллов, результат записываем в Таблицу 3.

Риск «несоблюдение безопасности для членов комиссии органа по сертификации внутри производства»: оцениваем вероятность возникновения в 2 балла, последствие в 7 балла. Перемножаем вероятность возникновения и последствие, получаем 14 баллов, результат записываем в Таблицу 3.

Риск «некорректная установка времени для планирования и полного выполнения результативного аудита СМК»: оцениваем вероятность возникновения

в 8 баллов, последствие в 4 балла. Перемножаем вероятность возникновения и последствие, получаем 32 балла, результат записываем в Таблицу 3.

Риск «сертификат соответствия заполнен с нарушением» оцениваем вероятность возникновения в 4 балла, последствие в 2 балла. Перемножаем вероятность возникновения и последствие, получаем 8 баллов, результат записываем в Таблицу 3.

Риск «нежелание повышать уровень знаний»: оцениваем вероятность возникновения в 6 баллов, последствие в 1 балл. Перемножаем вероятность возникновения и последствие, получаем 6 баллов, результат записываем в Таблицу 3.

Таблица 3

Ранг рисков

Риск	Вероятность возникновения	Последствие	Ранг риска
нехватка людей в комиссии по сертификации	4	4	16
компетентность комиссии очень низкая для проведения сертификации	5	7	35
заявка не соответствует требованиям инструкции	6	1	6
предприятие предоставило комиссии по сертификации не все документы	3	8	24
некачественное распределение обязанностей между членами комиссии	3	3	9
несоблюдение безопасности для членов комиссии органа по сертификации внутри производства	2	7	14
некорректная установка времени для планирования и полного выполнения результативного аудита СМК	8	4	32
сертификат соответствия заполнен с нарушением	4	2	8
нежелание повышать уровень знаний	6	1	6

Проводится ранжирование рисков.

Нежелание повышать уровень знаний, заявка не соответствует требованиям инструкции, сертификат соответствия заполнен с нарушением, некачествен-

ное распределение обязанностей между органами (4 – 9 баллов) – риск средний, нужно быть готовым к решению проблем.

Несоблюдение безопасности для органов по сертификации внутри производства, нехватка людей в комиссии по сертификации (12 – 18 баллов) – риск высокий, нужно быть готовым решению проблемы.

Предприятие не все документы предоставило комиссии по сертификации, некорректная установка времени для планирования и полного выполнения результативного аудита СМК (18 – 32 балла) – риск значительный, необходимо предпринять действие по снижению риска.

Компетентность комиссии очень низкая для проведения сертификации (32 – 64 балла) – риск чрезвычайно высокий, необходимо срочно предпринять действия по снижению риска.

Для снижения вероятности возникновения риска разрабатываются мероприятия, которые сводятся в таблицу «Карта рисков». Составляем таблицу (см. таблица 4).

Таблица 4

Карта рисков

Риск	Его ранг	Мероприятие
компетентность комиссии очень низкая для проведения сертификации	35	В состав комиссии включить технических экспертов
некорректная установка времени для планирования и полного выполнения результативного аудита СМ	32	расчет трудоемкости аудита осуществлять в соответствии с инструкцией с учетом всех предусмотренных коэффициентов
предприятие предоставило не все документы комиссии по сертификации	24	Расписать какие нужны документы для сертификации

– 4 – 9 – риск средний, нужно быть готовым к решению проблемы;

– 9 – 12 – риск умеренный, нужно быть готовым к решению проблемы;

– 12 – 18 – риск высокий, нужно быть готовым к решению проблемы;

– 18 – 32 – риск значительный, необходимо предпринять действия по снижению риска (желтая зона);

– 32 – 64 – риск чрезвычайно высокий, необходимо срочно предпринять действия по устранению/снижению риска (красная зона).

После поведения сертификации СМК проводится оценка результативности проведенных мероприятий. Если в ходе работы несоответствия не возникнут, то значит, что риск минимизирован(устранен), значит анализ риска проведен результативно, мероприятие по минимизации риска результативно. Если несоответствие возникло, то мероприятие не результативно и риск мы не минимизировали, значит этот риск нужно заново проанализировать и предусмотреть новое мероприятие.

УДК 005.4

Э. Ш. ТУЙГИЛЬДИНА

elvina.tuygildina.00@mail.ru

Науч. руковод. – д-р пед. наук, доц. С. Н. ГОРБУШИНА

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПРОВЕДЕНИЕ АУДИТОВ СМ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ КОММУНИКАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы проведения дистанционного аудита СМК организации и его нормативное обеспечение. Описаны риски и возможности, технологии.

Ключевые слова: СМК; дистанционный (удаленный) аудит; риски и возможности.

Важным фактором повышения конкурентноспособности отечественных предприятий является управление качеством выпускаемой продукции на системной основе, а также организация и проведение проверки результативности этой работы в рамках аудита.

При возникновении ограничений при затруднении оценки соответствия «на местах» (например, стихийные бедствия, пандемия и др.). Аудит может проводиться дистанционно (удаленно).

Удаленный аудит — систематический, независимый, документированный процесс получения свидетельств аудита и объективного их оценивания в целях установления степени выполнения согласованных критериев аудита, реализуемый без посещения объекта аудита, с использованием ИКТ [2].

Под информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) — совокупность аппаратных (серверы, рабочие станции, ноутбуки, планшеты, мобильные телефоны, стационарные, мобильные и носимые видеокамеры и микрофоны, инфраструктура передачи цифровых данных, роботы, дроны и т.д.) и программных (операционные системы, программное обеспечение разного уровня для управления аппаратными средствами, облачные технологии, электронная почта, платформы для обмена текстовой, фото, видео, аудио и другой цифровой информацией) средств [2].

Следует отметить, что о дистанционной форме аудитов при оценке СМК организации представлена информация в следующих документах:

ГОСТ Р ИСО/МЭК 17021-1-2017 «Оценка соответствия. Требования к органам, проводящим аудит и сертификацию систем менеджмента»: - аудит может включать удаленный доступ к электронным сайтам организации, содержащим информацию об ее СМК.

В материалах Международного форума по аккредитации (International Accreditation Forum, IAF, 5:2019) предусмотрено применение методов удаленной оценки соответствия при сертификационных аудитах.

ИСО 19011:2018 «Руководящие указания по аудиту систем менеджмента».

– В стандарте описаны дистанционные методы проведения аудита по всем видам оценки соответствия систем управления.

Информационный документ IAF ID 3:2011 «Менеджмент чрезвычайных событий или обстоятельств, влияющих на органы аккредитации, органы по оценке соответствия и сертифицированные организации» содержит определение термина «чрезвычайное событие или обстоятельство» как обстоятельство, которое не зависит от организации и обычно называется форс-мажорным обстоятельством или стихийным бедствием.

Стандарт ГОСТ Р 59424-2021 содержит руководящие указания по дистанционному проведению анализа состояния производства и аудита систем менеджмента на основе следующих принципов [1]:

– риск-ориентированный подход к удаленным аудитам: понимание всеми сторонами, участвующими в процессе проверки, рисков и ограничений, удаленных аудитов и используемых информационных технологий;

– обеспечение компетентности персонала в подготовке и проведении удаленных аудитов в отношении планирования, коммуникаций, использования ИКТ, а также требований конфиденциальности и безопасности получаемых данных;

– исполнение требований (международных, национальных, региональных и отраслевых документов) этических норм и правил при использовании ИКТ, сборе, передаче, обработке и хранении данных;

– соблюдение принципа непрерывности и целостности проведения дистанционных аудитов, что включает определение и применение адекватных ИКТ, в том числе - соответствующего аппаратного и программного обеспечения, резервирования и защиты каналов передачи информации и т.д.

Перечислим элементы аудита, которые потенциально могут быть проведены дистанционно:

– проверка документации, записей посредством электронной почты, файлообменника, доступа к интернет-порталу и т.п. Проверка может проводиться в режиме реального времени: демонстрация документов аудитору в ходе видеосвязи с возможностью принять его комментарии и пояснения;

– совещания (вводное и заключительное совещания, групповые обсуждения во время аудита и т.п.) могут осуществляться с помощью конференц-связи, включающей аудио связь и видеотрансляцию;

– интервью с персоналом под средством телефонной связи, видеосвязи в онлайн-режиме. При этом заметки, которые аудитор делает во время интервью, сохраняются в качестве свидетельств аудита;

– наблюдение – включает такие инструменты «посещения» объекта оценки (в том числе закрытого доступа), как видеосъемка, фотосъемка, записи видеокамер.

Вместе с тем, следует отметить, что удаленные аудиты имеют риски, связанные с обеспечением безопасности труда и охраны здоровья его участников (например, развитие симптома «экранной усталости»); недостаточность компетентности аудиторов и персонала проверяемой организации (подразделения) при использовании ИКТ; несоблюдение требования конфиденциальности и безопасности данных, а также принципа объективности выборки и др. [1].

Управление рисками и возможностями удаленного аудита призвано минимизировать влияние неблагоприятных факторов на производственную деятельность организации и расширять возможности для повышения результативности и эффективности СМК в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 59424-2021 Руководящие указания по дистанционному проведению анализа состояния производства и аудита систем менеджмента : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2021-09-01 / Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2021.
2. Владимирцев А.В, Дзедик В.А., Загорулько Ю.В., Рязанова Е.Е. УДАЛЕННЫЕ АУДИТЫ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА: ПЕРСПЕКТИВЫ, РИСКИ, ПРЕИМУЩЕСТВА / А.В. Владимирцев, В.А. Дзедик, Ю.В. Загорулько, Е.Е. Рязанова // Рекламно-информационное агентство «Стандарты и качество». №9. С. 60-63.

УДК 006.072

А. Ф. ХАНОВА

aigulxanova@mail.ru

Науч. руковод. – канд. биол. наук, асс. каф. Г. И. АРДАШИРОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

СОВРЕМЕННАЯ НОРМАТИВНАЯ БАЗА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Аннотация. В настоящей статье рассмотрен путь совершенствования нормативной базы Российской Федерации касательно стандартизации объектов молочной промышленности. Особое внимание уделено ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции».

Ключевые слова: технический регламент Таможенного союза; стандарты; контроль; молочные продукты; качество.

Безопасность и качество производимой отечественной молочной продукции имеют прямую зависимость с контролем ее физико-химических и микробиологических характеристик, технологического процесса изготовления, а также санитарно-гигиенических условий. Общеизвестно, продолжительность жизни и состояние здоровья человека определяются питанием, что доказывает актуальность проблемы уровня качества продуктов питания [2, 5].

В этой связи необходимо отметить важность принятия в 2019 году стратегического документа – Плана мероприятий («дорожной карты») развития стандартизации в Российской Федерации на период до 2027 года. Запланировано порядка 50 мероприятий, нацеленных на «акклиматизацию» отечественной системы стандартизации к выполнению таких задач, как промышленная модернизация, технологическое обновление, развитие научно-технического потенциала и социально-экономического направления. При наложении поставленных задач на регулирование и стандартизацию продуктов питания ключевыми направлениями станут повышение конкурентоспособности продукции и национальной безопасности [4].

Стоит отметить, что последние два десятка лет наша страна сопряжена с требованиями международных договоров. Пройден динамичный путь от меж-

дународной экономической организации – Евразийского экономического сообщества (действовавшего в период 2001-2014 гг.) до Евразийского экономического союза (действующего с 2015 г.). Важную роль играет действующий протокол о техническом регулировании, установивший единые правила, порядок и процедуры в сфере технического регулирования в союзе. Также значим и протокол технического регулирования, определивший единые правила, порядок и процедуры в сфере идентификации, стандартизации и оценки соответствия продукции [7,9].

Благодаря реформе технического регулирования в период образования Таможенного союза, а позже – ЕАЭС изменения коснулись и сферы стандартизации продуктов питания, в том числе идентификацию продукции и оценку критериев. Результатом реформы стали перечни стандартов, практическое применение которых гарантирует соблюдение требований технических регламентов Союза [3,7,10].

Требования к качеству и безопасности молочной продукции изложены в следующих нормативных документах:

– ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции», утвержденный Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 9 октября 2013 г.;

– ТР ТС 022/2011 "Пищевая продукция в части ее маркировки", утвержденный Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г.;

– ТР ТС 005/2011 "О безопасности упаковки", утвержденный Решением Комиссии Таможенного союза от 16 августа 2011 г.;

– ТР ТС 021/2011 "О безопасности пищевой продукции", утвержденный Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г.

«Технический регламент на молоко и молочную продукцию» № 88-ФЗ от 12.06.2008 г. – документ национального уровня, действующий только на территории Российской Федерации, был разработан во исполнение Федерального закона «О техническом регулировании» № 184-ФЗ одним из самых первых.

С 01.01.2016 г. он прекратил свое действие в связи с принятием Технического регламента Таможенного союза «О безопасности молока и молочной продукции» ТР ТС 033/2013. Данный документ регламентирует единые требования к молочной продукции, к процессам их производства, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также требования к маркировке и упаковке молока и молочной продукции для обеспечения их свободного перемещения на территории стран-участниц Таможенного союза - России, Казахстана и Белоруссии [6, 8].

Ко всем техническим регламентам Таможенного союза, в частности к ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции», прилагается перечень стандартов на продукцию и методы исследований и измерений, в том числе правила отбора проб. Вышеупомянутый перечень стандартов представляет доказательную базу, которая каждый год обновляется. В должностные обязанности руководителя лаборатории на предприятии молочной промышленности входит мониторинг этих изменений в доказательной базе [1,6].

Доказательная база ТР ТС 033/2013 включает в себя международные (ISO) и европейские (EN) стандарты, межгосударственные стандарты (действительные для всех членов Таможенного союза), национальные стандарты Российской Федерации (ГОСТ Р), Казахстана (СТ РК), Белоруссии (СТБ) [8].

В заключении можно сделать вывод о том, что нормативная база Российской Федерации в области стандартизации молочной продукции продолжает проходить путь совершенствования. Это долгий процесс, поскольку документы по стандартизации являются взаимосвязанными элементами единой сложной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лепилкина О.В. Фальсификация состава молока и продуктов сыроделия и маслоделия: методы контроля // Материалы международного семинара «Техническое регулирование и современные аспекты совершенствования технологий молочных и молокосодержащих продуктов». – Москва, 2005. – С.12-15.
2. Макеева И.А. Разработка и совершенствование нормативной базы стандартизации молочной промышленности на основе системного и процессного подходов: дис. ... доктора тех. наук. Москва, МГУПП. 2006. – 450с.

3. Макеева И.А. Новое в системе правовых и нормативных документов на объекты пищевой промышленности // Мясные технологии. – 2013. - № 6 (126). - С. 54-57.
4. План мероприятий «дорожная карта» развития стандартизации в Российской Федерации на период до 2027 года. Письмо Правительства РФ от 15 ноября 2019 года № ДК-П7-9914 [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации – URL: <http://docs.cntd.ru/document/563926987> (дата обращения: 20.09.2021).
5. Потороко И.Ю., Ботвинников В.В., Н.В. Попова Особенности контроля качества молочной продукции в условиях действия технических регламентов / Вестник ЮУрГУ, 2008. - №30 – С. 91-94.
6. Прокопьева Т.А. Безопасность молока и молочной продукции // Сборник научных статей 4-й Международной молодежной научной конференции «Будущее науки»: в 4-х томах. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016 – С. 123-126.
7. Стратонова Н.В. Пути развития национальной стандартизации объектов молочной промышленности в условиях ЕАЭС // Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством: сборник научных трудов. Под ред. А.Г. Галстяна. – М.: ВНИМИ, 2020. – Выпуск 1. – С. 519-525.
8. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности молока и молочной продукции» (ТР ТС 033/2013) (с изменениями). [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации – URL: <http://docs.cntd.ru/document/499050562> (дата обращения: 20.09.2021).
9. Шумилов В.М., Боклан Д.С., Лифшиц И.М. Правовые новеллы договора о Евразийском экономическом союзе // Российский внешнеэкономический вестник. 2015 - № 4 - С. 88-100.
10. Юрова Е.А. Особенности контроля молочной продукции по показателям качества и безопасности // Переработка молока. 2019. - № 4 (234). - С. 6-9.

УДК 006.02

В. Р. ХАСАНОВ

hvr-01@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, зав. каф. Э. В. САФИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА «ПОРЯДОК ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ I–V КЛАССОВ ОПАСНОСТИ»

Аннотация. В исследовании рассматривается деятельность по обращению с отходами, разработка процесса системы экологического менеджмента на основе требований стандарта ГОСТ Р ИСО 14001–2016 по обращению с отходами, посредством которого возможно повысить качество данного процесса, и, как следствие, минимизировать вредное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: обращение с отходами; система экологического менеджмента; жизненный цикл отходов; воздействие на окружающую среду; повышение качества процесса обращения с отходами.

Приоритетной задачей в стратегии развития сферы обращения с отходами в Российской Федерации является поэтапное разделение и стандартизация каждого процесса на всем протяжении жизненного цикла отходов. Процесс обращения с отходами проводится в соответствии с требованиями законодательства.

Обращение с отходами включает в себя следующие виды работ: сбор, транспортирование, накопление, обработку, обезвреживание, утилизацию и размещение полученных вторичных отходов на полигонах сторонних организаций.

1) Сбор отходов

Способы сбора промышленных отходов зависят от количества, агрегатного состояния, опасных свойств отходов.

Тип тары, используемой для сбора промышленных отходов, зависит от класса опасности отходов для окружающей природной среды, содержания в составе отходов летучих вредных компонентов, физических свойств. Тара и упаковка должны быть прочными, исправными, полностью предотвращать утечку и/или рассыпание отходов производства и потребления, обеспечивать их сохранность при хранении.

Для отходов производства и потребления II–III классов опасности в зависимости от их свойств, в зависимости от агрегатного состояния и физических свойств используется закрытая и/или герметичная тара:

- металлические или пластиковые контейнеры.;
- металлические или пластиковые бочки, стеклянные емкости и др.;
- прорезиненные или полиэтиленовые пакеты, бумажные, картонные, тканевые мешки и др.

Емкости, используемые для хранения жидких отходов производства и потребления, устанавливаются на поддонах, обеспечивающих сбор и хранение всей разлившейся жидкости. Отходы производства и потребления IV и V классов опасности (не содержащие летучие вредные компоненты) могут храниться в открытой таре. Сбор ртутисодержащих отходов осуществляется в транспортные герметичные контейнеры, которые затем закрываются и в вертикальном положении устанавливаются на автомашину.

2) Транспортирование отходов

Транспортировка осуществляется на арендованных грузовых автомобилях, отходы доставляются на производственную площадку, где осуществляются следующие основные способы складирования:

- на производственной территории;
- на территории и в помещениях по переработке и обезвреживанию токсичных отходов;
- на открытой, специально оборудованной для этого площадке.

Временное накопление отходов на производственной территории предназначается:

- для селективного сбора и накопления отдельных разновидностей отходов;
- для использования отходов в последующем технологическом процессе с целью обезвреживания (нейтрализации), частичной или полной переработки и утилизации на вспомогательных производствах.

3) Временное накопление

В зависимости от технологической и физико-химической характеристики отходов допускается их временно накапливать:

- в нестационарных складских сооружениях (под надувными, ажурными и навесными конструкциями);
- в резервуарах, накопителях, танках и прочих наземных и заглубленных специально оборудованных емкостях;
- в вагонах, цистернах, вагонетках, на платформах и прочих передвижных средствах;
- на открытых, приспособленных для хранения отходов площадках.

Накопление сыпучих и летучих отходов в помещениях в открытом виде не допускается.

В закрытых складах, используемых для временного накопления отходов I–II классов опасности должна быть предусмотрена пространственная изоляция и раздельное хранение веществ в отдельных отсеках (ларях) на поддонах. Накопление твердых промотходов I класса производится в герметичных оборотных (сменных) емкостях (контейнеры, бочки, цистерны); II - в надежно закрытой таре (полиэтиленовых мешках, пластиковых пакетах); III - в бумажных мешках и ларях, хлопчатобумажных мешках, текстильных мешках; IV - навалом, насыпью, в виде гряд.

При временном накоплении отходов в нестационарных складах, на откры-тых площадках без тары (навалом, насыпью) или в негерметичной таре соблюдаются следующие условия:

- поверхность хранящихся насыпью отходов или открытых приемников-накопителей защищена от воздействия атмосферных осадков и ветров (укрытие брезентом);
- поверхность площадки имеет искусственное водонепроницаемое и химически стойкое покрытие;

– по периметру площадки организована обваловка и обособленная сеть ливнестоков с автономными очистными сооружениями;

– поступление загрязненного ливнестока с этой площадки в общегородскую систему дождевой канализации или сброс в ближайшие водоемы без очистки не допускается.

Жидкие и пастообразные отходы должны храниться в герметичной таре. Тарой могут служить бочки, еврокубы, цистерны, подземные емкости. Жидкие отходы III–IV классов опасности могут размещаться в открытых бетонированных амбарах, имеющих надежную гидроизоляцию. Предельное количество накопления отходов на промышленных территориях не нормируется:

– для твердых отходов, концентрированных жидких и пастообразных отходов I класса опасности, упакованных в полностью герметичную тару в закрытом помещении, исключающем доступ посторонних лиц;

– для твердых сыпучих и комковатых отходов II и III классов, хранящихся в соответствующей надежной металлической, пластиковой, деревянной и бумажной таре.

4) Обработка отходов

Обработка – это один из этапов, осуществляемых до непосредственной переработки отходов. В процессе выбирают компоненты из собранной смешанной массы отходов, т. е. разделяют отходы по различным признакам на разные группы в соответствии с их классами опасности. Значение обработки состоит в том, чтобы выделить определенные виды отходов из их смеси и в удобной форме отправить на утилизацию или обезвреживание. Одним из видов технологий обработки (сортировки) является использование технологии «Геотуб», которая позволяет разделять твердую и жидкую фракции отходов.

Твердые отходы, в зависимости от их размеров сортируются при помощи спецтехники. Например, строительные отходы разделяются экскаватором. Отходы, имеющие небольшие размеры и вес, разделяются вручную с

соблюдением мер предосторожности. К примеру – ртутные лампы по видам ламп. Жидкие и пастообразные отходы подвергаются обработке (разделению на фазы) путем гравитационного отстоя или фильтрации в «Геотубах».

5) Обезвреживание и утилизация отходов

Обезвреживание и утилизация проводятся на инсинераторе «АТІ-MULLERCP-100» и установках «УЗГ-1М», «Форсаж-1» после проведения операций на выходе образуются зола, вода и углекислый газ. Для некоторых отходов (например, буровые растворы) возможно использовать для обезвреживания технологию «Геотуб», посредством уменьшения массы отходов, после проведения данной операции образуется вода, механические примеси (песок, глина), которые можно использовать в различных сферах промышленности и строительства.

б) Размещение отходов

Вторичные отходы, полученные после обезвреживания, временно размещаются на производственной площадке, после накопления транспортной партии передаются на стороннее спецпредприятие для дальнейшего захоронения.

Посредством разработки процесса системы экологического менеджмента создаются условия для обеспечения экологически безопасного обращения с отходами и минимизации рисков вредного воздействия на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об охране окружающей среды [Текст]: Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ (ред. от 27.12.2019) // Собрание законодательства. – 2002 №2. – Ст. 1–3.
2. Об отходах производства и потребления [Текст]: Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ (ред. от 07.04.2020) // Собрание законодательства. – 1998. - №26. – Ст. 1–3, 9, 14.
3. ГОСТ Р ИСО 14001–2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 апреля 2016 г. N 285-ст: дата введения 2017-03-01. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200134681> (дата обращения: 30.05.2020). – Текст: электронный.

УДК 005.4

К. А. ЧЕРНОВА

kristi-cher@mail.ru

Науч. руковод. – д-р пед. наук., доц. С. Н. ГОРБУШИНА

Уфимский государственный авиационный технический университет

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ДОКУМЕНТОВ СМК ОРГАНИЗАЦИИ

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы цифровизации внутренних документов СМК организации, риски и возможности данного процесса.

Ключевые слова: цифровизация; внутренняя документация СМК; стандарты ИСО серии 9000.

В 2017 г. Правительством Российской Федерации была разработана и утверждена программа по созданию условий перехода страны к цифровой экономике. Одно из направлений программы получило название «Нормативное регулирование», где среди прочих задач планируется переход на безбумажные технологии документооборота и использование цифровых стандартов.

Объем документооборота предприятия зависит от его размера и вида деятельности, сложности процессов СМК и их взаимодействия, компетентности работников и других факторов. Согласно стандартам ИСО серии 9000 организация призвана выполнять, наряду с обязательными требованиями документов законодательного и нормативного правового характера, требования документов собственной разработки. На высшем (первом) уровне это – видение, миссия, стратегия, политика и цели в области качества. На втором – руководство по качеству. На последующих – процедуры, СТО, многочисленная документация подразделений, рабочие инструкции, методики и записи (акты, протоколы, отчеты и пр.). Таким образом в организации формируется сеть каналов обмена информации - информационная система СМК.

Стандарт ГОСТ Р ИСО 9000 впервые вводит понятие «документированная информация», многокомпонентный состав которой включает:

- 1) информацию системы менеджмента с соответствующими процессами;

2) информацию, созданную для функционирования организации (документация);

3) свидетельства достигнутых результатов.

Ведение и хранение обширного числа документов создает определенные трудности: внутренние фонды нормативных документов хранятся, как правило, на бумажном носителе, подверженному изнашиванию; ухудшается прослеживаемость документов и их потеря; неудовлетворительное качество сканированных копий и др. Устранение возможных проблем при ведении документации достигается, с одной стороны, посредством управления документированной информацией при выполнении следующих действий:

1) распределение, обеспечение ее доступности и поиска, а также использование;

2) хранение и защита, включая сохранение разборчивости;

3) управление изменениями;

4) соблюдение сроков хранения и порядка уничтожения.

С другой стороны, разработкой и внедрением цифровизации документооборота и производственных процессов. Примером этого может служить предприятие АО «Кодекс», внедрившее Систему управления нормативно-технической документацией (СУНД) [2]. Опыт организации показал, что цифровизация внутренней документации подразумевает не просто оцифрованный документ, а нормативные документы, текст которых является машиночитаемым. Вместе с тем, отмечаются и некоторые сложности внедряемой инновации:

1) недостаточное финансирование, так как больших затрат требуют создание защищенных автоматизированных систем, которые не должны допускать утечки конфиденциальной информации, а также обслуживание цифровой инфраструктуры организации;

2) нехватка квалифицированных специалистов по анализу сложных многоуровневых систем;

3) необходимость создания единого «цифрового» реестра выдаваемых электронных сертификатов соответствия;

4) разработка программного обеспечения для внутреннего документооборота предприятий и организаций.

Таким образом, цифровизация внутренних документов СМК организации является одним из приоритетных направлений данного процесса, так как без строгого соблюдения нормативных требований невозможно создавать качественную продукцию. Внедрение цифровизации в организациях и на предприятиях позволит им сохранить конкурентоспособность и даст возможность дальнейшего развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования.
2. Никитенко. М. О цифровизации документооборота и переходе к цифровым стандартам // Стандарты и качество. 2019. №4. С. 97.

УДК 658.562

Р. Р. ШАВАЛЕЕВ

shavaleev1999@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, зав. каф. Э. В. САФИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация. Технический контроль – это важнейшая часть системы управления качеством продукции на машиностроительном предприятии. Необходимость точной и эффективной технологической подготовки технического контроля подтверждается практикой промышленных предприятий. Одним из важнейших факторов роста эффективности производства является улучшение качества выпускаемой продукции. В процессе осуществления технического контроля выявляется соответствие выпускаемой продукции установленным требованиям технической документации, и, как следствие, оценивается достаточность уровня качества для обеспечения эксплуатационных характеристик изготавливаемой продукции.

Ключевые слова: технический контроль; машиностроение; продукция.

Развитие промышленности характеризуется значительным повышением внимания производителей и потребителей к качеству промышленной продукции. Выпуск продукции высокого качества рассматривается теперь во всех странах мира как одно из важнейших условий развития экономики страны, от которого зависят темпы промышленного развития, эффективность использования трудовых ресурсов, успехи внешней торговли и престиж страны на международной арене. Контроль качества продукции в сфере ее производства на машиностроительных предприятиях осуществляется специально организованными службами технического контроля качества.

Техническим контролем называется проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям. Прежде всего, изменилось представление о задачах технического контроля. Так, еще недавно считалось общепризнанным, что основной задачей технического контроля является надежная защита потребителя от попадания к нему дефектной, недоброкачественной и некомплектной продукции.

Основной задачей технического контроля считалась только проверка соответствия или несоответствия объекта установленным техническим требованиям, оговоренным стандартами, технологической документацией, техническими условиями и другой нормативно-технической документацией. Таким образом, техническому контролю отводилась роль инструмента, призванного отсеивать годную продукцию от негодной. Ответственность за поступление к потребителю дефектных единиц продукции ложилась полностью на службу технического контроля. В настоящее время технический контроль рассматривается как равноправный и неотъемлемый элемент системы управления качеством продукции на предприятии, и поэтому основной задачей технического контроля является предупреждение выпуска дефектной продукции посредством получения информации о ходе (состоянии) соответствующего технологического процесса или его результатах для последующей выработки решений об управляющих воздействиях. Из этого следует, что непрерывно накапливающаяся в службах технического контроля информация о качестве продукции является действительно бесценной. Ее правильное и своевременное использование позволяет управлять качеством выпускаемой продукции, оперативно совершенствовать технологию производства, проводить необходимое регулирование технологического оборудования в самые оптимальные сроки, не дожидаясь появления дефектных изделий, давать потребителям продукции твердые гарантии о содержании доброкачественных изделий в поставляемой партии и решать многие другие задачи управления качеством продукции. Технический контроль функционирует как система. Система контроля качества продукции представляет собой совокупность взаимосвязанных объектов и субъектов контроля, используемых видов, методов и средств оценки качества изделий и профилактики брака на различных этапах жизненного цикла продукции и уровнях управления качеством. Эффективная система контроля позволяет в большинстве случаев осуществлять своевременное и целенаправленное воздействие на уровень качества выпускаемой продукции, предупреждать всевозможные сбои и недостатки

в работе, обеспечивать их оперативное выявление и ликвидацию с наименьшими затратами ресурсов. В системе технического контроля выделяют подсистемы: технологии контроля качества и организации контроля качества, рассматриваемые как множество форм и организационных структур технического контроля.

Технический контроль и испытания готовой продукции должны проводиться в определенных точках производственного процесса. Проверка должна проводиться в тех точках, где возникает контролируемая характеристика производимой продукции. Контроль может включать проведение следующих проверок:

- наладка и технический контроль первой детали;
- технический контроль или испытание, проводимые станочником;
- автоматический технический контроль и испытания;
- контроль в определенных точках через определенные интервалы в течение всего производственного процесса;
- несистематический контроль, проводимый инспекторами, отвечающими за выполнение определенных операций.

Для окончательного контроля готовой продукции рекомендуется принимать один или одновременно два метода:

- приемочный контроль или испытание, подтверждающие соответствие единиц продукции или партии эксплуатационным требованиям и другим характеристикам качества. Может иметь место сплошная проверка, выборочный контроль по партиям или непрерывный выборочный контроль;
- проверка качества готовой к отправке продукции методом выборочного контроля из партии готовой продукции как непрерывной, так и на периодической основе.

Приемочный контроль и проверка качества продукции могут быть использованы для обеспечения быстрой обратной связи с целью корректировки как готовой продукции, так и производственного процесса. В то же время, ста-

статистический контроль качества в ряде случаев единственно возможный метод контроля (если контроль связи с разрушением продукции).

В системе управления качеством продукции важнейшую роль играют статистические методы анализа и управления качеством продукции. Однако к этим методам нужно предъявлять несколько требований: процедуры сбора статистических данных должны быть достаточно простыми и не требовать для их использования специальных знаний; результаты обработки и анализа полученной информации должны позволить специалистам оперативно анализировать и совершенствовать производственный процесс с достаточной точностью и быстротой.

В настоящее время для анализа и управления качеством продукции сформировались основные направления применения статистических методов: анализ качества; регулирования технологических процессов; контроля качества; оценки качества.

Рассмотрим каждую ступень технического контроля поподробнее. Наладка и технический контроль первой детали - это основа производства нового изделия. Для изготовления первой годной детали необходимо соблюсти все требования, заложенные конструкторами и технологами. После производства первой годной детали ее отправляют на технический контроль. Там производятся замеры простые замеры (радиальные, линейные размеры) и сложные замеры на контрольно-измерительных машинах (проверяются биение, соосность, плоскостность, круглость, цилиндричность). После данного этапа деталь передается главному контроллеру, который выносит решение по годности данной детали.

Станочник параллельно с контроллером производит свою оценку качества детали. Финальным замером является замер массы каждой детали в авиации. Данный параметр был введен недавно, так как в современную эпоху сверхбыстрых самолетов важен буквально каждый грамм веса детали. Если на измерении детали масса оказалась в поле допуска, то есть меньше или равной массе детали, заложенной конструктором. Далее происходит анализ измерений,

сравнивают чертежные размеры и действительные. После всех вышесказанных операций оформляется паспорт на изделие, они делятся на паспорт без отклонений и паспорт с отклонениями. Паспорт с отклонениями необходимо заполнять, если при анализе измерений хотя бы один размер вышел за поле допуска. В таком случае, технология изготовления будет дорабатываться и совершенствоваться. Если все размеры находятся пределах полей допусков, оформляется паспорт без отклонений. Технический контроль деталей в машиностроении совершенствуется с каждым годом. Вводятся новые стандарты, способы контроля и средства контроля обновляются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чупырин, В.Н. Технический контроль в машиностроении : справ. проектировщика / В.Н. Чупырин [и др.]; под общ. ред. В.Н. Чупырина, А.Д. Никифорова. – М.: Машиностроение, 1987. – 512 с.
2. Войтоловский, В.Н. Организация технического контроля на промышленных предприятиях / В.Н. Войтоловский, В.Н. Федотов. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 214 с.

УДК 005.4

А. Ф. ШИГАПОВА

Sh16al01f98@mail.ru

Науч. руковод. – д-р пед. наук, доц. С. Н. ГОРБУШИНА

Уфимский государственный авиационный технический университет

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ В ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ

Аннотация. Статья посвящена развитию СМК организаций в условиях цифровизации современной экономики. Выявлены основные направления цифровой трансформации СМК предприятия.

Ключевые слова: цифровизация; система менеджмента качества; развитие.

Программа развития цифровой экономики в Российской Федерации до 2035 года описывает главные направления и содержание работ по переходу компаний на цифровые технологии. Данные технологии обязаны регулировать в новых обстоятельствах вопрос обеспечения качества и конкурентоспособности продукции и услуг. Поэтому для результативного решения задач в критериях цифровой экономики появляется необходимость в трансформации СМК [3].

Трансформация происходит на основе принципов гибкости, технологичности и инновационности [2]. Принцип гибкости подразумевает, что СМК должна легко подстраиваться под изменения внешних и внутренних факторов. Принцип технологичности - СМК должна использовать информационно-коммуникационные технологии для повышения качества продукции, обслуживания, снижения издержек и рисков производства. Принцип инновационности - СМК должна способствовать развитию инновационного потенциала компании, привлекать внешние ресурсы для создания инноваций.

Смысл цифровизации СМК заключается в замене наибольшей части операций и процессов, связанных с менеджментом качества, в рамки специализированного программного обеспечения.

В первую очередь объектами цифровизации являются следующие процессы СМК:

1. проектирование и разработка продукции и услуг
2. производственный процесс
3. метрологическое обеспечение
4. процессы аналитической деятельности в СМК.

К каждому из них применяются соответствующие цифровые технологии.

Так на стадии проектирования и разработки продукции, предприятия активно используют электронные 3D – модели и чертежи. Основой цифрового проектирования является применение сложных математических моделей, которые максимально приближены к реальным.

Цифровизация производственного процесса сопровождается наличием контрольно-измерительных приборов на отдельных узлах и устройствах, компьютеризацией рабочих мест сотрудников, объединением в одну информационную сеть всего парка оборудования. В результате в организации создается система управления производством в единой виртуальной среде.

Чем своевременнее вносимые изменения, тем выше экономия на затратах на изделия, а потому приоритетными становятся процессы проектирования. На этапе формирования цифрового производства образуются новые ключевые компетенции: использование системного инжиниринга, когда в каждый момент времени необходимо держать в поле зрения и систему в целом, и ее отдельные элементы; формирование многоуровневой матрицы целевых показателей и ограничений как основы нового проектирования, значительно снижающего риски, объемы испытаний и объемы работ, связанных с доработкой изделий и продукции на основе испытаний; управление изменениями на протяжении всего жизненного цикла продукта; цифровая сертификация, основанная на тысячах виртуальных испытаний как отдельных компонентов, так и всей системы в целом.

Цифровизация метрологического обеспечения предполагает использование программного обеспечения для моделирования и виртуализации измерительных систем, которые упрощают процесс анализа экспериментов, методов и эталонов. Что касается метрологии в анализе больших объемов данных, то це-

лью цифровизации является разработка метрологических методов анализа больших объемов данных и эволюция методов машинного обучения для Big Data с фокусированием на существующих, все более важных метрологических приложениях для промышленности. Метрология коммуникационных систем для цифровизации. В рамках этой темы рассматривается сохранение и метрологическая валидация надежной, защищенной и эффективной коммуникации в сложных сценариях.

Цифровизация аналитической деятельности в СМК состоит в использовании быстродействующих систем хранения и обработки данных, что позволяет более эффективно решать измерительные задачи и регистрировать данные. Внедрение датчиков, установленных на продукции, находящейся в пользовании, обеспечивает передачу производителю информации на протяжении всего ее жизненного цикла. Это позволяет выявлять сбои и отказы продукции. Для упрощения статистической обработки данных возможно применение искусственного интеллекта [1].

Все вышеперечисленные технологии подкрепляются наличием компетентных специалистов по обеспечению эффективности СМК в условиях цифровизации современной экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковригин Е.А., Васильев В.А. Пути развития СМК в условиях цифровизации // Компетентность. 2020. С. 12-17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-razvitiya-smk-v-usloviyah-tsifrovizatsii>
2. Левченко Е.В. Влияние цифровизации на развитие системы менеджмента качества // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2018. С. 9-14. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tsifrovizatsii-na-razvitie-sistemy-menedzhmenta-kachestva/viewer>
3. Сидорин В.В. Система менеджмента качества организации в цифровой экономике // Методы менеджмента качества. 2018. С. 28-35.

Д. А. ЩЕПИНА

shchepina.dashuta@mail.ru

Науч. руковод. – доц. А. Н. ИЛЬИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

КОМБИНИРОВАННЫЕ ДАТЧИКИ-РЕЛЕ КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению комбинированных датчиков контроля пламени, которые были изобретены в связи с необходимостью в максимальной надежности. Стабильно горящее пламя в топках печей является необходимым и важным условием их работы. Контроль за наличием пламени осуществляется при помощи специальных датчиков, основное предназначение которых заключается в обеспечении безопасного функционирования различных установок по сжиганию твердого, жидкого или газообразного топлива. Датчики и приборы для контроля пламени также участвуют в автоматическом или полуавтоматическом процессе розжига пламени, осуществляют постоянный контроль за процессом сгорания топлива с учетом всех требуемых условий и мероприятий по защите. Таким образом, надежность и безотказность работы котельных установок всецело зависит от правильного выбора датчиков контроля пламени. Требования к надежности объективно не контролируются, поэтому это явление является актуальным.

Ключевые слова: контроль пламени; надежность; датчик контроля.

Для контроля наличия пламени при сжигании в топках котлов газа и жидкого топлива применяются как методы прямого контроля (ультразвуковой, термометрический, ионизационный, фотоэлектрический), так и методы косвенного контроля (контроль за разрежением в топке, контроль за давлением топлива в подающем трубопроводе, за давлением или перепадом давления перед горелкой, а также контроль за наличием постоянного источника воспламенения).

Наиболее часто применяемый фотоэлектрический метод контроля за горением топлива заключается в измерении степени видимого и невидимого излучения пламени соответствующими фотодатчиками, фиксирующими оптические свойства пламени. Фотодатчики, применяемые в таких системах, осуществляют регистрацию всех изменений интенсивности принимаемого ими светового потока, и отличаются они друг от друга по длине волны, принимаемой от источника излучения. Эти свойства фотодатчиков необходимо учитывать, так как спектральные характеристики пламени в значительной степени зависят от вида используемого топлива. При сгорании топлива излучение проис-

ходит в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом спектре. Серьезной проблемой при использовании оптических датчиков пламени является их низкая селективность, особенно характерная для горелочных котлов, имеющих три или более горелок. При ошибочном сигнале оптического датчика о наличии пламени возможна серьезная аварийная ситуация. Вторым часто используемым методом контроля пламени является ионизационный метод, основанный на использовании электрических свойств пламени. Работа датчика ионизации основана на фиксировании электрических процессов, возникающих и протекающих в пламени. К таким процессам можно отнести способность пламени проводить ток, возбуждать в электродах, помещенных в пламя, собственную ЭДС, выпрямлять переменный ток, что во всех случаях обуславливается степенью ионизации пламени. Преимуществом ионизационного метода является безынерционность, так как при погасании контролируемого пламени ионизационные процессы сразу прекращаются, что приводит к практически мгновенному отключению подачи газа в горелки котла. Этот метод позволил разработать приборы контроля, основанные на электропроводности пламени, возникновении ЭДС. пламени, его вентильном эффекте и электрической пульсации. Недостатком ионизационного метода контроля является нестабильная работа в условиях с интенсивно запыленной рабочей атмосферой, а также в условиях сильного вихревого движения газов. Ионизационный контроль надежно работает в условиях прямоструйного факела, не имеющего застойных вихревых зон.

Надежность – это основное требование к данным приборам. Для того чтобы достичь максимальной эффективности работы, необходимо не только правильно подобрать оборудование, но еще и правильно его установить. В данном случае важно не только выбрать правильный метод монтажа, но и место крепления. Естественно, что любой тип датчиков обладает своими преимуществами и недостатками, однако если неверно выбрать место установки, к примеру, то вероятность возникновения ложного сигнала сильно увеличивается.

Необходимость в максимальной надежности привела к тому, что были изобретены комбинированные датчики-реле контроля пламени Archives, к примеру. Основное отличие от обычного прибора в том, что устройство использует два принципиально разных метода регистрации – ионизационный и оптический.

Что касается работы оптической части, то в данном случае она выделяет и усиливает переменный сигнал, который характеризует протекающий процесс горения. Во время горения горелки пламя нестабильно и пульсирует, данные фиксируются встроенным фотодатчиком. Зафиксированный сигнал передается на микроконтроллер. Второй же датчик ионизационного типа, который может получать сигнал только при условии, что существует зона электропроводности между электродами. Данная зона может существовать лишь при наличии пламени.

Основными функциями комбинированного опто-ионизационного датчика контроля являются сигнализация погасания пламени, что вызывает немедленное срабатывание защиты и прекращение подачи топлива, самоконтроль исправности датчика, автоподстройку параметров датчика, сохранение параметров датчика в энергонезависимой памяти микроконтроллера при исчезновении питания и сбоях в работе, а также формирование дискретного выходного сигнала для устройства автоматики.

Таким образом, сочетание в одном устройстве двух различных датчиков, работающих на двух принципиально независимых друг от друга принципах, и имеющих общее устройство обработки сигналов, позволит обеспечить повышенную надежность определения наличия пламени в топке котла.

Если подвести итог, то можно сказать, что для максимальной надежности системы, а также для того, чтобы максимально сократить количество остановок котла по причине возникновения ошибочного сигнала, необходимо устанавливать несколько типов датчиков, которые будут использовать абсолютно разные методы контроля пламени. В таком случае надежность общей системы будет достаточно высокой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Береснев А. Л., Будко А. Ю. Повышение эффективности теплоэнергетических установок методом контроля горения топлива по сигналу ионного тока // Инженерный вестник Дона. 2013, № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/maga-zine/archive/n4y2013/1973>
2. Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И. С. Оценка топливной экономичности в единых электростанциях автономных объектов на базе // Инженерный вестник Дона. 2013, № 3. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1870>
3. Приборы контроля наличия пламени. URL: <http://prommatika.ru/staty/113-priborplameni>
4. Приборы контроля пламени, сигнализаторы горения. URL: <http://www.termonika.ru/inf/pribory-kontrolya-plameni-signalizatory-goreniya.shtml>

СЕКЦИЯ 2.5 МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.785.532

Р. А. АБДУЛЛИН

ravab98@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук Р. С. ЕСИПОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ЛАЗЕРНЫМ АЗОТИРОВАНИЕМ

Аннотация. В результате постоянного развития техники в области машиностроения и применения их в тяжелых режимах эксплуатации, возникает потребность в износостойких и прочных материалах, из которых изготавливаются составные детали. Из известных методов повышения прочности поверхностного слоя материала широко известны термическая и химико-термическая методы обработки, а также методы поверхностного макроструктурного текстурирования.

Ключевые слова: стали; азотирование; лазер; текстурирование; химико-термический; трение.

Нами было исследован способ комбинированного обработки рабочей поверхности детали типа шестерня воздействием химико-термической обработкой и поверхностным текстурированием. Суть способа в нагреве поверхности при помощи сфокусированного лазерного луча твердотельным импульсным лазером и одновременной подачи легирующего элемента – газа азота N₂. Обработка ведется в виде упрочненных и неупрочненных участков, упрочненные участки образуются лазерным лучом и подачей легирующего элемента. После проведения обкатки детали, неупрочненные участки образуют канавки, в которых в последствии скапливается смазочная жидкость в процессе работы. Скапливаемая жидкость формирует слой, снижающий коэффициент трения рабочей зоны детали.

На данный момент были проведены ряд испытаний по подбору оптимальных режимов обработки, при которых достигается азотирование в процессе нагрева поверхности лазерным лучом, получены первые испытания, свидетельствующие о насыщении обработанного участка азотом благодаря анализу на растровом электронном микроскопе (РЭМ), показавший содержание азота в

поверхности до 2,67% (рисунок 1), а также проведенные испытания на твердость, которая выросла от начальных 420 HRC до 723 HRC (рисунок 2).

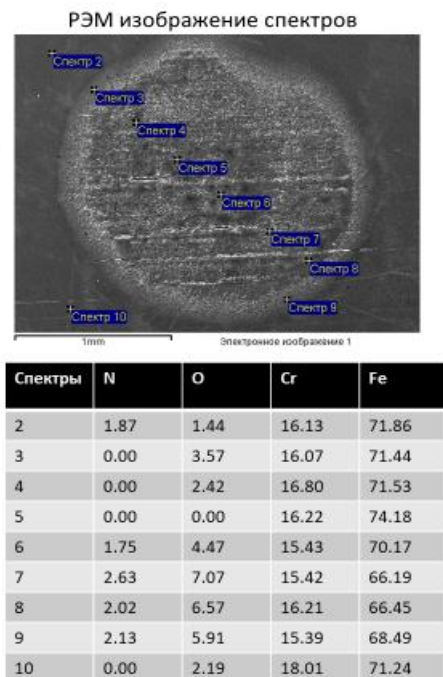


Рис. 1. Полученное в ходе исследования распределение элемента N₂ при анализе на РЭМ

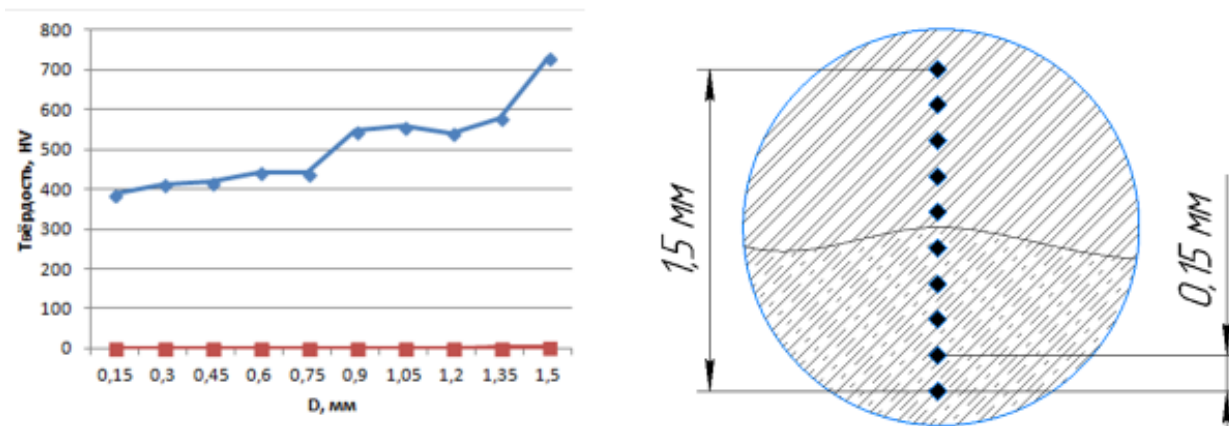


Рис. 2. Распределение твердости по обработанному пятну

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schaaf P. et al. Laser nitriding of metals // Progress in materials science. – 2001. – Т. 47. – № 1. – С. 1- 161.
2. Григорьянц, А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.: ил. – ISBN 5-7038-2701-9.

УДК 621

Н. Л. БАНГА

leocentbanga@gmail.com

Науч. руковод. – А. Ф. ШАЙХУЛОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ANSYS

Аннотация. Конструкции из композитных материалов в последние десятилетия все чаще используются во многих отраслях промышленности, в том числе и в авиационной. В нее входят различные конструктивные компоненты, такие как лопадки турбин, крылья самолетов, а также лопасти вертолетов, которые являются предметом нашего исследования. Они являются наиболее критичными частями вертолета. Внедрение и изготовление лопастей из композитных материалов приводит к снижению массы конструкции, к улучшению механических характеристик, а также устойчивости к усталости и коррозии.

Ключевые слова: моделирование; композитные материалы; Ansys.

Перед любым производством необходимо провести вибрационное исследование с целью понятия поведение композитных лопаток и преимущества их использования. В связи с этим было проведено несколько исследований, целью которых было вибрационное поведение лопаток [1,2,3].

Композиционные материалы становятся все более важными при проектировании авиационных конструкций. Детали самолетов, изготовленные из композитных материалов, такие как обтекатели, интерцепторы и органы управления полетом, были разработаны в 1960-х годах для снижения массы по сравнению с алюминиевыми деталями [4]. На основе накопленного опыта они доказали, что использование композитов позволяет при одинаковых характеристиках экономить массу на 10 до 50% нате же компоненты из обычного металлического сплава при более низкой стоимости от 10 до 20% [5].

Самолеты, космические корабли, спутники, ракеты, космические челноки и вертолеты используют композитные материалы. Использование композитов в приведенных выше примерах основано на следующих основных причинах: жесткость и удельная прочность, подходящая конструкция, сопротивление

усталости и стабильность размеров, которые часто являются основными критериями при их производстве [6].

В случае с турбовинтовыми самолетами и вертолетами, производство которых приходилось на 1970-е годы, композиты использовались только в мелких компонентах, к концу 1970-х годов началось использование композитов при производстве балок. Хвостовое оперение вертолета изготовлено из эпоксидной смолы; обтекатель, лопасти и носовая часть изготовлена из стекловолокна. В настоящее время многие конструкции вертолетов почти полностью изготавливаются из композитных материалов, такие как RAH-66 (вертолет Comanche) [7].

Примеры применения композитных материалов в коммерческих и военных вертолетах, а также прогнозы на ближайшие годы показаны на рисунке 1.

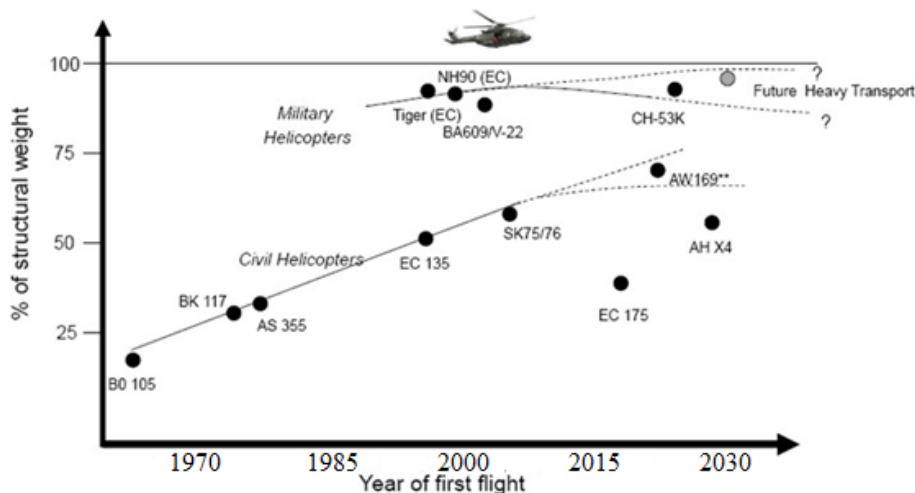


Рис. 1. Примеры применения композитов в вертолетах

Разработка изделий из композиционных материалов традиционно является сложной инженерной задачей. Для ее успешного решения необходимо рассчитать оптимальные характеристики самого материала, которые будут зависеть от числа слоев композита, направления и последовательности их укладки. Основной задачей на этапе разработки изделия является предсказание того, насколько оно будет способно функционировать в заданных условиях эксплуатации. Это требует учета напряжений и деформаций, возникающих в конструкции, а также расчета различных критериев прочности. При этом определяются не только предельные напряжения и прогрессирующее разрушение, но и моде-

лируются процессы, связанные с расслоением, образованием и ростом трещин, а также целый ряд других физических эффектов.

Решение ANSYS для моделирования конструкций из композиционных материалов ANSYS Composite PrepPost дает возможность моделировать сложные композитные конструкции, позволяя разработчику понять и оценить потенциальные механизмы разрушения, включая развитие повреждений, расслоение и образование трещин.

ANSYS Composite PrepPost предоставляет весь набор функциональных возможностей, необходимых для моделирования конструкций из слоистых композиционных материалов. Интуитивно понятный интерфейс ANSYS Composite PrepPost позволяет легко и эффективно назначать материалы различным слоям конструкции, определять положение и последовательность укладки слоев. Также на выбор пользователя предлагается большой набор современных критериев прочности. Решатели ANSYS обеспечивают основу для получения высокоточных результатов анализа, базируясь на которых, в среде ANSYS Composite PrepPost могут быть рассчитаны интересующие критерии прочности. При разработке модели композитной конструкции, определяются свойства материала слоев, задается тип наполнителя (однонаправленная лента, ткань ортогонального или мультиаксиального плетения).

При проектировании новых композитных конструкций и материалов в современных научно-исследовательских и проектных организациях применяются автоматизированные системы различных классов (CAD/CAE/CAM/PLM).

Ключевую роль в рассматриваемой области играют системы инженерного анализа (CAE), развитие которых осуществляется более 40 лет. Основными известными системами и их производителями являются: ANSYS (ANSYS Inc., США), SIMULIA/ ABAQUS («Dassault Systemes», Франция), NASTRAN («MSC Software», США), Comsol, LSDYNA, Siemens NX CAE («Siemens», Германия), «Altair Engineering» (США), ESI Group (Франция), LMS Int. (Бельгия) и др.; в том числе открытые: Salome, Code_Aster, Calculix, OpenFOAM, Code_Saturne

и др. Среди отечественных CAE-систем можно выделить: APM WinMachine (НТЦ «АПМ»), Логос (РФЯЦ ВНИИЭФ), CAE-Fidesys (ООО «Фидесис»), САПР «Сударушка», ИСПА, в том числе отраслевые: Лира, SimInTech [8].

Заключение

Таким образом, в настоящее время все больше конструктивных частей самолетов и вертолетов используют композиционные материалы. Для их создания необходимо выбрать программный продукт, удовлетворяющий всем требованиям. В результате проведенного анализа программных продуктов, систем инженерного анализа, был выделен ANSYS Composite PrepPost, который дает возможность моделировать сложные композитные конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Heffernan, «Effect of helicopter blade dynamics on blade aerodynamic and structural loads », Journal of the American Helicopter Society 33 (3). 1988. 30–41.
2. S. Rao, R. Gupta, «Finite element vibration analysis of rotating Timoshenko beams », Journal of Sound and Vibration 242. 2001. 103–124.
3. S. Lin, K. Hsio, « Vibration analysis of a rotating Timoshenko beam », Journal of Sound and Vibration 240, 2001. 303–322.
4. « Aviation maintenance technician handbook—airframe, volume 1» department of transportation, U.S. Federal Aviation Administration, flight standards service, Publ. 2012.
5. Daniel GAY, « Matériaux composites», 3e édition, HERMES, 1991.
6. Carl T. HERAKOVICH, «Mechanics of fibrous composites », University of Virginia. 1998.
7. Alan DOBYNS, Carl Q. ROUSSEAU, Pierre MINGUET, «Comprehensive Composite Materials, Helicopter Applications and Design », volume 6, Elsevier Science Ltd., 2000.
8. URL;https://tpolis.com/ansys/files/ansys_composite // ANSYS: Создавайте продукты, оправдывающие ожидания Ваших клиентов//Композиционные материалы. (дата обращения 10.03.2021).

УДК 621.7

А. А. ВАСИЛЬЕВ

arsentiy.vasilev.00@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук. Р. С. ЕСИПОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ

Аннотация. Физико-механические свойства поверхностных слоев, упрочненных лазерным излучением, связаны с высокими скоростями нагрева и охлаждения. Упрочнение материалов лазерным излучением основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и последующем охлаждении этого поверхностного участка с высокой скоростью в результате теплоотвода тепла во внутренние слои металла. Эти условия обеспечивают высокие скорости нагрева и охлаждения обрабатываемых поверхностных участков.

Важнейшим преимуществом этой технологии является то, что поверхностное термоупрочнение на глубину 0,1 – 0,5 мм осуществляется за счет структурно-фазовых изменений поверхностных слоев исходного материала путем управляемого воздействия на обрабатываемую поверхность готовой детали лазерным излучением специализированного для этой технологии лазера без какой-либо наплавки, без оплавления поверхности, без нарушения макро- и микрогеометрии и, соответственно, без необходимости какой-либо последующей обработки.

Ключевые слова: лазер; термоупрочнение; металл; прочность; инструмент.

Применение и перспективы:

Лазерное термоупрочнение металла – надежный и экономичный способ повышения прочности деталей, работающих в условиях трения. Технология востребована в машиностроительном, нефтегазовом, сельскохозяйственном производствах, металлургии, инструментальном производстве для обработки режущего инструмента, рабочих частей штампов гильотинных ножей и прочего инструмента.

Наиболее широкая область применения лазерной поверхностной обработки — инструментальное производство, например изготовление и эксплуатация режущего инструмента, элементов штамповой оснастки.

Лазерное упрочнение позволяет снизить износ инструмента путем повышения его поверхностной твердости при сохранении общей высокой динамической прочности, повышения теплостойкости, снижения коэффициента трения.

Внедрение технологии лазерного упрочнения инструмента из сталей с пониженным содержанием вольфрама позволяет помимо повышения его стойкости значительно сократить расход дефицитной быстрорежущей стали.

Лазерное упрочнение приводит к повышению износостойкости штампов. Упрочнение пуансонов обычно проводится по боковым поверхностям. При этом возможна многократная переточка пуансонов. При упрочнении по передней поверхности после очередной переточки кромки требуется повторная лазерная обработка.

Эффективно применение лазерного излучения для повышения работоспособности породоразрушающего инструмента для машин горнодобывающей промышленности. Здесь применение лазерной обработки приводит к росту износостойкости резцов комбайнов.

Лазерная закалка обеспечивается двумя физическими процессами:

1) Лазерный луч нагревает внешние слои заготовки до температуры аустенитной трансформации, со скоростью около $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ в секунду

2) Быстрое охлаждение предохраняет металл от возврата в исходную структуру и создает очень жесткую мартенситную структуру

Технология обеспечивает высокое качество упрочненного слоя с требуемой устойчивой структурой, с высокой твердостью и износостойкостью обработанной поверхности, с большой равномерностью и стабильностью глубины и твердости.

Оборудование:

Лазерный технологический комплекс для упрочнения и наплавки поверхностей крупногабаритных деталей сложной формы ЛК-5В (ООО «Термолазер»).

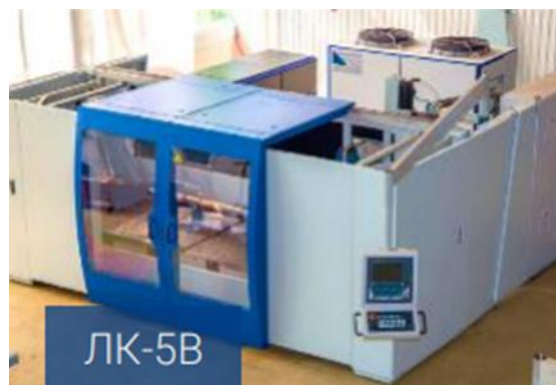


Рис. 1

Характеристики:

Тип лазера: многоканальный СО₂ -лазер

Мощность излучения: 5 кВт

Пределы регулирования мощности: 0,5 – 5,0 кВт

Режимы работы лазера: непрерывный, импульсно-периодический

Диаметр пятна излучения в зоне обработки: 5-20 мм

Лазерному термоупрочнению могут быть подвержены изделия из различных сталей.

– сочетает в себе возможность проводить модификацию структуры поверхностных слоев детали и нанесения покрытий

– газопорошковая смесь подается в центр конической воронки оптического излучения, окруженной потоком инертного газа

– излучение нагревает поверхность детали, в результате чего часть поверхностных загрязнений испаряется и вытесняется потоком защитного газа

– поверхность нагревается еще и происходит осаждение паров наносимого покрытия

– далее излучение дополнительно нагревает поверхность с нанесенным покрытием, оплавляя его и уменьшая размер неровностей.



Рис. 2

Схема устройства для нанесения покрытий с предварительной очисткой поверхности: 1 – защитный кожух; 2 – водоохлаждаемый анод; 3 – область ду-

гового разряда катодной обработки; 4 – поверхность основы; 5 – поверхность основы, очищенная дуговым разрядом; 6 – область лазерного излучения, область плазмоида; 7 – водоохлаждаемый корпус катода с подачей аргона; 8 – катод из вольфрама; 9 – поверхность покрытия после оплавления дуговым разрядом; 10 – область дугового разряда анодной обработки; 11 – поверхность покрытия после нанесения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Меркулов Г.В., Стрижак А.И.; Под. Общ. Ред. Коваленко В.С. Упрочнение деталей лучом лазера // Техника, 1981. – 131с.
2. Крашенинников В.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Токарев А.О., Шихалев Э.Г. Применение технологии лазерного термоупрочнения для производства изделий транспортного машиностроения.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов.

УДК 621

А. П. ДАНИЛИН

artdanilin97@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. С. И. ФЕЦАК

Уфимский государственный авиационный технический университет

СИНХРОНИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГЛАВНОГО ШПИДЕЛЯ И КОНТРШПИДЕЛЯ ТОКАРНОГО СТАНКА

Аннотация. Цель статьи заключается в рассмотрении необходимости синхронизации частот вращения шпинделей. В статье приведена методика составления математической модели системы автоматического управления. Выполнено моделирование работы системы в среде Matlab.

Ключевые слова: синхронизация; мотор-шпиндель; САУ; Matlab.

Точная синхронизация вращения шпинделя и контршпинделя позволяет выполнить передачу детали для ее обработки с другой стороны без остановки вращения. Синхронное вращение шпинделя и контршпинделя позволяет проводить обработку длинной детали с одновременным закреплением с двух сторон. Передача заготовки в автоматическом режиме уменьшает погрешности изготовления детали время ее обработки.

За синхронное вращение шпинделей отвечает система автоматического управления (САУ). Разработка систем управления и исследование качества их регулирования являются основными задачами анализа и синтеза САУ.

Конструктивная схема объекта, являющегося мехатронным модулем, позволяет проанализировать взаимодействие составных частей САУ, выделить внутренний, обычно нерегулируемый, контур и внешний контур регулирования, стабилизации или изменения по определенному закону основной выходной величины. В результате анализа разрабатывается функциональная схема системы управления.

На основании принятой функциональной схемы системы можно разработать динамическую модель САУ в виде структурной схемы. Эта схема позволяет найти передаточные функции разомкнутого и замкнутого внутреннего и

внешнего контуров системы управления. По этим передаточным функциям выполнен анализ качества регулирования исходной системы управления.

Конструктивно объект регулирования состоит из двух мотор-шпинделей мощностью 7.5 кВт. Функциональная схема САР представлена на рисунке 1.

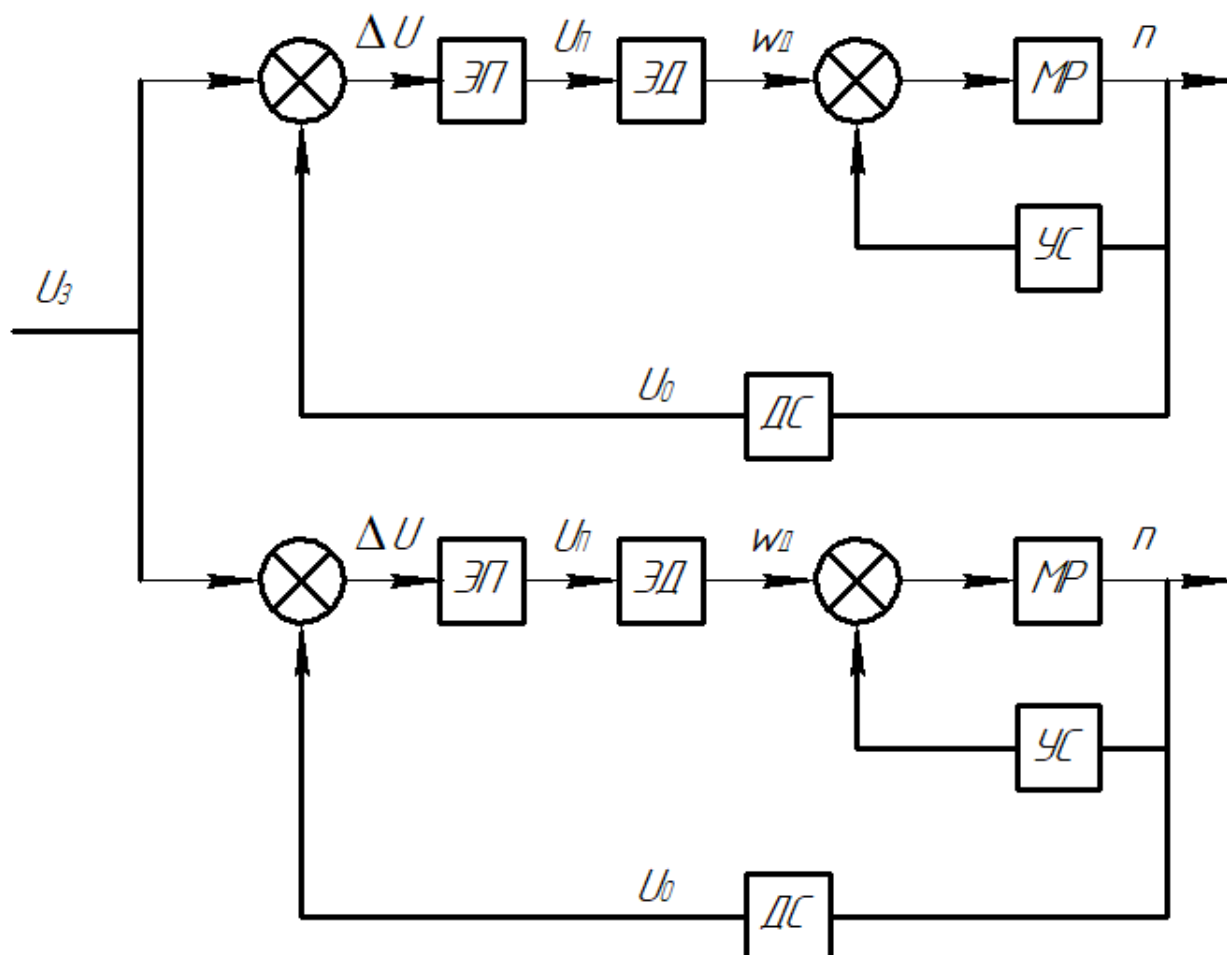


Рис. 1. Функциональная схема САР

Управляющий сигнал U_3 поступает в сумматор, откуда, с учетом поправки от обратной связи, поступает на электрический преобразователь в виде разницы напряжений ΔU . Усиленное таким образом напряжение питает электродвигатель.

Возникающий в процессе резания момент оказывает влияние на частоту вращения шпинделя. На вход внешней обратной связи поступает значение частоты вращения шпинделя, преобразуемое датчиком скорости в напряжение. Электронный усилитель увеличивает напряжение для дальнейшего сравнения его с управляющим сигналом. Внутренний контур обратной связи показывает колебания, возникающие в упругой системе привода.

Структурная схема модели мотор-шпинделя, выполненной в среде Matlab представлена на рисунке 2.

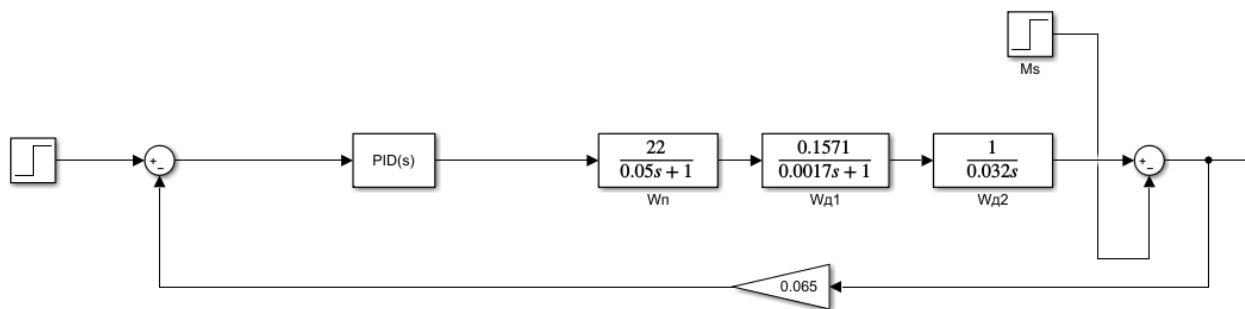


Рис. 2. Структурная схема мотор-шпинделя

Структурная схема привода главного движения и контршпинделя, с учетом синхронизации частоты вращения, представлена на рисунке 3.

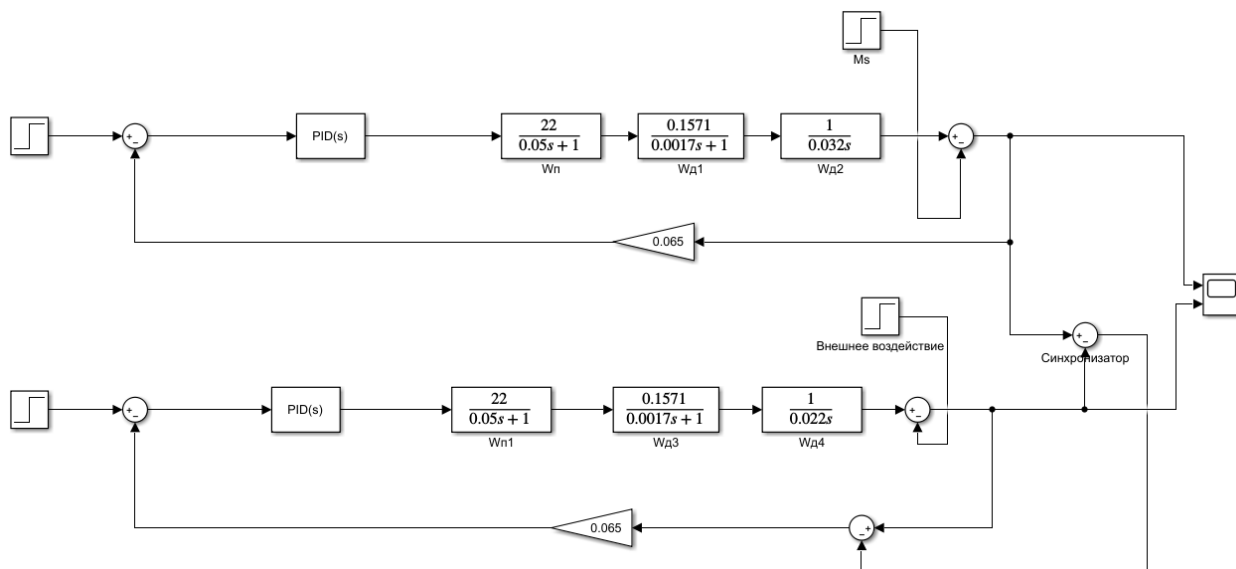


Рис. 3. Структурная схема приводов

Блок «Синхронизатор» выполняет сравнение частоты вращения шпинделя. Полученная разница преобразуется в корректирующий сигнал для контршпинделя, и частота его вращения синхронизируется с частотой вращения главного шпинделя.

Для проверки синхронизации зададим в качестве внешнего воздействия на контршпиндель снижение частоты вращения на 100 об/мин и применим его в момент времени $t = 2$ с.

Полученный график переходного процесса представлен на рисунке 4.

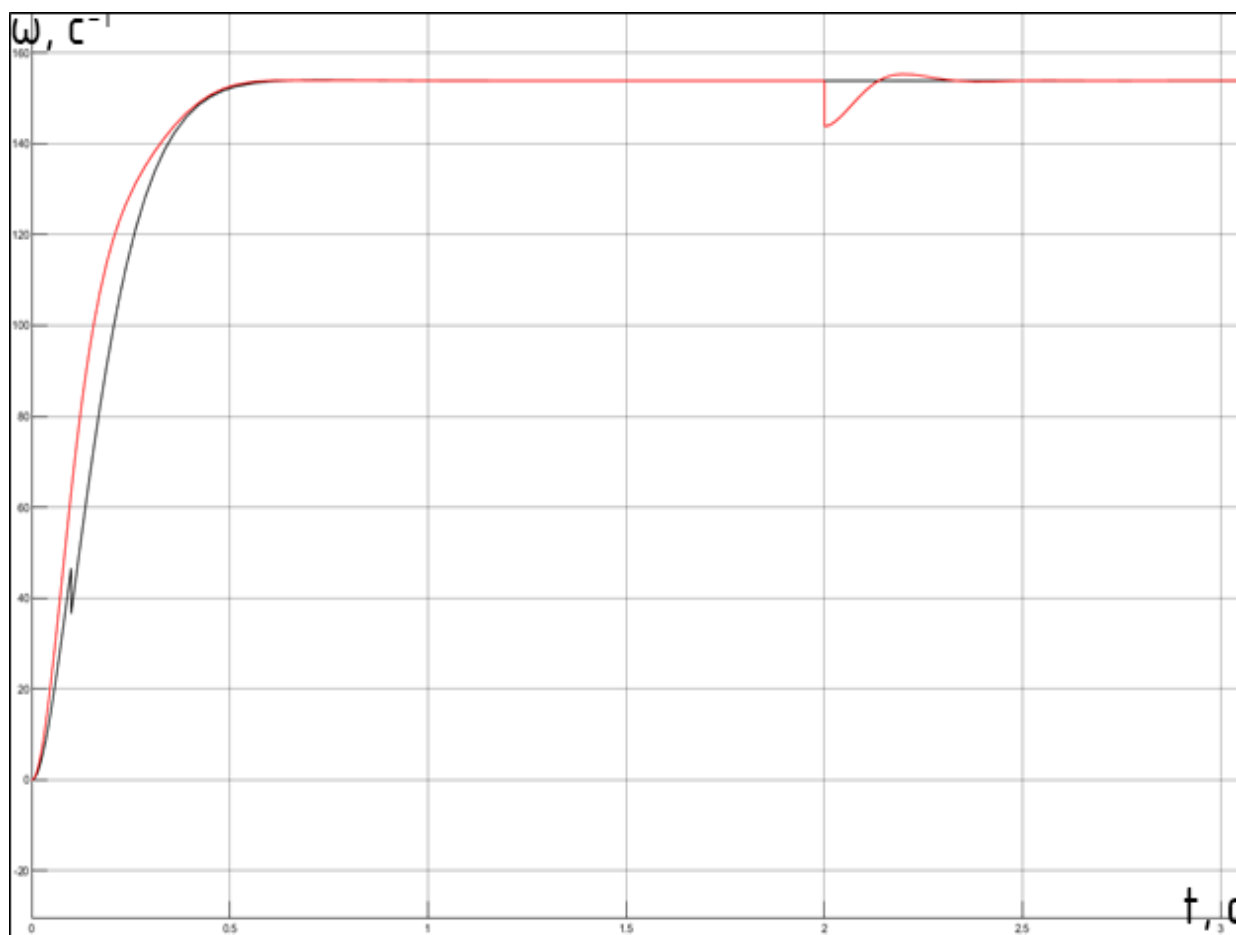


Рис. 4. Синхронизация частот вращения

Из графика видно, что при $t = 2$ с. частота вращения контршпинделя (красный график) уменьшается, однако за счет синхронизации частоты вращения выравниваются. Процесс выравнивания частот вращения занимает порядка 0,3 секунды, что является приемлемым значением.

Таким образом, в ходе моделирования синхронного вращения двух шпинделей вычислены параметры математической модели электродвигателей, подобраны параметры PID-регулятора для обеспечения устойчивой работы системы и наивысших показателей качества регулирования. Обеспечена синхронизация частот вращения шпинделей за счет применения обратной связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод: Учеб. Пособие / Р.С. Аипов, С.М. Галеев, А.В. Линенко; -Уфа: БГАУ, 2008.-172 с.

УДК 65

Г. Д. ЛЮДВИНИЦКИЙ
ludvinickiy.egor@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. тех. наук А. Ф. ШАЙХУЛОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА

Аннотация. Предиктивная/предсказательная аналитика— класс методов анализа данных, концентрирующийся на прогнозировании будущего поведения объектов и субъектов с целью принятия оптимальных решений. Предсказательная аналитика использует статистические методы, методы интеллектуального анализа данных, теории игр, анализирует текущие и исторические факты для составления предсказаний о будущих событиях.

В первую очередь предиктивная аналитика помогает контролировать состояние оборудования по разным параметрам. Благодаря этому можно заранее предсказать возможные сбои и оперативно их предотвратить. По данным McKinsey, предиктивная аналитика на производстве сокращает время простоя оборудования на 30–50% и увеличивает срок его службы на 20–40%.

Мероприятия по оптимизации ТОиР направлены на контроль технического состояния оборудования: они предусматривают плановую замену элементов по достижении конкретного состояния или срока, плановый и внеплановый ремонт для устранения повреждений, смазку и зарядку деталей.

Например, не так давно в зарубежной компании *Duke Energy* на одной из электростанции отказал трансформатор, что привело к сбою станции и к финансовым потерям суммой в 10 миллионов долларов. Поэтому компании понадобилась технология, которая способна решить проблему простоя оборудования, заранее предугадывая поломки. Теперь в компании появилась система мониторинга, которая позволяет анализировать состояние оборудования и в случае неполадок направляет оповещения специальным людям на производстве.

Еще один яркий пример— инновационное подразделение *Пентагона* (*Defense Innovation Unit (DIU)*) применяет прогнозное ТОиР для обеспечения летной готовности самолетов фронтовой авиации. Оно помогает выявлять кри-

тически сбои в работе систем до того, как они произойдут. Кроме того, аналитика предсказывает потребность в деталях и техническом обслуживании, необходимых для поддержания самолетов в режиме готовности.

Предективная аналитика необходима современному производству и масштабнее внедрения будет только расти. И благодаря этому позволит компанией принимать более взвешенные и корректные решения для достижения лучших результатов. И таким образом предотвратит лишние и бесполезные затраты как энергии так и ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков А.В., Сивец Ю.В., Авдеева К.Ю. Новый подход в использовании математического аппарата в построении трехмерной модели позвоночника // Хирургия позвоночника: Клиника травматологии, ортопедии и нейрохирургии НИИТО, 2005. С. 100–104.
2. Орлов С. В., Бобарыкин Н. Д., Латышев К. С. Математическая модель стабильности трехпозвонкового комплекса // Мат. моделирование. 2006. Т. 18, № 10.
3. Denis F. Spinal instability as defined by the three column spine concept in acute spinal trauma // Clin. Orthop. 1984. 189:65

Д. В. МАМОНТОВ, И. Д. СКЛИЗКОВ, А. В. АСЫЛБАЕВ

dany.mamontow@yandex.ru, Sklizkovivan99@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Р. К. ВАФИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5 В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Аннотация. Известно, что с появлением новых труднообрабатываемых материалов проблема повышения стойкости режущего инструмента становится все более актуальной. Одним из наиболее распространенных и эффективных методов модификации поверхности является метод азотирования. При азотировании повышаются прочность, твердость, износостойкость, сопротивление усталости и коррозии сталей и сплавов.

Ключевые слова: ионное азотирование; тлеющий разряд; ультрамелкозернистая структура (УМЗ); интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК).

Данная работа посвящена разработке технологии упрочнения инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 при помощи комбинированной обработки интенсивной пластической деформацией кручением (ИПДК) и ионным азотированием в тлеющем разряде с магнитным полем.

Целью работы является исследование влияния азотирования в тлеющем разряде с магнитным полем в комбинации с интенсивной пластической деформацией кручением на структуру, фазовый состав, микротвердость диффузионной зоны, и разработка способа и технологического процесса поверхностной ионной химико-термической обработки быстрорежущих сталей.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Экспериментально установить влияние ионного азотирования в тлеющем разряде с магнитным полем в комбинации с ИПДК быстрорежущей стали Р6М5 при температуре 450°С в течении 4 часов.

2. Исследование влияние параметров ионного азотирования в тлеющем разряде с магнитным полем в комбинации с ИПДК на структуру, фазовый состав и распределение микротвердости в формирующейся диффузионной зоне в быстрорежущей стали Р6М5.

3. Исследование влияние магнитного поля на зондовые и вольтамперные характеристики тлеющего разряда.

4. Разработка нового технологического процесса ионного азотирования, основанного на фазовом модифицировании поверхностного слоя в тлеющем разряде с магнитным полем и ИПДК

Для данной работы были взяты образцы, изготовленные из быстрорежущей стали Р6М5, диаметром 20 мм и толщиной 3 мм. Образцы подвергались холодной осадке на 43% при кручении в 1,5 оборота при гидростатическом давлении в 4 ГПа, за счет чего создавалась УМЗ структура. Затем образцы подвергались ионному азотированию в смеси газов, состоящем из 35%N₂+15%Ar+50%Н₂ при температуре 450±10°С в течении 4 часов.

Эксперименты проводились в модернизированной вакуумной установке ЭЛУ-5М (рис. 1), предназначенной для проведения термической и химико-термической обработок.

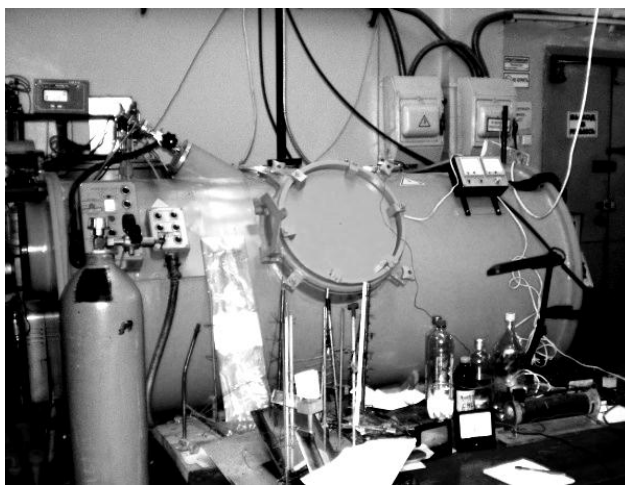


Рис. 1. Общий вид модернизированной установки ЭЛУ-5

После ИА проводились металлографические исследования обработанных образцов. Для определения микротвердости и глубины упрочненного слоя на обработанных образцах использовался метод измерения по Виккерсу на косых шлифах при помощи автоматического микро-макро твердомера с системой анализа изображений EMCO–Test DuraScan 50. Для анализа толщины упрочненно-

го слоя использовался метод оптической металлографии при помощи оптического микроскопа Olympus GX51 (рис. 2).



Рис. 2. Оптический микроскоп Olympus GX51

Результаты исследований (рис. 3-5) были апробированы на международных научно-практических и научно-технических конференциях, были опубликованы статьи в изданиях, входящих в международную реферативную базу SCOPUS и Web of Science, получены патенты на изобретения. В настоящий момент, поданы несколько патентов на изобретения по данной тематике работы.

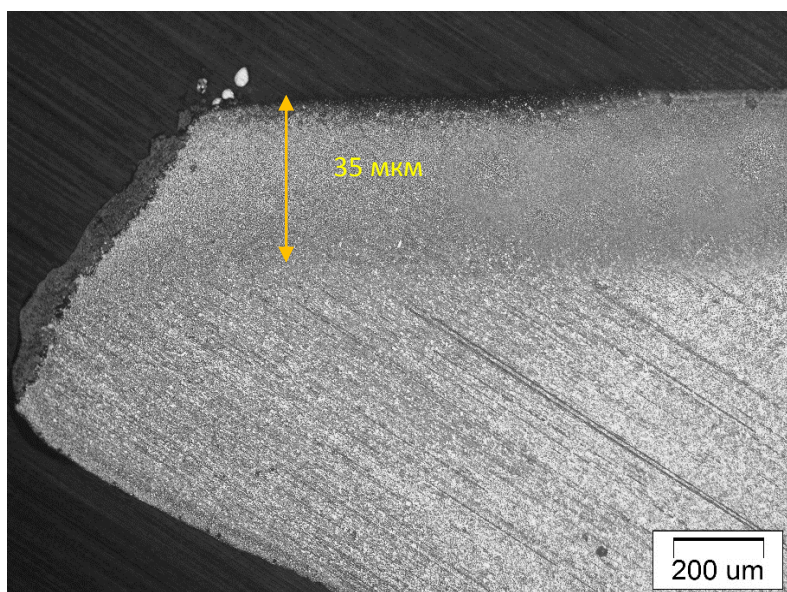


Рис. 3. Исходный образец Р6М5 после ионного азотирования в течение 4-х часов

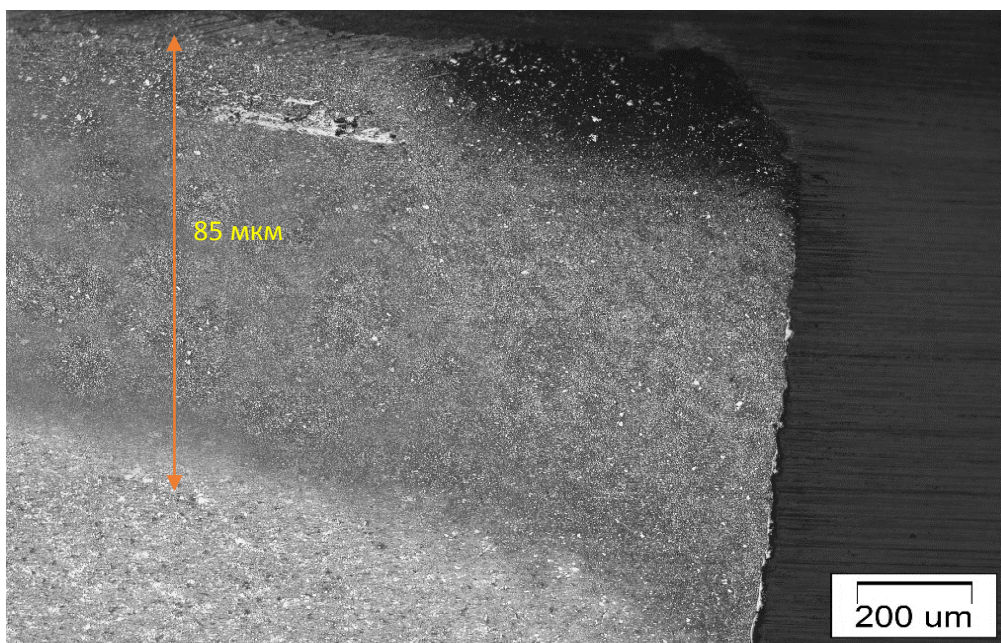


Рис. 4. ИПДК образец P6M5 после ионного азотирования в течение 4-х часов

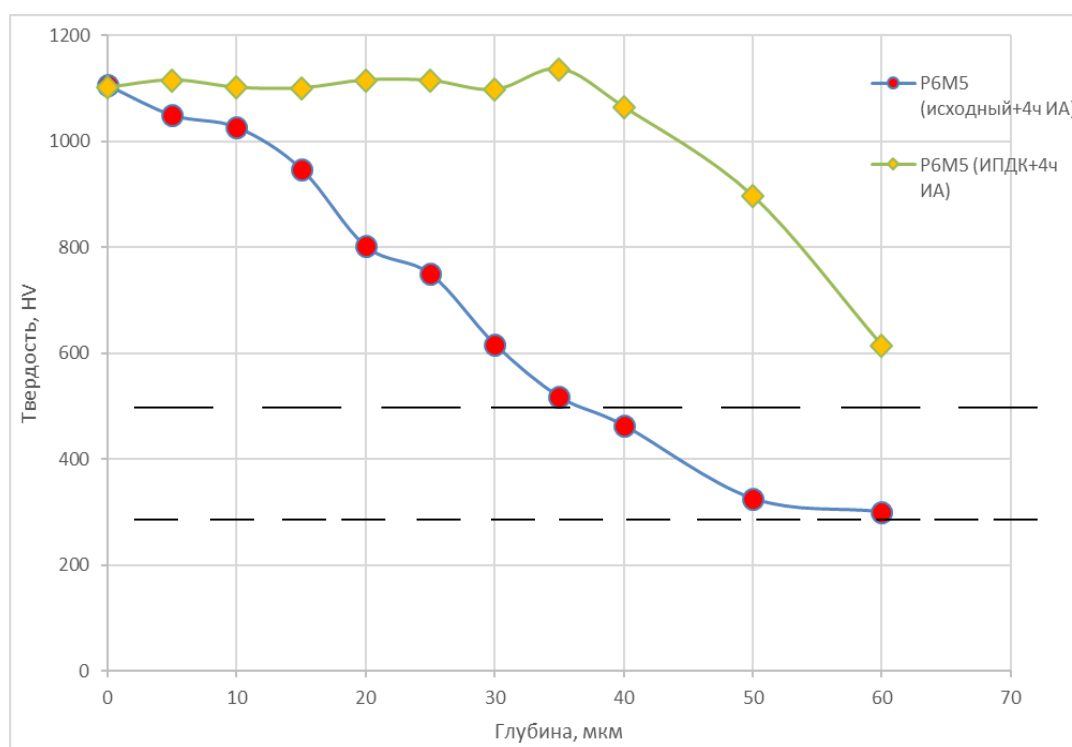


Рис. 5. Распределение твердости на образцах из стали P6M5 с исходной и ИПДК структурами по глубине после ионного азотирования в течении 4-х часов

Разрабатываемая технология будет иметь практическое значение в применении для обработки пластин из быстрорежущих сталей на малых и средних машиностроительных предприятиях, в виду оригинальности и простоты реали-

зации процесса обработки, в отсутствие необходимости использования сложных планетарных приспособлений и составных катодов.

В целях изучения процесса формирования и переноса ионов в тлеющем разряде с магнитным полем были проведены зондовые измерения характеристик плазмы тлеющего разряда, а также сняты вольтамперные характеристики (ВАХ).

Анализ результатов (рис. 6-11) исследований показал, что при наложении магнитного поля при процессе ионного азотирования в плазме тлеющего разряда выяснено, что ВАХ тлеющего разряда с магнитным полем, в отличие от традиционной схемы, имеет более крутой подъем, что указывает на эффективность процессов ионизации.

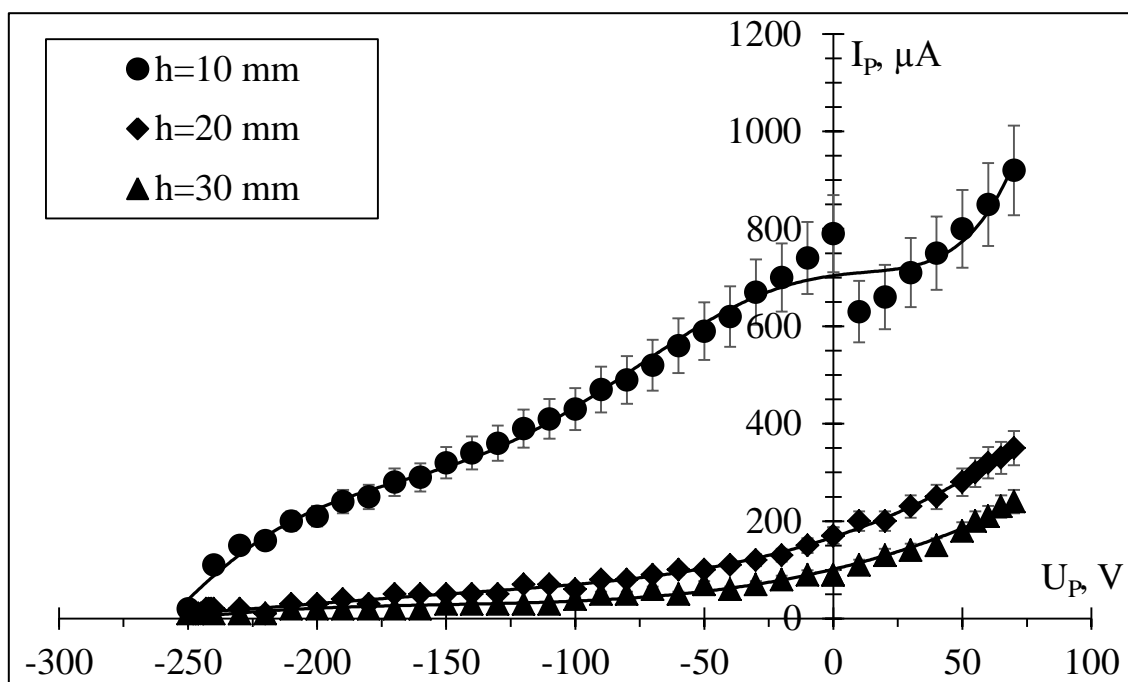


Рис. 6. ВАХ тлеющего разряда на различных расстояниях от катода

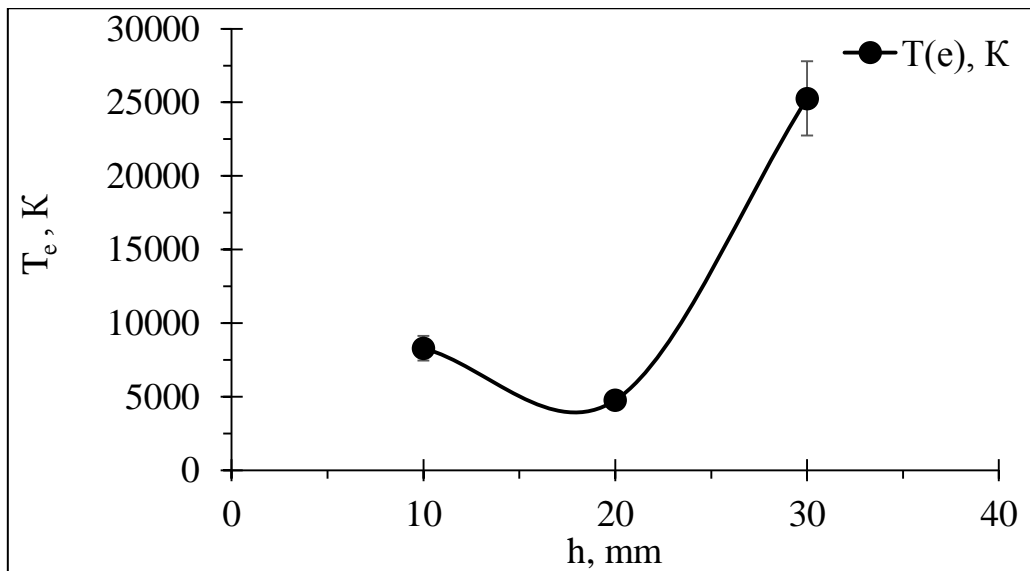


Рис. 7. Радиальное распределение температуры электронов на разных расстояниях от катода

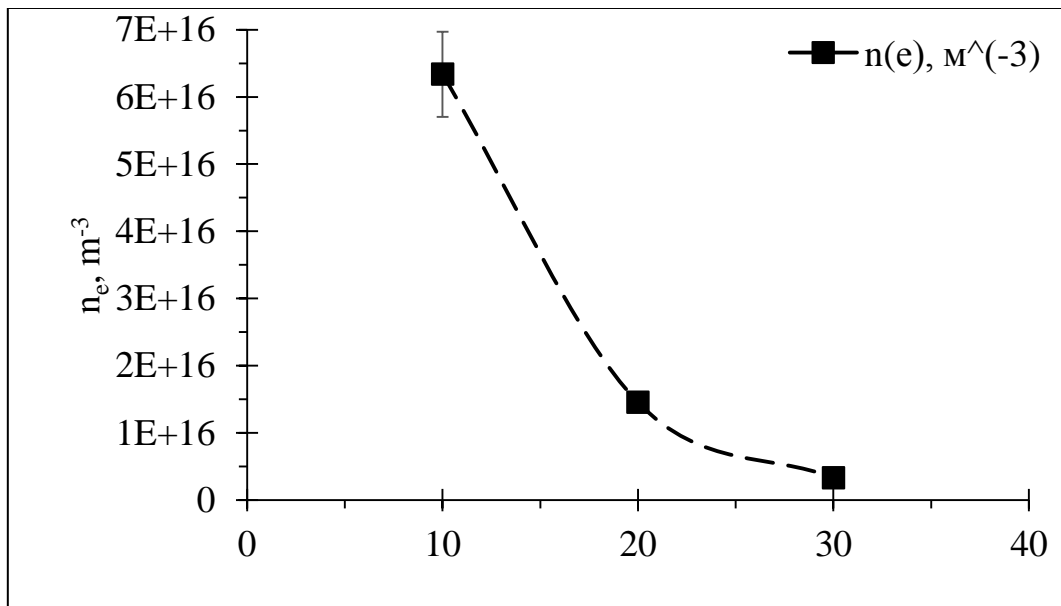


Рис. 8. Радиальное распределение концентрации электронов на разных расстояниях от катода

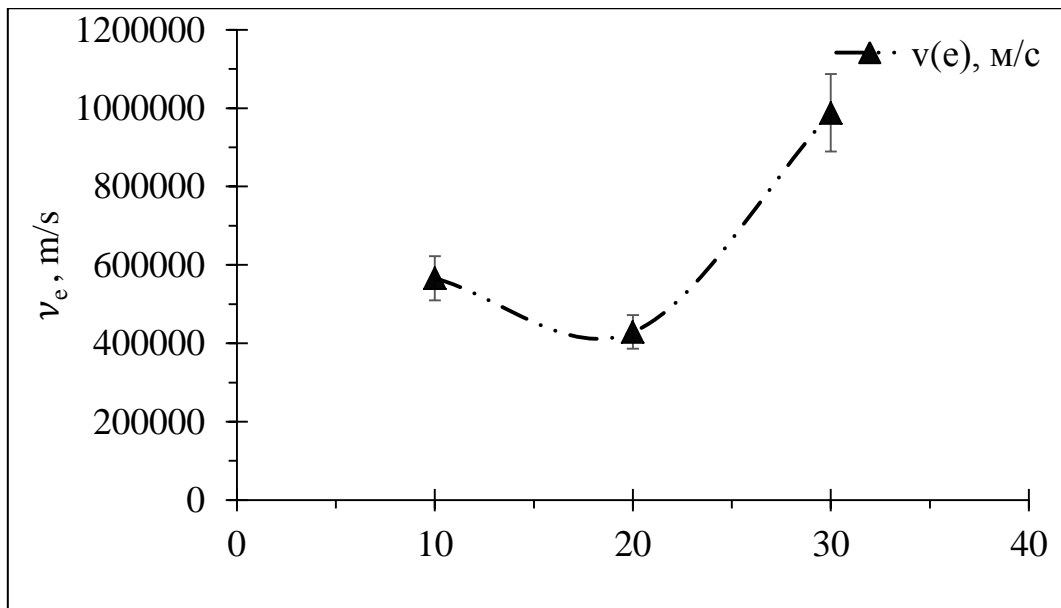


Рис. 9. Радиальное распределение скорости электронов на разных расстояниях от катода

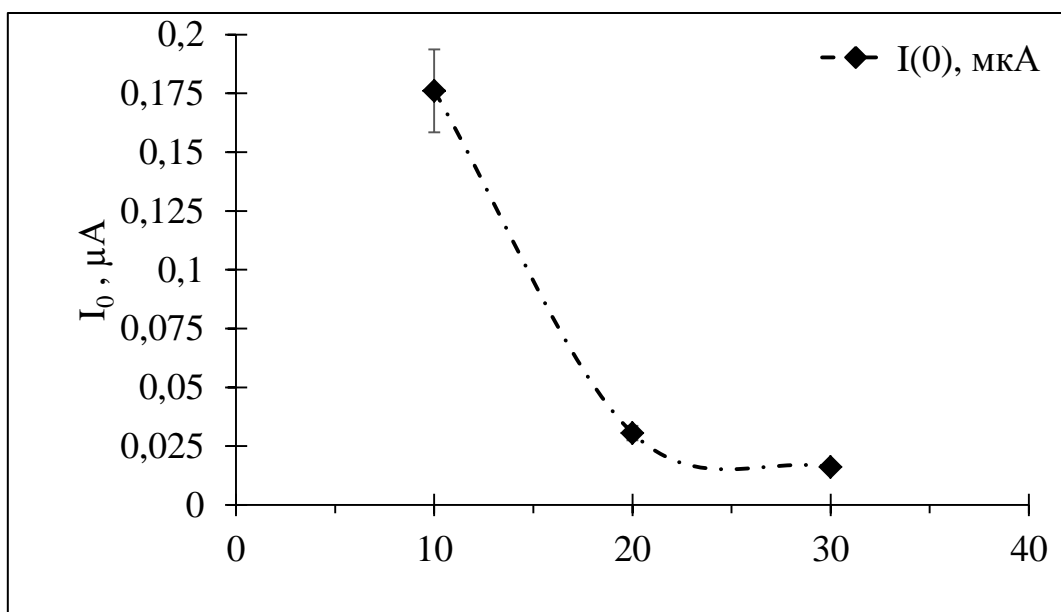


Рис. 10. Радиальное распределение силы тока на разных расстояниях от катода

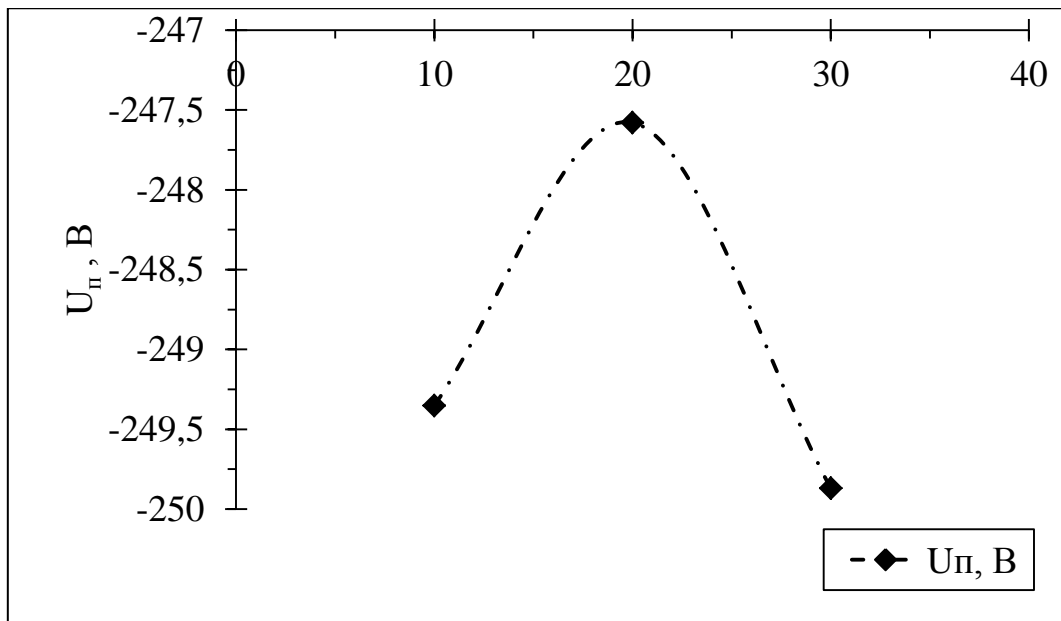


Рис. 11. Радиальное распределение напряжения на разных расстояниях от катода

В настоящей работе впервые:

1. Используется ионное азотирование в тлеющем разряде с магнитным полем в комбинации с интенсивной пластической деформацией кручением при обработке быстрорежущей стали Р6М5;

2. Установлено, что в условиях азотирования в тлеющем разряде с магнитным полем, ИПДК способствует увеличению толщины упрочненного слоя в ~ 3 раза за счет увеличения скорости диффузии и увеличения градиента концентрации азота в зоне обработки, т.к. магнитное поле повышает концентрацию плазмы.

Основные выводы работы:

1. Установлено, что для увеличения плотности плазмы в области катода необходимо создать в пространстве над ним магнитное поле, что позволяет эффективно удерживать электроны. ВАХ тлеющего разряда с магнитным полем, в отличие от традиционного тлеющего разряда, имеет более крутой подъем, что указывает на эффективность процессов ионизации.

2. Установлено, что ионное азотирование в тлеющем разряде с магнитным полем в комбинации с интенсивной пластической деформацией кручением приводит к интенсификации процесса насыщения и обеспечивает высокую кинети-

ческую эффективность процесса по сравнению с традиционными методами азотирования. В результате для стали Р6М5 наблюдается более плавное распределение микротвердости по глубине и происходит увеличение толщины упрочненного слоя в 3 раза, за счет предварительно сформированной ультрамелкозернистой структуры, которая способствует сорбционным процессам диффузии.

3. Экспериментально установлено, что ионное азотирование в тлеющем разряде с магнитным полем в комбинации с ИПДК быстрорежущей стали Р6М5 при температуре 450 °С в течение 4 часов приводит к образованию поверхностного модифицированного слоя, который состоит из α -Fe – азотистого феррита с распределенными нитридными и карбонитридными фазами (CrN , $\text{Cr}(\text{C},\text{N})$, $(\text{Fe}, \text{W})_6(\text{C},\text{N})$), обладающими повышенной твердостью. Нитридная фаза CrN присутствует в упрочненном слое в виде мелкодисперсных частиц.

4. Ионное азотирование в тлеющем разряде с магнитным полем является эффективным способом поверхностного упрочнения быстрорежущих сталей. При этом достигаются высокие значения поверхностной твердости до 1140 НВ.

5. Разработан способ и технологический процесс ионного азотирования, основанный на фазовом модифицировании поверхностного слоя в тлеющем разряде с магнитным полем и ИПДК, который позволяет значительно сократить общее время обработки в 2-3 раза, энергозатраты и расход насыщающих газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водин, Д. В. Ионное азотирование как перспективный метод повышения износостойкости металлорежущего инструмента / Д. В. Водин. — Текст : непосредственный // Технические науки: теория и практика : материалы III Междунар. науч. конф. (г. Чита, апрель 2016 г.). — Чита : Издательство Молодой ученый, 2016. — С. 95-96.
2. Клевцов Г.В, Валиев Р.З, Клевцова Н.А., и др., “Механизмы прочности и разрушения наноструктурированных металлических материалов при единичных видах нагружения,” *Metalloved. Term. Obrab. Met.*, No. 9(747), 54 – 62 (2017).
3. Волокитина И.Е., Курпатов Г.Г., “Влияние исходного структурного состояния на формирование структуры и механических свойств стали при РКУП,” *Metalloved. Term. Obrab. Met.*, No. 12(750), 44 – 50 (2017).
4. Хван А.Д., “Повышение износостойкости стали Р6М5 пластической деформацией в неизотермическом режиме.” *Zagot. Proizvod. Mashinostr.*, No. 11, 21 – 23 (2011).
5. Герасимов С. А., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012 518 с. [V. I.

- Shapovalov, Effect of hydrogen on the structure and properties of iron-carbon alloys, (in Russian). М.: Metallurgiya, 1982].
6. Соловьев А. А., Сочугов Н. С., Оскомов К. В., Работкин С. В. Исследование характеристик плазмы несбалансированной магнетронной распылительной системы // Физика плазмы, Т. 35, № 5, 2009, р. 443–452.
 7. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – Киев: Аверс, 2008, 244 с.

УДК 539.21

А. А. МАСЛОВ

alexey.maslov2011@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Э. Л. ВАРДАНЯН

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПОКРЫТИЯ ИЗ МАХ ФАЗЫ Ti_2AlC , ПОЛУЧЕННЫЕ РЕАКТИВНЫМ КАТОДНО-ДУГОВЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

Аннотация. В конце 1990-х годов было описана новая группа тройных гексагональных карбидов и нитридов с общей формулой $M_{n+1}AX_n$, где $n=1...3$, М – переходный металл, А – элементы А-группы в американской интерпретации периодической системы, Х – углерод или азот. Для МАХ фаз характерно интересное сочетание физических и механических свойств как в макро-объеме, так и в виде тонких пленок. Одним из перспективных методов нанесения этих соединений является катодно-дуговое осаждение в среде реакционного газа. Система Ti-Al-C, особенно соединения Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC являются перспективными материалами для высокотемпературного применения, поэтому отработка синтеза этих фаз в виде покрытий является важной задачей. В работе описан синтез МАХ фаз при помощи катодно-дугового осаждения с дополнительной ионизацией среды в камере.

Ключевые слова: МАХ фазы; жаростойкие покрытия.

Оборудование и материалы

В работе изучалось осаждение тонкой пленки из МАХ фазы Ti_2AlC при помощи катодно-дугового осаждения в среде из смеси реакционного газа (ацетилен) и аргона, поданного через плазменный источник с полым катодом (ПИПК) для оптимизации процессов осаждения. Осаждение проводилось с двух однокомпонентных мишеней из технически чистых Ti и Al в течение 1 часа, затем образцы были отожжены в вакууме при температуре 800 °С в течение 1 часа. В качестве подложки был выбран титановый сплав ВТ1-0. Для изучения полученных покрытий использовались растровый электронный микроскоп JOEL JSM 6490LV и дифрактометр Bruker D2 Phaser

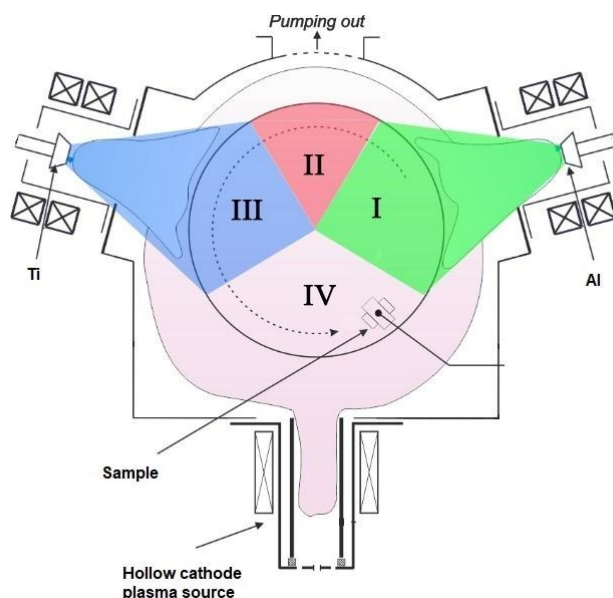


Рис. 1. Схема осаждения тонкой пленки, установка ННВ 6.6-И1

Результаты и обсуждение

Рентгеноструктурный анализ показал, что до отжига на поверхности образцов ожидаемая МАХ фаза не образовалась, из-за недостаточной температуры на подложке образовались только интерметаллиды $TiAl$ и появился титан с отличной от подложки кристаллической решеткой, ярко выражено высокое содержание аморфной составляющей.

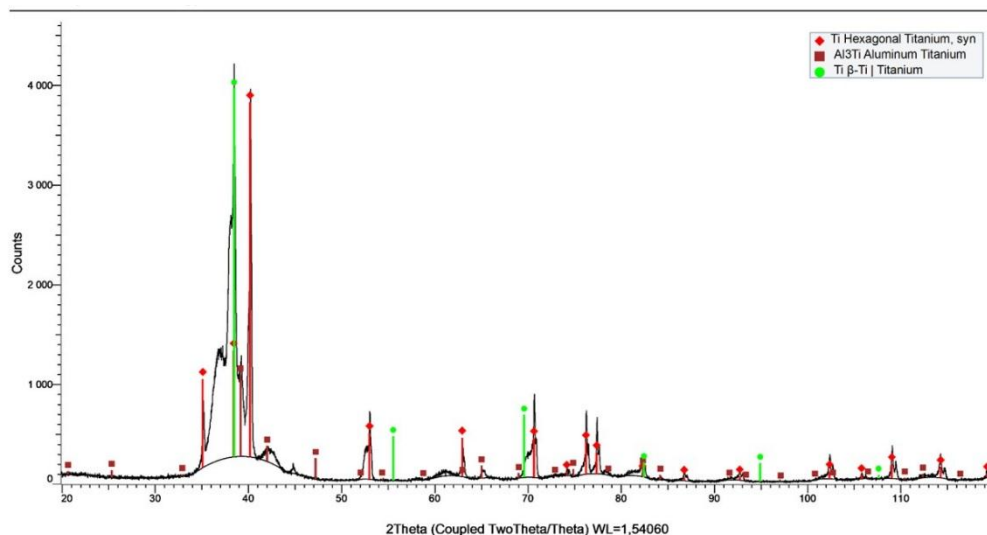


Рис. 2. Рентгенограмма образца после осаждения покрытия

После отжига на рентгенограмме появились ярко выраженные пики карбида TiC , материала подложки (гексагональный титан), интерметаллида $TiAl_3$, а

также МАХ фазы Ti_2AlC и карбонитрида $Ti_2Al(C_{0.5}N_{0.5})$, имеющий характерную для МАХ фаз кристаллическую решетку. Его появление можно объяснить попаданием азота в печь для отжига, однако механизм его формирования без приложения давления, как в работе, описывающей это соединение, остается неясен.

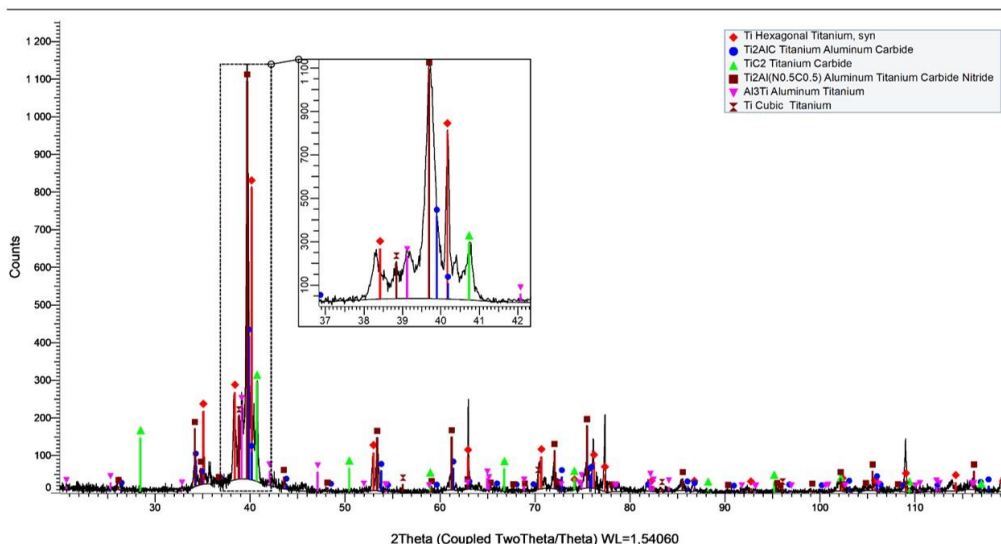


Рис. 3. Рентгенограмма образца после отжига

Icon	Color	Index	Name	ICSD #	Compound Name	S-Q	Formula
		6	PDF 01-077-3482	653278	Titanium	1,7%	Ti
		5	PDF 03-065-5174		Aluminum Titanium	4,0%	Al3Ti
		3	PDF 01-089-2726	43379	Titanium Carbide	6,4%	TiC2
		2	PDF 01-078-3753	165460	Titanium Aluminum Carbide	7,4%	Ti2AlC
		4	PDF 01-081-8104	184884	Aluminum Titanium Carbide Nitride	20,6%	Ti2Al(N0.5C0.5)
		1	PDF 00-044-1294		Titanium, syn	59,9%	Ti

Рис. 4. Результаты количественного фазового анализа

Результаты съемки на растровом электронном микроскопе показали отсутствие пор, трещин и расслоений у покрытия.

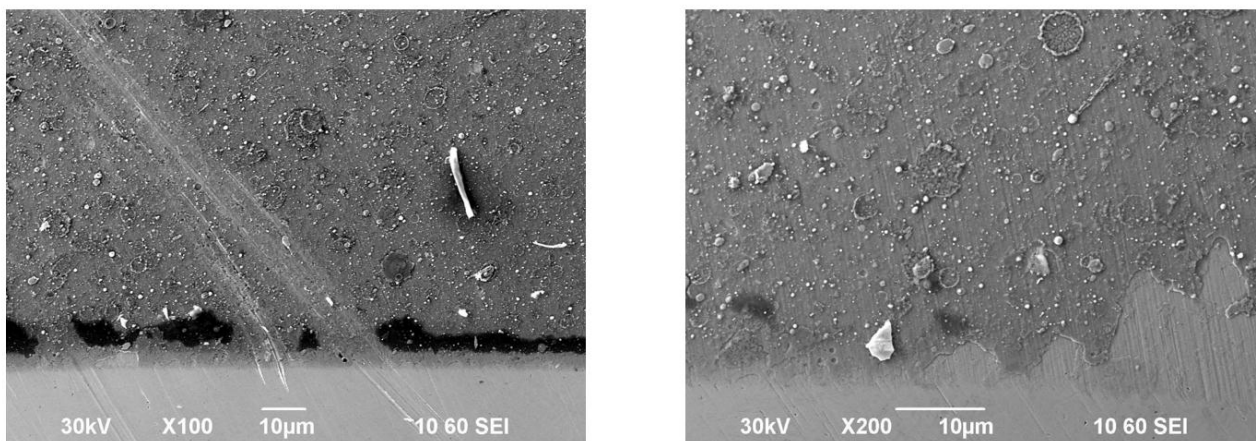


Рис. 5. Снимки покрытия на электронном микроскопе

Выводы

Анализ полученных покрытий показал, что осаждение МАХ фаз методом катодно-дугового осаждения возможен, однако необходимо выяснить причины появления карбонитрида. Количественный анализ позволяет предположить, что исключение этого соединения позволит повысить содержание нужной фазы Ti_2AlC .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eklund P. et al. The $Mn+1AX_n$ phases: Materials science and thin-film processing //Thin Solid Films. – 2010. – Т. 518. – №. 8. – С. 1851-1878. Mahmoudi Z. et al. Synthesis of Ti_2AlC & Ti_3AlC_2 MAX phases by Arc-PVD using Ti–Al target in C_2H_2/Ar gas mixture and subsequent annealing //Ceramics International. – 2020. – Т. 46. – №. 4. – С. 4968-4975.
2. [2] Berger O. The correlation between structure, multifunctional properties and application of PVD MAX phase coatings. Part I. Texture and room temperature properties //Surface Engineering. – 2020. – Т. 36. – №. 3. – С. 225-267.
3. Cabioch T. et al. Structural investigation of substoichiometry and solid solution effects in $Ti_2Al(C_x, N_{1-x})$ compounds //Journal of the European Ceramic Society. – 2012. – Т. 32. – №. 8. – С. 1803-1811.

УДК 378

А. А. НИКОЛАЕВ, А. Ю. НАЗАРОВ

nikolaev.aa@ugatu.su

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Р. Д. АГЗАМОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. Рассматриваются вопросы оценки влияния режимов низкотемпературного легирования в плазме сильноточного дугового разряда низкого давления на микротвердость и фазовый состав титанового сплава ВТ9.

Ключевые слова: титановые сплавы; комплексная обработка.

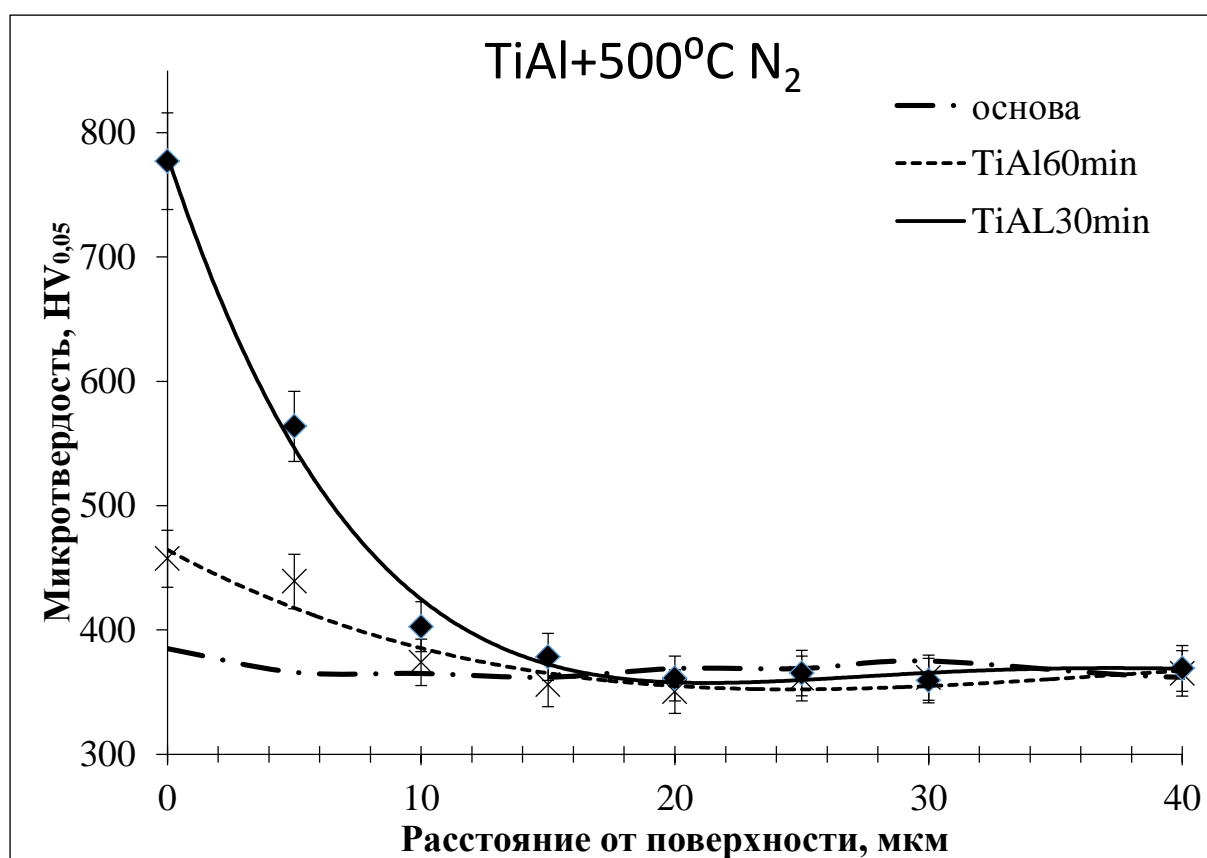
В большинстве случаев контактного взаимодействия самой нагруженной частью детали являются ее поверхностные слои, которые испытывают наибольшие нагрузки [1]. В связи с этим разработка, создание и совершенствование технологий модификации поверхности для повышения эксплуатационных свойств в последние годы находится в научных трендах. Роль, которых значительно возросла в связи с увеличением нагрузок, температур, агрессивностью сред, а разработка и создание новых объемных материалов является весьма дорогостоящим и длительным процессом. Модификацию поверхности для придания ей необходимых характеристик в настоящее время проводят двумя основными методами: во-первых, нанесением слоев другого материала с необходимыми свойствами в виде пленочного покрытия на формообразующую поверхность детали, во-вторых, изменением состава поверхностной зоны металла в результате диффузионных процессов, приводящих к образованию нового структурно-фазового состояния, отличного от основы [2-4].

В настоящей работе исследовали влияние толщины нитридообразующего покрытия на микротвердость, глубину и фазовый состав азотированного слоя. Низкотемпературное легирование проводилось на установке ННВ 6.6-И1, оснащенной двумя дуговыми испарителями (алюминий и титан), плазменным источником с накаливаемым катодом (ПИНК). Для осуществления низкотемпера-

турного легирования, на первом этапе наносилось нитридообразующее покрытие Ti-AL в среде аргона в течении 30 и 60 мин, затем проводилось низкотемпературное азотирование в смеси 50%Ar+50%N₂ в течении 60 минут при давлении 0,5 Па при температурах 500 и 500 °С, оба этапа проводились последовательно в едином вакуумном цикле.

Для определения глубины легирования и физико-механических характеристик были проведены измерения микротвердости по глубине поверхностного слоя. С целью оценки фазового состава были отсняты рентгенограммы на дифрактометре Bruker. Качественный анализ фазового состава проводился с использованием баз данных PDF-2.

Исследование легирование поверхностного слоя титанового сплава ВТ9 нитридообразующими металлами на микротвердость и глубину азотированного слоя показало, что режимы предварительного нанесения покрытия существенно влияют на характеристики азотированного слоя.



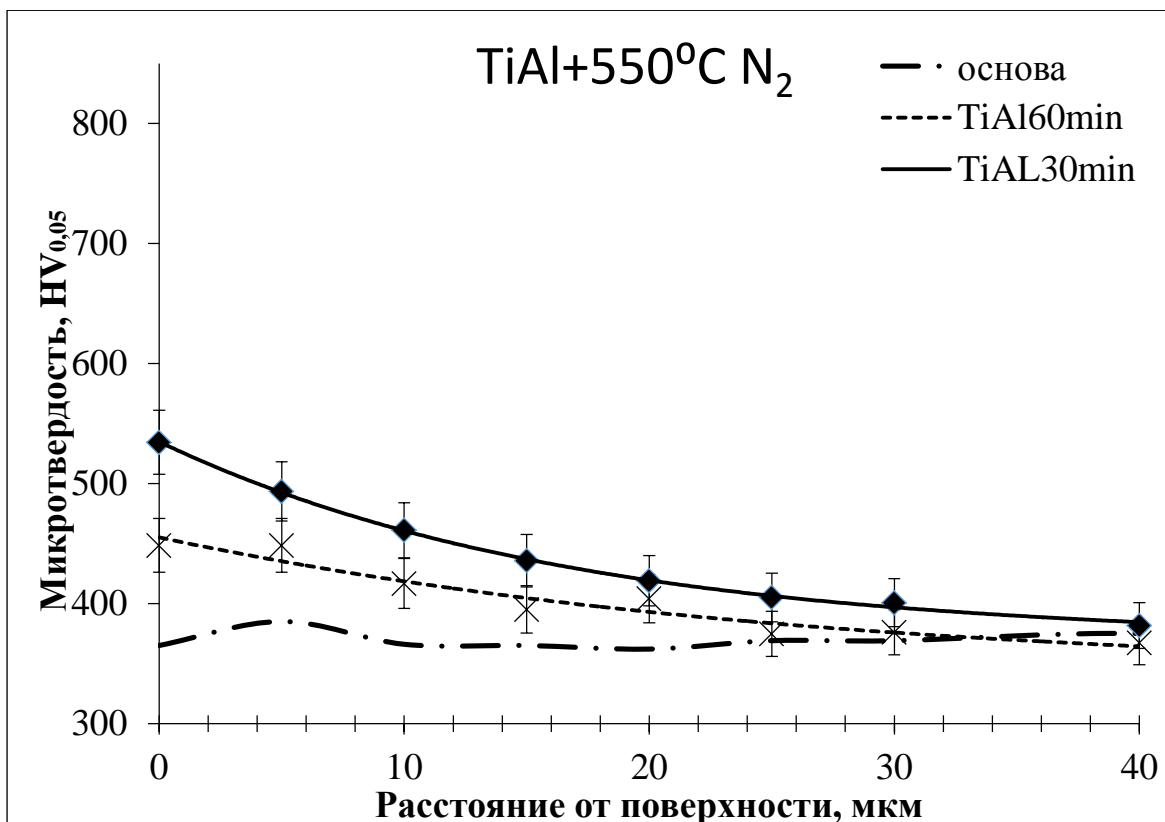


Рис. 1. Распределение микротвердости после низкотемпературного легирования при температурах:
а – 500 °С; б – 550 °С

На рисунке 1 представлены графики распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя титанового сплава ВТ9 в зависимости от режимов напыления и азотирования. Анализ распределения микротвердости показал, что при всех режимах обработки наблюдается прирост поверхностной микротвердости. В случае меньшей длительности нанесения нитридообразующей пленки микротвердость и глубина упрочненного слоя выше, что обусловлено меньшим путем диффузии азота до поверхности сквозь нитридную пленку. Сводная информация о степени упрочнения и глубине модифицированного слоя представлена в таблице 1.

Анализ рентгенограмм показал, что в ходе легирования и последующего азотирования в сильноточном разряде на поверхности формируются нитриды титана, циркония и интерметаллидов системы титан-алюминий. Также смещение пиков альфа-титана влево и их уширение свидетельствует об образовании

твердого раствора азота в альфа титане. Указанные пики характерны для всех видов обработки и отличаются только интенсивностью.

Таблица 1

Изменение фазового состава и физико-механических свойств в зависимости от режимов модификации

Тип обработки	Шероховатость, Ra	Глубина слоя, мкм	Степень упрочнения, %	Фазовый состав
Без обработки	0,182	-	-	$\alpha\text{Ti}+\beta\text{Ti}$
TiAl30min+500° C N2	0,215	13	110	$\alpha\text{Ti} + \alpha\text{Ti}(\text{N}_2) + \beta\text{Ti}(\text{N}_2) + \text{Al-TiN}_2 + \text{Ti}_2\text{AlN} + \text{Ti}_2\text{N} + \text{ZrN}$
TiAl60min+500° C N2	0,225	8	23,5	$\alpha\text{Ti} + \alpha\text{Ti}(\text{N}_2) + \beta\text{Ti}(\text{N}_2) + \text{Al-TiN}_2 + \text{Ti}_2\text{AlN} + \text{Ti}_2\text{N} + \text{ZrN}$
TiAl30min+550° C N2	0,228	35	44,3	$\alpha\text{Ti} + \alpha\text{Ti}(\text{N}_2) + \beta\text{Ti}(\text{N}_2) + \text{Al-TiN}_2 + \text{Ti}_2\text{AlN} + \text{Ti}_2\text{N} + \text{ZrN}$
TiAl60min+550° C N2	0,245	23	21,1	$\alpha\text{Ti} + \alpha\text{Ti}(\text{N}_2) + \beta\text{Ti}(\text{N}_2) + \text{Al-TiN}_2 + \text{Ti}_2\text{AlN} + \text{Ti}_2\text{N} + \text{ZrN}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alqallaf J. et al. Solid particle erosion behaviour and protective coatings for gas turbine compressor blades—A review //Processes. – 2020. – Т. 8. – №. 8. – С. 984.
2. Александров Д. А. Исследование износостойких покрытий на основе многокомпонентных нитридов титана //Труды ВИАМ. – 2020. – №. 4-5 (88). – С. 62-69.
3. Krishna B. V. et al. Functionally graded Co–Cr–Mo coating on Ti–6Al–4V alloy structures //Acta biomaterialia. – 2008. – Т. 4. – №. 3. – С. 697-706.
4. Белоус В. А., Носов Г. И., Клименко И. О. Упрочнение титановых сплавов ионно-плазменным азотированием //Вопросы атомной науки и техники. – 2017.

А. А. РЫЖКИН
Alex.sandr00@bk.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Э. Л. ВАРДАНЯН

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПОЛУЧЕНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. В статье рассматриваются диссипативные, самоорганизующиеся системы и процессы, полученные путем применения аддитивных технологий и технологий нанесения покрытий. Исследуется нанесение металлических покрытий и получение синергетических структур с помощью 3D печати, на основе электроискрового напыления.

Ключевые слова: самоорганизация; синергетика; полиэдрические структуры; диссипативные структуры; электроискровое покрытие; аддитивные технологии; 3D печать.

Аддитивные технологии или технологии 3D печати являются современными и перспективными способами производства изделий различной конфигурации. Традиционные методы производства изделий предусматривают удаление с заготовки лишнего материала, либо использование литьевых процессов и пр., а при аддитивных технологиях происходит послойное формирование изделия с использованием различных технологических методов и устройств. Открывающиеся возможности использования аддитивного построения детали могут быть рассмотрены с точки зрения образования диссипативных структур. Диссипативные структуры - это устойчивое состояние, возникающее в неравновесной среде при условии диссипации (рассеивания) энергии, которая поступает извне [2]. Благодаря диссипативности в неравновесных системах могут спонтанно возникать новые типы структур, совершаться переход от хаоса и беспорядка к порядку и организации, возникать новые динамические состояния материи. К граничным зонам можно отнести полиэдрические построения, наблюдаемые на макро-, микро- и субмикроуровнях.[1]. Примерами таких термодинамически устойчивых полиэдрических структур являются шестиугольная полиэдрическая форма -пчелиные медовые соты.

Таким образом, целью данной работы является: выявление зависимости

режимов прибора, состава металла и площади контакта на получение диссипативных структур.

Методика экспериментов

Для наращивания поверхности, служит 3D принтер работающий на принципе электроискрового спекания, метод не имеет аналогов. В основе этого метода лежит напыление металлического порошка/проволоки на детали (в том числе поврежденные) с немедленной наплавкой с помощью импульсного разряда. Позиционирование «печатной головки» осуществляется по пяти координатам. Дополнительно к основным перемещениям в трех плоскостях, головка обладает функционалом изменять угол наклона и вращаться вокруг вертикальной оси. Таким образом, возможны различные вариации режимов формирования структуры детали и регулярной топографии поверхности.

Результаты

Образцы после нанесения металлического покрытия исследовали на оптическом микроскопе (рисунок 1). Результаты наблюдений и режимов обработки представлены в таблице 1. На основе результатов установлена зависимость параметров мощности, состава наносимого металла на формирование диссипативных структур.

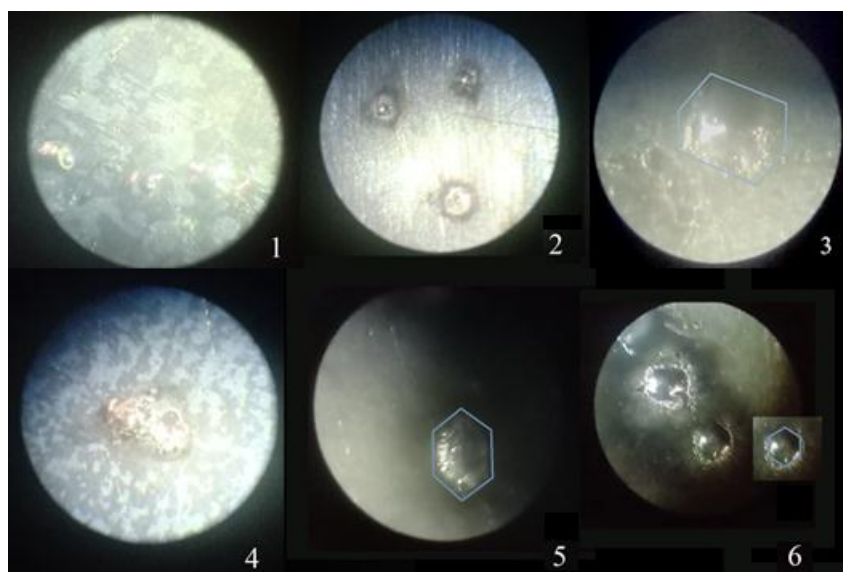


Рис. 1. Опыты по получению полиэдрических структур, при увеличении на микроскопе

Режимы и результаты проведенных экспериментов

Но- мер опыта	Режимы						
	Напря- жение, В	Сила тока, А	Матери- ал под- ложки и процент углерода	Материал наращивания и процент углерода	Форма материала	Результат	Дополни- тельно
0	5	1	сталь 20, 0.2%	сталь 60 ГОСТ 1050- 74, 0.6%	прово- лока 0,5 мм	нестабиль- ный разлет капель ме- талла, появ- ление рако- вин	без ис- пользова- ния газо- вых сред
1	9,3	до 50	сталь 20, 0.2%	сталь 60 ГОСТ 1050- 74, 0.6%	прово- лока 0,5 мм	аккуратные капли, ред- ко брызги	слабая по- дача газа СО2
2	11,8	до 50	сталь 20, 0.2%	сталь 60 ГОСТ 1050- 74, 0.6%	прово- лока 0,5 мм	хорошее прилипание металла, нет брызг	подача СНЗ
3	14,1	до 50	сталь 20, 0.2%	сталь 60 ГОСТ 1050- 74, 0.6%	прово- лока 0,5 мм	обильное ко- личество ме- талла, одна капля похожа на шести- гранник	подача СНЗ
4	14,1	до 50	сталь 20, 0.2%	сталь пружинная 50ХСА, 0,5%	прово- лока 0,4 мм	капля не ровная, но вся в рако- винах	подача СНЗ
5	14,1	до 50	сталь 20, 0.2%	Ст2кп, 0,09%	0,8 мм прово- лока	местами имеются граненные капли	ничего
6	14,1	до 50	сталь 20, 0.2%	Ст2кп, 0,09%	0,8 мм прово- лока	несколько граненных капель внешние очертания похожи на шестигран- ник (больше всего таких гексоганаль- ных капель)	подача СНЗ

Исходя из результатов опыта, получаются такие структуры при малом количестве углерода в наносимом металле и в металле подложки, при высоком напряжении пробитии-образовании дуги и желательном под защитным газом. Сила тока зависела только на толщину проволоки наносимого металла.

Заключение

Наблюдая за результатами, можно сделать выводы о том, что диссипативные структуры встречаются часто и ожидаемо, особенно при воздействии на материал концентрированными потоками энергии. Данная структура интересна для дальнейшего изучения. Получение диссипативных структур путем применения аддитивных технологий 3D печати открывает новые возможности в области исследования подобных построений и позволяет взглянуть по-новому на аддитивные технологии в совокупности с диссипативными структурами и использовать их преимущества на высоком уровне. Сочетание особых свойств материала и технологии изготовления позволяет создать абсолютно уникальные и интересные структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курдюмов С., Малтнецкий Г. Синергетика – теория самоорганизации // Библиотека Мошкова. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://n-tp.ru/tp/in/sts.htm>. (дата обращения: 05.05.2019).
2. Рамбиди Н.Г., Берёзкин А.В. Физические и химические основы нанотехнологий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 456 с.
3. Международный научный журнал “АЭТЕРНА”, номер 6/2019, стр. 35.

УДК 621.9

А. Н. САЙФУЛЛИН

Ags1997@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. С. И. ФЕЦАК

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОД ДИФФУЗИОННУЮ СВАРКУ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация. В данной статье идет речь о технологии обработки рифленой поверхности, для дальнейшего проведения диффузионной сваркой данной поверхности. Приведен один из методов получения необходимой поверхности, подобран инструмент. Показаны примерные результаты по данной задаче.

Ключевые слова: диффузионная сварка; рифленая поверхность; технология нанесения рифленой поверхности.

Диффузионная сварка - это процесс, при котором детали, находясь в тесном контакте при контролируемом давлении, нагреваются до определенной температуры в течении определенного периода времени. Данные условия позволяют посредством местной пластической деформации, создающей максимальное сближение поверхностей и массопереноса (диффузии) атомов между двумя соединяемыми частями детали обеспечить равнопрочность основного материала.

Выделяется два основных вида сварки в вакууме:

1. Свободное деформирование – при данном способе производится постоянная нагрузка, не достигающая предела текучести. Такой способ широко распространен благодаря своей простоте.

Принудительное деформирование – специальное устройство, движущееся с определенной скоростью, обеспечивает создание нагрузки для пластической деформации материала. При этом создаваемое напряжение должно быть выше предела текучести. Такой способ применяется для создания деталей с большими габаритами и большой площадью свариваемой поверхности.

Цель работы: необходимо получить такую поверхность, которая позволит сваривать поверхности двух деталей из разных материалов: сплава алюминия и

титана. Проблема состоит в том, что при обычном диффузионном сваривании сплава алюминия и титана, алюминий покрывается оксидной пленкой и данный процесс практически становится невозможным. Было принято решение создать рифленую поверхность при которой процесс сварки будет протекать наилучшим образом.

Проведя анализ рифленых поверхностей, было решено получить поверхность в виде небольших пирамидок, которые можно сделать с помощью фасочной фрезы.

Технология нанесения рифленой поверхности: Используется фреза фирмы Sandvik Coromant. На рисунке 1 и 2 приведен конструкция фасочной фрезы и ее конструктивные параметры.

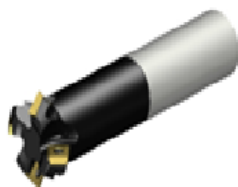


Рис. 1. Фасочная фреза

Мак диаметр резания (DCX) 36,9024 mm	Число режущих элементов (CICT) 4
Типа закрепления (MTP) S	Часть 2 ID интерфейса режущего элемента (CUTINTMASTER) CoroMill 495 -size 09 (495-09T3M-XL)
Мак глубина резания (APMXPCB) 5,4675 mm	Мак глубина резания (APMXPCF) 5,4675 mm
Число эффективных периферийных реж. кромок (ZEFP) 4	Интерфейс со стороны станка (ADINTMS) Cylindrical shank without clamping features - metric: 25.0
Исполнение (HAND) R	Тип подвода СОЖ к инструменту (CNSC) 1: axial concentric entry
Давление СОЖ (CP) 20 bar	Диаметр соединения (DCON) 25 mm
Функциональная длина (LF1) 120 mm	Функциональная длина (LF2) 108,17 mm
Диаметр корпуса (BD) 24,711 mm	Длина корпуса (LB) 62,6518 mm
Крутящий момент (TQ) 1,4 Nm	Демпфирующие свойства (DPC) false
Мак частота вращения (RPMX) 8 100 1/min	Масса элемента (WT) 0,41 kg
Диаметр резания (DC1) 25,5 mm	Диаметр резания (DC2) 25,9686 mm
Главный угол в плане (KAPR1) 45 deg	Главный угол в плане (KAPR2) 45 deg
Sensor embedded property (SEP) 0	Release date (ValFrom20) 2014-02-25

Рис. 2. Параметры фрезы

Технология получения рифленой поверхности:

- заготовка закрепляется на столе;
- подводится фреза к краю заготовки;
- выполняется плунжерное фрезерование.

В результате должны получить пластину с множествами пирамидками.

Примерный результат данного фрезерования показан на рисунках 3 и 4.

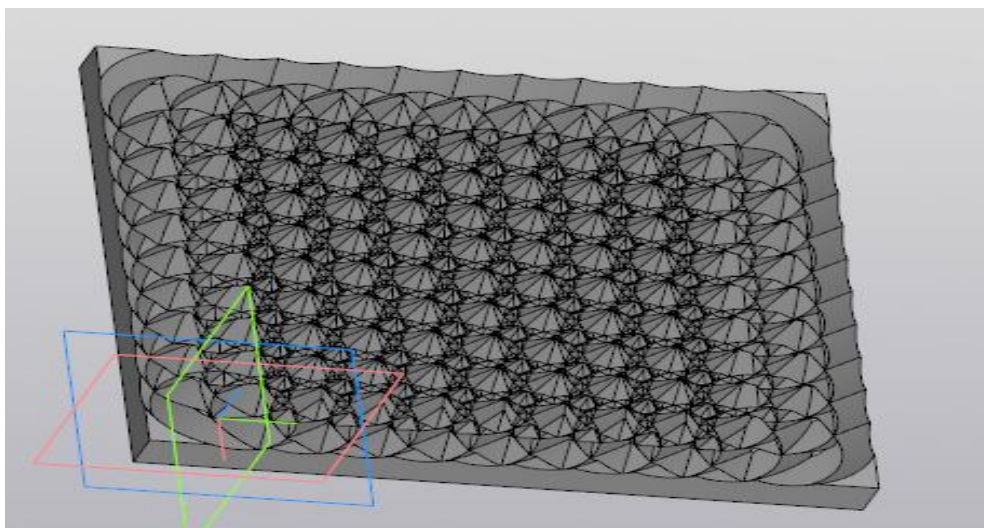


Рис. 3. Модель отфрезерованной поверхности

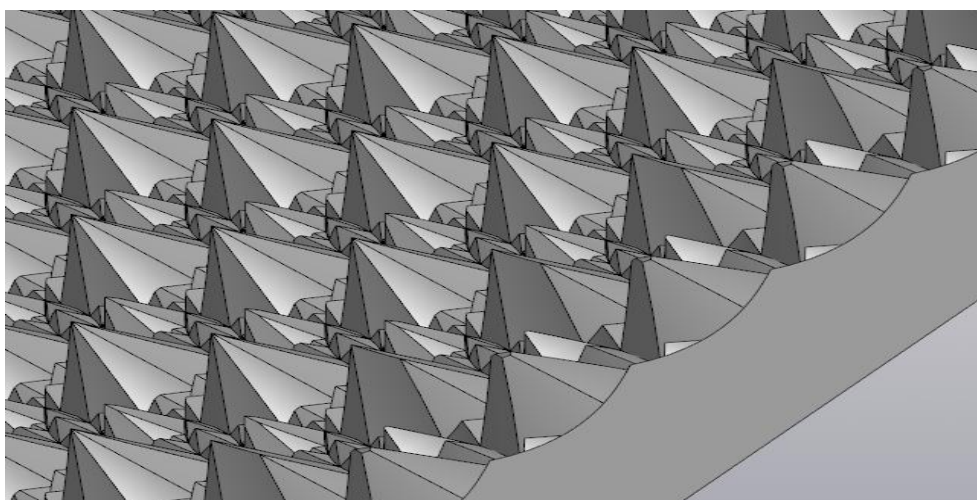


Рис. 4. Модель отфрезерованной поверхности

Полученная рифленая поверхность готова для проведения диффузионной сварки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. Изд. 2-е перераб. И доп. М., “Машиностроение”, 1976 г. 312с. +приложение 1-48 с.
2. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Кокарев В.И., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Под редакцией С.В. Кирсанова. – 3-е изд. М.: Машиностроение, 2007.-528 с.:ил. ISBN 978-5-217-03373-7
3. Каталог инструментов Sandvik Coromant.

УДК 621.7

И. Х. САММАТОВ, П. Р. ТАСТИЕВ, Н. Р. КАРИМОВ

mingazhev.ad@ugatu.su

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. А. Д. МИНГАЖЕВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕНТОЧНОГО СУХОГО ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ ЛОПАТОК ГТД

Аннотация. В работе рассмотрены технологии полирования, основанные на механических, химических, электрохимических методах. Приводятся сведения о возможности обработки деталей сложной формы за счет замены гранул лентой из волокон анионитов. Показано, что наиболее перспективными методами полирования деталей сложной формы, обеспечивающие наилучшее качество поверхностного слоя являются электрохимические методы полирования.

К технологии машиностроения относятся все этапы процесса изготовления машиностроительной продукции. В то же время сложившееся понятие «технология машиностроения» обозначает преимущественно процессы механической обработки заготовок для изготовления деталей и сборки машин. Это связано с тем, что в машиностроении заданные формы детали с требуемой точностью их параметров и необходимым качеством поверхностного слоя достигаются в основном путем механической обработки.

В процессе механической обработки возникают наибольшее число проблем, связанных с выполнением требований к качеству машин, заданных конструктором. Процесс механической обработки реализуется достаточно сложной технологической системой, включающей в себя металлорежущий станок, станочную технологическую оснастку, режущий инструмент и заготовку. Поэтому, основное направление развития технологии машиностроения как научной дисциплины, в первую очередь склоняется в сторону изучения технологии механической обработки со снятием стружки и сборки.

В то же время, широко известно, что финишные операции играют одну из важнейших ролей при формировании эксплуатационных характеристик деталей ГТД. При этом развитие технологий защитно-упрочняющей обработки деталей

ГТД и нанесения защитных покрытий требуют обеспечения высокой физико-механической и микрогеометрической однородности материала поверхностного слоя детали.

Для обеспечения высокого качества поверхности детали, а также для подготовки материала ее поверхностного слоя поверхности к защитно-упрочняющей обработке используются различные технологии полирования, основанные на механических, химических, электрохимических методах [1]. Наилучшие результаты по обеспечению качества поверхностного слоя показали электрохимические методы полирования, в частности способы электролитно-плазменного полирования [2]. В то же время, появившееся в последнее десятилетие технология сухого электрополирования (СЭП), показала на возможности обеспечения более высоких показателей качества поверхности детали [3]. Данная технология основана на ионном уносе материала поверхностного слоя детали при ее обработке в среде гранул-анионитов, содержащих электролит, соответствующий материалу полируемой детали.

Однако, как показали попытки обработки деталей сложной формы, в результате неравномерного омывания гранулами поверхности детали, происходит неоднородный унос материала поверхностного слоя, что приводит к нарушению формы и размеров детали.

В данной работе приводятся сведения о возможности обработки деталей сложной формы за счет замены гранул лентой из волокон анионитов [4]. Замена дискретного, хаотичного взаимодействия гранул с обрабатываемой поверхностью на сплошную ленту, равномерно облегающую всю поверхность пера лопатки, позволяет избежать неоднородного уноса материала поверхностного слоя при полировании.

Принцип ленточного СЭП, поясняется следующей схемой процесса (рис.1). Вокруг всей обрабатываемой поверхности детали, с зазором, эквидистантно профилю пера лопатки располагают охватывающий электрод. В образовавшийся между охватывающим электродом и поверхностью пера вводят

ленту из волокон анионитов, подают потенциал на лопатку и охватывающий электрод и осуществляют полирование детали при непрерывном перемещении ленты.

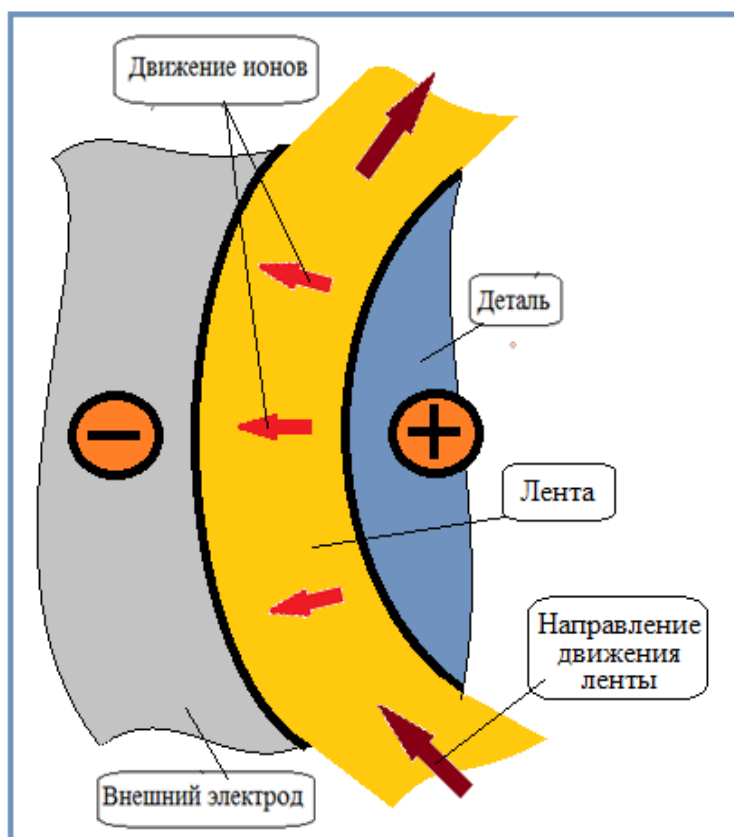


Рис. 1. Схема обработки детали СЭП лентой

Деталь помещают в полость внешнего электрода, повторяющего контуры детали. Между электродом и деталью размещают ленту из электропроводящих анионитов. Между деталью и внешним электродом создают разность потенциалов (с требуемыми параметрами рабочего тока) обеспечивают контакт между деталью и внешним электродом, производят перемещение бесконечной ленты, при ее вибрации. Лента, при обработке проходит циклы полирования и восстановления. Благодаря плотному прилеганию ленты, наличию внешнего электрода, повторяющего заданные геометрические параметры, происходит не только надежная равномерная обработка поверхности, но и обеспечивается финишная размерная обработка мелкоразмерных элементов детали (радиусы закругления входной и выходной кромки).

Лента контактирует с микровыступами поверхности детали и в результате действия электрического поля забирают ионы материала детали и осуществляют перенос ионов материала через ленту к внешнему электроду.

Для реализации данной идеи, была разработана установка для полирования лопаток ГТД методом СЭП с использованием ленты. Применительно для обработки сегмента лопаток установка работает следующим образом (рис.2).

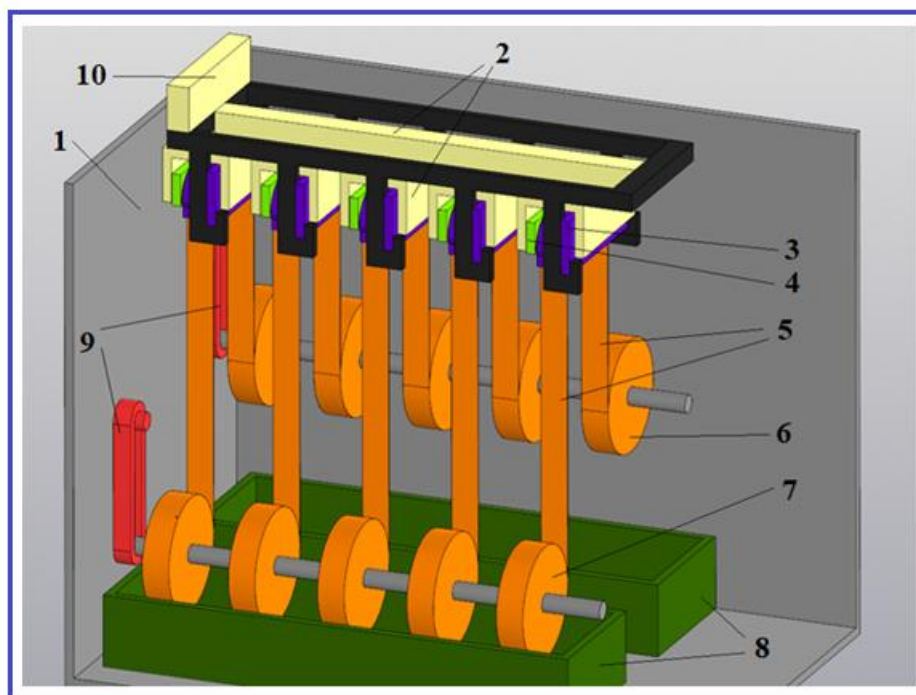


Рис. 2. Общий вид установки для сухого электрополирования лентой (СЭПЛ):
1 – камера установки; 2 – вибратор с прижимом; 3 – стакан электрод;
4 – сегмент с лопатками; 5 – лента из анионитов; 6 – подающая бабина (барaban) с лентой (из анионитов); 7 – принимающая бабина с лентой (из анионитов); 8 – ванны с электродами для восстановления (реставрации) ленты (ванны с электролитом); 9 – привод вращения барабана; 10 – привод вибратора

Подают электрический потенциал на сегмент 4 и охватывающий каждое перо лопатки сегмента 4 электрод, выполненный в виде стакана 3. При необходимости восстановления (регенерации) функциональных свойств ленты 5 принимающая бабина 7 опускается в регенерационную ванну с электродами и электролитом. При перемещении ленты 5 относительно поверхности детали происходит, электрический ток течет между деталью и охватывающим электродом, в результате этого происходит ионный унос материала детали с микровыступов на поверхности пера лопатки.

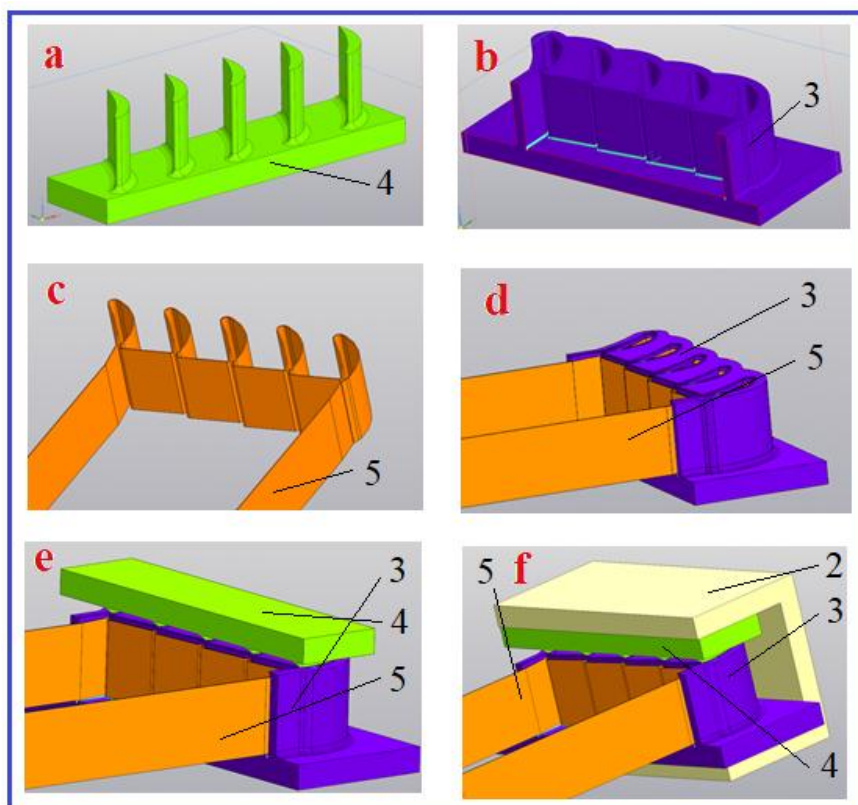


Рис. 3. Схема заправки ленты в зазор между охватывающим электродом и пером лопатки:

a – сегмент с лопатками; b – стакан-электрод; c – лента из анионитов; d – лента заправлена в стакан-электрод; e – сегмент с лопатками, вставляемый в стакан-электрод с лентой; f – сегмент с лопатками, зажимающийся вибратором-зажимом.
2 – вибратор с прижимом; 3 – стакан электрод; 4 – сегмент с лопатками; 5– лента из анионитов

При этом каждая из лопаток сегмента 4 (Рис 3а.) входит в стакан-электрод (рис. 3b), охватывающий с зазором каждую из лопаток сегмента 4. В зазоре между лопаткой и стаканом-электродом заправлена лента 5 (рис 3d), плотно прижимающаяся к поверхности стакана и поверхности обрабатываемой лопатки. Стакан снабжен верхней и нижней направляющими (рис. 3е) ленты 5, позволяющей равномерно прижиматься ленте к обрабатываемой поверхности лопатки и плавно отстраняться от поверхности лопатки на верхнем ее торце (во избежание чрезмерного удаления материала верхней кромки лопатки). Лента 5 на каждом торце имеет гибкий шнур, заправляемый в направляющие стакана. Кроме того, в стакане торец лопатки опирается на выступ, выполненный по размерам и форме, соответствующей сечению верхнего торца лопатки и являющейся ее продолжением. Выступ также способствует защите верхнего торца

лопатки. Для более точной установки лопатки выступ имеет неглубокий (около 0,2–0,3 мм) паз. После того, как сегменты 4 вставлены в стаканы-электроды 3, сегменты 4 прижимаются прижимом-вибратором 2 через эластичную прокладку. Затем включают вибратор 2, запускают ленту 5, которая движется возвратно-поступательно по схеме «два шага вперед – шаг назад», постепенно сматываясь с подающей бабины 6 на принимающую бабину 7 (рис.2).

Выводы

1. В настоящее время наиболее перспективными методами полирования деталей сложной формы, обеспечивающие наилучшее качество поверхностного слоя являются электрохимические методы полирования.

2. В последнее десятилетие технология сухого электрополирования (СЭП), показала на возможности обеспечения более высоких показателей качества поверхности детали по сравнению с другими методами электрохимического полирования.

3. Обработки деталей сложной формы методом СЭП с использованием гранул, в результате неравномерного омывания ими поверхности детали, приводит к нарушению формы и размеров детали.

4. Замена дискретного, хаотичного взаимодействия гранул с обрабатываемой поверхностью на сплошную ленту, равномерно облегающую всю поверхность пера лопатки, позволяет избежать неоднородного уноса материала поверхностного слоя при полировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грилихес С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: теория и практика. Влияние на свойства металлов / С.Я. Грилихес. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленигр. отд-е, 1987. 232 с.
2. Добрынин Д.А. Электролитно-плазменное полирование титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 Труды ВИАМ №7 (55).
3. Патент РФ № 2700226. Способ электрополирования металлической детали. / Мингажев А.Д., Криони Н.К., Мингажева А.А./ Заявка: 2018134887. / 2019.
4. Патент РФ № 2752835. Способ электрополирования металлической детали. / Мингажев А.Д., Криони Н.К./ Заявка: 2021100145. / 2021.

УДК 621

Г. Д. СЕМЕНОВ

Sgd2019-20@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. С. И. ФЕЦАК

Уфимский государственный авиационный технический университет

МАРКИРОВКА ДЕТАЛЕЙ И ГОТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация. В статье говорится о преимуществах лазерной маркировки деталей/заготовок. О видах лазерной маркировки и их преимуществах.

Ключевые слова: лазерная маркировка; лазерная гравировка.

Маркировка деталей и готовых изделий и узлов является одним из наиболее важных процессов в современном промышленном производстве. При отсутствии маркировки затрудняется, а в некоторых случаях становится невозможным, контроль качества и объемов выпускаемой продукции. Кроме того, маркировка необходима производителю продукции с целью продвижения своей торговой марки, а потребителю продукции как гарантия определенного качества и краткая характеристика свойств и параметров продукции. Таким образом, современное производство, реализация и учет продукции требуют высокотехнологичных методов маркировки — гибких, скоростных, компьютеризированных, и не влияющих на работоспособность и потребительские свойства маркируемых деталей, узлов и изделий.

Методы маркировки продукции

В настоящее время существует несколько способов маркировки продукции:

1. Механическая маркировка

Осуществляется за счет механического воздействия на поверхность маркируемой детали — ударом, нажимом или прокалыванием. Этот способ обычно применяют в случае, если наносимая информация не будет меняться со временем, и не содержит большое количество знаков. Либо если необходимо сохранить ее в течении длительного срока.

Несмотря на очевидные преимущества, механическая маркировка имеет ряд существенных недостатков:

- высокая стоимость расходных материалов;
- быстрый износ оборудования;
- высокая вероятность брака.

2. Термическая маркировка

Термическая маркировка наносится путем оплавления или прожига маркируемой поверхности. В основном применяется для обработки металлов. Несмотря на простоту технического процесса, этот метод имеет ряд недочетов:

- сложная настройка оборудования;
- плохое качество;
- высокая стоимость расходных материалов;
- быстрое изнашивание оборудования;
- низкая надежность оборудования;
- высокая вероятность брака.

3. Термотрансферная маркировка

Нанесение изображения осуществляется посредством переноса красящего состава на поверхность маркируемого изделия с локально нагретой ленты. Этот метод отличается простотой обслуживания, а к его недостаткам относятся:

- высокая стоимость расходных материалов;
- высокая стоимость оборудования;
- небольшой ресурс оборудования.

4. Каплеструйная маркировка

Каплеструйная маркировка заключается в нанесении чернил на поверхность маркируемых товаров посредством их разбрызгивания с определенного расстояния. В случае, когда не требуется долговечность нанесенной маркировки, этот способ — один из наиболее предпочтительных за счет простоты в эксплуатации и обслуживании оборудования, а также отсутствия его механического износа.

Несмотря на необходимость покупки расходных материалов (чернил), себестоимость такой маркировки мала и незначительно влияет на конечную стоимость товара.

К сожалению, если маркируемая деталь эксплуатируется в сложных условиях и требуется обеспечить долговечность нанесенной маркировки или защиту от подделки, то такой способ не подойдет.

5. Лазерная маркировка

Заключается в изменении свойств поверхности обрабатываемого материала или его испарении лазерным излучением с высокой плотностью мощности.

Применяется в:

- пищевой;
- ювелирной;
- приборостроительной;
- авиастроительной;
- атомной и других отраслях промышленности.

До недавнего времени лазерная маркировка была очень затратной. Ее могли позволить себе только крупные предприятия, но прогресс не стоит на месте. Оборудование претерпело ряд изменений, и это значительно уменьшило себестоимость процесса.

Преимущества лазерной маркировки

1. Универсальность

Универсальность — одно из главных преимуществ лазерной маркировки.

Ее можно применять для самых разных материалов:

- металлов;
- стекла;
- пластика;
- пищевых продуктов;
- дерева;
- картона и других.

Такое разнообразие доступно благодаря тому, что можно менять параметры обработки в широких пределах, варьируя мощность излучения и скорость сканирования в зависимости от текущих задач.

2. Высокое качество обработки

Лазерная маркировка — бесконтактный способ обработки, поэтому исключена вероятность механического повреждения продукции. А при правильно подобранном режиме можно свести к минимуму термические повреждения даже таких легковоспламеняющихся материалов, как дерево и картон.

3. Простота обслуживания и эксплуатации

Современными устройствами лазерной маркировки может пользоваться даже человек, не имеющий специального образования. Достаточно один раз экспериментально подобрать оптимальный режим обработки. Кроме того, не нужны расходные материалы.

4. Окупаемость

Лазерное оборудование по-прежнему относительно дорогое, особенно если требуются нестандартные решения. Однако низкие эксплуатационные расходы компенсируют этот недостаток: современные волоконные системы имеют высокий КПД, длительный период наработки на отказ (свыше 10000 часов), высокую производительность.

5. Высокая стойкость наносимых изображений

Изображение формируется в приповерхностном слое маркируемого изделия за счет процессов плавления, окисления, испарения или обугливания, поэтому его невозможно удалить без явного повреждения детали. Это обеспечивает надежную защиту от подделки и сохранность маркировки при эксплуатации изделия в сложных условиях.

Таким образом, устройства лазерной маркировки и гравировки позволяют обрабатывать практически любые материалы, являются надежными, компактными и простыми в эксплуатации. Бесконтактный способ обработки, отсутствие расходных материалов и широкие возможности варьирования параметров

воздействия на материал обеспечивает им серьезное преимущество перед другими системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.Г. Горный, Ю.Б. Гречко, М.И. Патров, К.В. Юдин, В.И. Юревич. // Фотоника. 2007. № 3. С. 16-22.

УДК 621.785.532

А. Ф. ТАГИРОВ

ainurtagirov@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Р. Д. АГЗАМОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ИОННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ И В НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОМ СИЛЬНОТОЧНОМ ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

Анотация. В данной работе представлены результаты низкотемпературного ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде и в тлеющем разряде. Приведены результаты измерения микротвердости по глубине модифицированного слоя. Представлены результаты измерения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов после низкотемпературного ионного азотирования.

Ключевые слова: титановый сплав; ионное азотирование; микротвердость; остаточные напряжения.

В настоящее время титановые сплавы занимают важное место среди современных конструкционных материалов в лопаточном производстве [1].

Лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) относятся к одним из ответственных деталей двигателя, определяющие его ресурс и эксплуатационную надежность. В настоящее время для новых поколений ГТД характерной особенностью является замена традиционно используемых дисков с лопатками на моноколеса.

Надежность и долговечность лопаток в значительной степени зависят от физико-химического и структурно-фазового состава, микрогеометрии и остаточных поверхностных напряжений. Остаточные напряжения в поверхностном слое оказывают значительное влияние на сопротивление усталости деталей, работающих в условиях статических и знакопеременных нагрузок [2, 3].

Формирование сжимающих остаточных напряжений на поверхности деталей решается различными методами, например, поверхностной пластической деформации и ионной имплантации. Однако ввиду своих возможностей данные методы не применимы для обработки моноколес вследствие перекрытия межлопаточного пространства.

Использование газового азотирования не представляется возможным, поскольку обработка ведется при температурах 800-900 °С, что приводит к росту зерен и ухудшению свойств основного материала.

В связи с этим, актуальным является применение низкотемпературного ионного азотирования с целью сохранения высокого уровня механических свойств материала и формирования на поверхности остаточных напряжений сжатия.

Методика проведения исследования

В качестве объекта исследования использовались образцы в виде пластин размером 80×10×1 мм из титанового сплава ВТ6.

В работе проведена серия экспериментов по низкотемпературному ионному азотированию титанового сплава ВТ6 в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде (НСДР) и в тлеющем разряде (ТР). Процесс ионного азотирования проводили при относительно низких температурах ($T=450-600$ °С) в течение $t=1$ ч.

Измерения микротвердости по глубине азотированного слоя проводили по методу восстановленного отпечатка в соответствии с ГОСТ 9450-76 с помощью микротвердомера Struers Duramin-1/-2. Глубину упрочненного слоя определяли по кривой распределения твердости до значения твердости исходного материала.

Замер поверхностных остаточных напряжений осуществлялся на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-4».

Результаты исследования

Измерения микротвердости на поверхности образцов показали, что после азотирования, наблюдается увеличение поверхностной микротвердости, которое связано с образованием нитридной пленки, имеющей золотистый оттенок, и наличием модифицированного слоя.

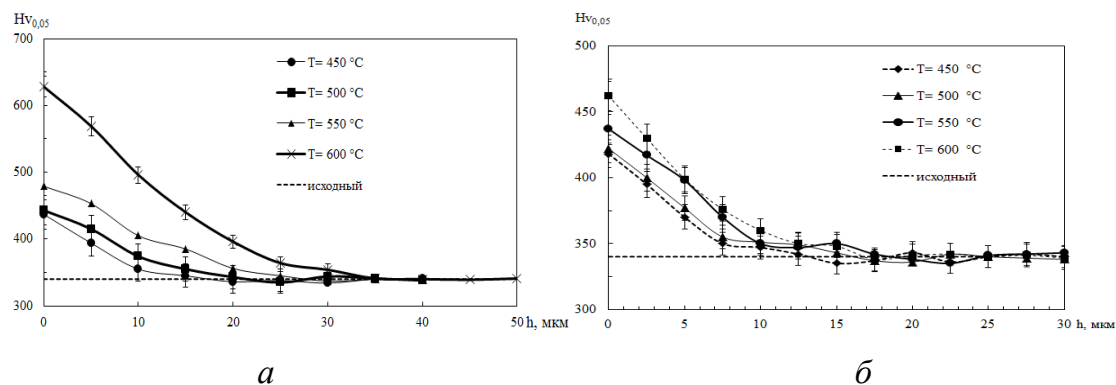


Рис. 1. Изменение микротвердости по глубине азотированного слоя:
а – после обработки в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде;
б – после обработки в тлеющем разряде

Анализ зависимостей показал, что температура ионного азотирования, как в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде, так и в тлеющем разряде оказывает существенное влияние на толщину азотированного слоя. Так после ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде при температуре 450 °С глубина модифицированного слоя составила ~10 мкм. При повышении температуры до 600 °С глубина азотированного слоя увеличивается в 3 раза и составляет ~ 30 мкм. Толщина модифицированного слоя после обработки при температурах 500 и 550 °С составляет 14 и 20 мкм соответственно.

При азотировании в тлеющем разряде повышение температуры с 450°С до 600 °С также приводит к увеличению глубины азотированного слоя с 7 до 17 мкм.

С целью определения влияния низкотемпературного ионного азотирования на поверхностные остаточные напряжения были проведены исследования рентгеноструктурным методом.

В таблице 1 представлены результаты замеров остаточных напряжений в поверхностном слое образцов.

Результаты измерения остаточных напряжений

Температура обработки	Величина остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, кгс/мм ²
Исходный	+7,1±1
после обработки в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде	
450°С	+0,5±1
500°С	+4,9±1
550°С	+5,7±1
600°С	+12,4±1
после обработки в тлеющем разряде	
450°С	-23,7±1
500°С	-19,7±1
550°С	-8,4±1
600°С	-8,3±1

После азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде на поверхности образцов возникают растягивающие остаточные напряжения, которые в дальнейшем могут стать причиной ускоренного зарождения и развития трещин. По результатам таблицы 1 видно, что снижение температуры обработки ведет к уменьшению величины поверхностных растягивающих напряжений.

На поверхности образцов, обработанных в тлеющем разряде, формируются остаточные напряжения сжатия, причем уменьшение температуры приводит к росту их величины. Так после обработки при температуре 450 °С величина остаточных напряжений составляет -23,7±1 кгс/мм².

Выводы

1. На поверхностную микротвердость и глубину азотированного слоя, существенное влияние оказывает температура обработки. Так после ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде при температуре 450 °С глубина модифицированного слоя составила ~10 мкм. Повышении температуры до 600 °С ведет к увеличению слоя в 3 раза и составляет ~ 30 мкм. При азотировании в тлеющем разряде повышение температуры с 450°С до 600 °С также приводит к увеличению глубины азотированного слоя с 7 до 17 мкм.

2. Установлено, что после низкотемпературного ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде на поверхности формиру-

ются растягивающие остаточные напряжения, а после обработки в тлеющем разряде – сжимающие. При этом температура азотирования влияет на знак и величину поверхностных остаточных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н. Титановые сплавы в машиностроении. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1977-247 с.
2. Смыслов А.М., Смыслова М.К., Дубин А.И. О взаимосвязи релаксационной стойкости лопаток компрессора из титановых сплавов с параметрами сопротивления усталости // Вестник УГАТУ, 2012. Т.16, №1 (46). С. 24-29.
3. Смыслов А.М., Смыслова М.К., Дубин А.И. и др. Исследование влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости лопаток газотурбинного двигателя с учетом фрактографических признаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2016, №1(37). С. 121-130.

УДК 621.7

Е. А. ТЯПУНОВА

roza.smitt@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук Р. С. ЕСИПОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. Лазерная химико-термическая обработка открывает широкие перспективы создания материалов с заданными свойствами. Даже сравнивая ЛХТО с обычными методами химико-термической обработки стоит заметить, что разнообразие сочетаний и количество вводимых в поверхностные слои материалов компонентов у обычных методов значительно уступает. Также ЛХТО не требует больших расходов дорогостоящих веществ, придающих покрытию особые свойства.

Ключевые слова: лазерная химико-термическая обработка; диффузия; износостойкость; жаростойкость; твердость.

Суть процесса

Лазерная химико-термическая обработка осуществляется в режиме расплавления, что приводит к достижению необходимых механических свойств. Насыщение легирующими элементами происходит путем диффузии и массопереноса в твердой фазе, из плазмы, и жидкой фазы. Способы нанесения легирующих элементов достаточно разнообразны, но наиболее распространенными являются накатка фольги из легирующего материала, электролитическое или химическое осаждение, напыление, электроискровое легирование, нанесение порошков или обмазок.

Особенности ЛХТО

С помощью лазера сравнительно легко осуществляется процесс азотирования и науглероживания поверхности изделий. Образуются новые фазы и соединения, которые обладают свойствами, позволяющими резко повысить твердость, а также износостойкость материалов в 2...3 раза.

ЛХТО конструкционных и инструментальных материалов проводится с предварительным нанесением химических элементов различными способами. В результате ЛХТО в поверхностном слое образуются диффузионные зоны от 300 мкм до 1 мм, отличающиеся по своим свойствам от основного металла или

сплава и обеспечивающие повышение коррозионной стойкости, жаростойкости и износостойкости.

Износостойкость инструмента может быть значительно повышена при применении традиционных методов химико-термической обработки, в том числе борирования, позволяющего получить наиболее высокие значения твердости поверхностного слоя. Однако существенным недостатком упрочненного слоя является повышенная хрупкость, что приводит к его сколу с рабочих кромок инструмента. Для устранения этого недостатка после диффузионного борирования следует проводить лазерную обработку острых кромок инструмента. При лазерной обработке происходит выравнивание концентрации легирующего элемента по упрочненному слою, обеспечивается более плавный переход твердости от поверхности к основе, что повышает его вязкость.

Перспективы

Перспективным является легирование деталей из углеродистых сталей металлокерамической смесью или твердыми вольфрамкобальтовыми сплавами.

Так же перспективно развитие обработки отверстий в твердых материалах: керамики кварца, алмаза и др. При обработке отверстий в таких материалах появляется опасность появления трещин в зоне обработки растрескивания заготовок и возникновения значительного (толщиной 15-20 мкм) дефектного слоя, который имеет рыхлую, пористую структуру, отличающуюся механическими и теплофизическими свойствами от основного материала.

Виды ЛХТО

Положительны результаты по цементации, азотированию, борированию и диффузионной металлизации железа и стали, а также металлов, не имеющих полиморфных превращений (Al, Ni, Си и др.).

Лазерная цементация быстрорежущей стали не приводит к повышению красностойкости. Структуру цементационного слоя можно регулировать за счет энергии импульса и толщины графитовой обмазки.

Для повышения эффективности и качества цементирования оборудование должно быть с полностью герметичным кожухом к стене, ведь вся работа будет неудачной, если кожух коснется отверстия в какой-либо части. Оптимального качества цементирования достигается за счет предотвращения попадания грязи и некачественной изоляции зон. В основном есть четыре размера в зависимости от их формы. Пружина смычка больше всего подходит для вертикальных колодцев и благодаря своей гибкости может проходить через узкие отверстия. Жесткие типы изготавливаются из чугуна или стальных стержней, что означает, что они идеально подходят для определенного размера.

Полужесткие типы сочетают в себе свойства дуговой пружины и жестких типов. Они могут сжиматься, как дуговые пружины, но иметь высокие восстанавливающие силы, как и жесткие. Лезвия для пресс-формы изготовлены из углеродного волокна и керамических материалов и легко наносятся на поверхность корпуса.

При лазерном азотировании в качестве азотированной среды используется: струя N_2 под давлением, NH_3 или паста на основе карбамида ($CO(NH_2)_2$). При оплавлении в структуре преобладает азотистый мартенсит с высокой твердостью. При лазерном азотировании без оплавления на поверхности образуется неоднородная аустенитная структура.

Однако, этот способ не получил промышленного применения, несмотря на высокие показатели твердости и толщины азотированных слоев, в силу следующих причин: во-первых, в результате поверхностной обработки лазерным лучом полностью изменяется микроструктура модифицированного слоя и значительно увеличивается шероховатость поверхности; во-вторых, малый диаметр луча, и, как следствие, малая область облучения поверхности, а также высокая плотность мощности излучения не могут обеспечить равномерный нагрев поверхности, в результате чего существенно увеличивается вероятность образования поверхностных микротрещин; и, в-третьих, низкий КПД и высокая стоимость лазерного оборудования, в том числе необходимость использования

системы сканирования луча по поверхности изделия, существенно снижают экономический эффект от использования этой технологии.

При диффузионной металлизации поверхность детали насыщается металлами. Это может быть хромирование или алитирование для повышения жаростойкости изделия.

Диффузионное хромирование

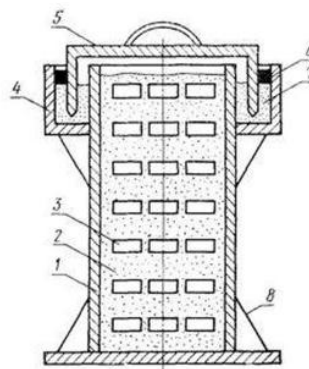
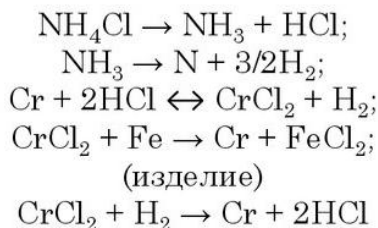


Рис. 1. Общий вид контейнера с плавким затвором для диффузионного хромирования малогабаритных изделий:

1 – корпус контейнера; 2 – хромирующая смесь; 3 – изделие; 4 – корпус контейнера;
5 – крышка контейнера; 6 – натросиликатная глыба; 7 – песок кварцевый;
8 – ребра жесткости

Вывод

Возможность управления процессами, регулируя энергию, частоту следования импульсов и их длительность является неоспоримым достоинством способа лазерного легирования. Изменяя скорость перемещения и число проходов луча по поверхности, можно достаточно просто и точно изменять фазовый и химический состав поверхностных слоев, добиваясь заданных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девойно О. Г., Кардаполова М. А., Калиниченко А. С., Жарский В. В., Василенко А. Г. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки // Минск : БНТУ, 2020. С. 144–145.
2. Самохвалов В.Н. Высокэнергетические методы размерной и упрочняющей обработки: учеб. пособие // Самара: Изд-во Самарского университета, 2019.
3. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах / Б. С. Бокштейн. – М.: Металлургия. – 1978. – 248 с.

А. Р. УРАЗБАХТИН

urazbahtin2016@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, проф. С. И. ФЕЦАК

Уфимский государственный авиационный технический университет

РОБОТИЗИРУЕМЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ СВАРКИ ТРУБ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Аннотация. В данной статье рассмотрены орбитальная сварка трением с перемешиванием. Предлагается установить сварочную головку для сварки трением с перемешиванием, что позволит ускорить процесс сварки и получить более качественный шов.

Ключевые слова: сварка; сварка трением с перемешиванием; орбитальная сварка; сварка труб.

Сварка трением с перемешиванием

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – это процесс соединения деталей в твердом состоянии, в котором для соединения материалов используется тепло трения, выделяемое вращающимся инструментом.

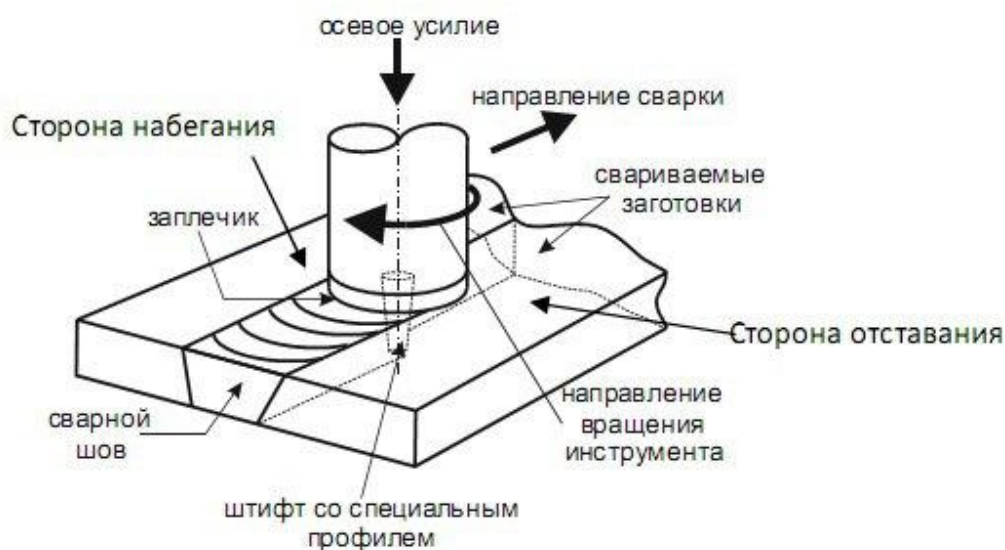


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием

Процесс используется в промышленности в основном для соединения алюминиевых сплавов всех сортов, будь то литье, прокат или экструдирование. Сварка трением с перемещением сваривает стыковые соединения из алюминиевого сплава толщиной от 0,3 мм до 75 мм за один проход, в зависимости от ис-

пользуемого исходного материала, мощности станка и структурной жесткости заготовки.

Другие материалы, например, магний, титан, медь и стальные сплавы, а также пластмассы и композиты с металлической матрицей (ММС) также могут свариваться сваркой трением с перемешиванием. Было доказано, что сваривать можно различные комбинации этих материалов.

Основные сферы применения:

- судостроение, особенно подводный флот, где необходимы полностью герметичные сварные соединения;
- строительство космических объектов и шатлов;
- хранилища и баки для хранения криогенных газов и жидкостей, которые обладают повышенной летучестью.

СТП имеет множество достоинств. Среди них:

1. Нетоксичность. В отличие от других разновидностей, здесь нет горения электрической дуги, благодаря которой расплавленный металл испаряется в зоне сварки.

2. Увеличение скорости формирования шва, благодаря чему снижается время производственного цикла.

3. Снижение затрат на электроэнергию в два раза.

4. Отсутствие необходимости в дальнейшей обработке сварного шва. Инструмент для сварки трением с перемешиванием в процессе работы формирует идеальный шов, не требующий зачистки.

5. Нет необходимости в дополнительных расходных материалах (сварочной проволоки, технических газов, флюсов).

6. Возможность получения соединений металлов, недоступных для остальных видов сварки.

7. Нет необходимости в особой подготовке сварочных кромок, за исключением очистки и обезжиривания.

8. Получение однородной структуры шва без пор, в результате чего становится проще контроль качества, который регламентирован для сварки трением с перемешиванием ГОСТ Р ИСО 857-1-2009.

При многочисленных достоинствах метод сварки трением имеет сопутствующие минусы:

1. Отсутствие мобильности. СТП предполагает соединение неподвижных деталей, жестко закрепленных в пространстве. Это накладывает на оборудование для сварки трением с перемешиванием определенные свойства, такие как неподвижность.

2. Низкая универсальность. Громоздкое оборудование настраивается на выполнение однотипных операций. В связи с этим приспособления для сварки проектируются под конкретные задачи. Например, для сваривания автомобильных боковин на конвейере, и ни для чего другого.

3. Сварочный шов имеет радиальную структуру. В связи с этим при определенных видах деформации или при работе детали в агрессивной среде может накапливаться усталость сварного шва.

Орбитальная сварка

Для монтажа трубопроводов в полевых условиях используется орбитальная сварка. Это автоматизированный процесс соединения бесповоротных стыков. Труба проваривается головкой, закрепленной на вращающемся устройстве. Специальный зажим плотно фиксирует аппарат в рабочей зоне. Сварщик выбирает необходимый режим в зависимости от размера, толщины стенки, химического состава сплава.

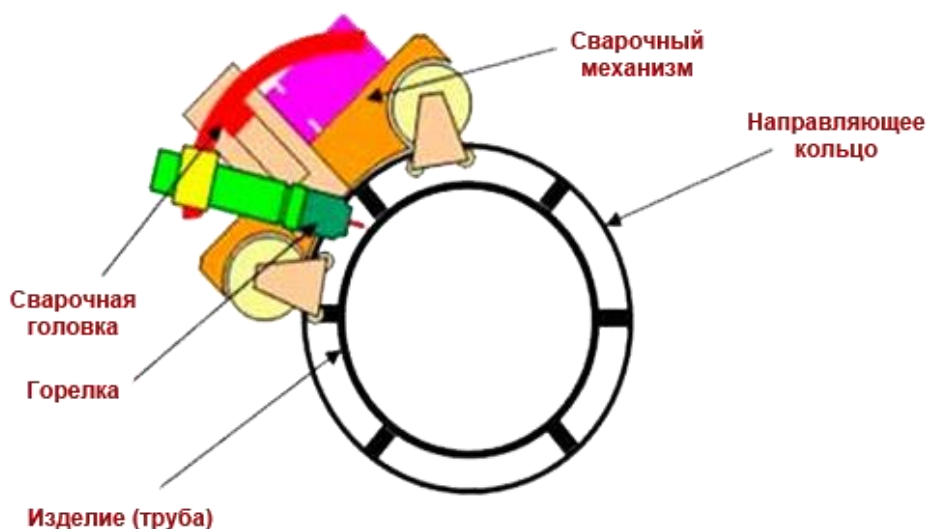


Рис. 2. Схема процесса орбитальной сварки

Автоматы для орбитального соединения трубных стыков используют:

- для линейного монтажа трубопроводов;
- крепления фланцев;
- соединения отрезков трубного проката с отводами, тройниками, другой трубной арматурой;
- сварки трубной доски теплообменников.

Преимущества орбитальной сварки труб:

- снижается риск дефектов шовного валика;
- регулирование дуги снижает область разбрызгивания ванны расплава;
- соединение частей трубопровода, трубных досок можно производить в любом пространственном положении;
- широкий диапазон свариваемых сплавов: углеродистых и легированных сталей, цветного металла;
- возможность работать с присадкой и без нее;
- отсутствие окалины на шве;
- процесс протекает без образования дыма.

Недостатки:

- высокая стоимость аппаратов;
- сложность ремонта и обслуживания оборудования;

– низкая скорость сварки трубопроводов с малыми диаметрами (головка медленно движется по небольшой орбите).

Описание технологии

Сварочная головка аппарата перемещается вдоль неподвижного шва по выставленным направляющим, совершая при этом оборот в 360°, двигаясь по орбите.

Орбитальное перемещение сварочной головки полностью автоматизировано, так же, как и все остальные технологические операции, сопутствующие ему. Длина сварочной дуги устанавливается путем жесткой фиксации головки на нужной высоте над поверхностью трубы.

Процесс орбитальной сварки проходит под контролем процессора, управляемого специальной программой, в которой прописаны все параметры. Настройки программы учитывают изменяющиеся условия сварки при движении электрода по орбитальной траектории.

Сварочный шов по периметру свариваемой трубы делится на секторы, внутри которых параметры процесса имеют постоянное значение. Таким образом, круговой «орбитальный» шов делится на участки горизонтальные (половые и потолочные), вертикальные (с движением вниз и вверх), и участки, находящиеся под некоторым углом.

Орбитальная головка для сварки трением с перемешиванием

Предлагается концепция устройства для соединения концов стальных труб орбитальной сваркой. За основу предлагаемой концепции орбитальной головки взят патент РФ № 2627066 от 03.08.2017 [1]. Концы труб имеют кромки под сварку. Предлагаемый роботизированный модуль состоит из устанавливаемых с обеих сторон на соответствующих концах труб в зоне места сварки и прочно зажимаемых направляющих оснований. Направляющие основания имеют по центру круглую выемку с радиальным отверстием для пропускания и размещения по центру свариваемых труб. Зажимные элементы для зажима направляющих оснований с концами труб прочно присоединены к внешним

сторонам направляющих оснований. Рама для размещения сварочных и контрольных инструментов с возможностью орбитального перемещения установлена с возможностью вращения на внутренних сторонах направляющих оснований. Она имеет угол поворота, по меньшей мере, на 360° вокруг концов труб.

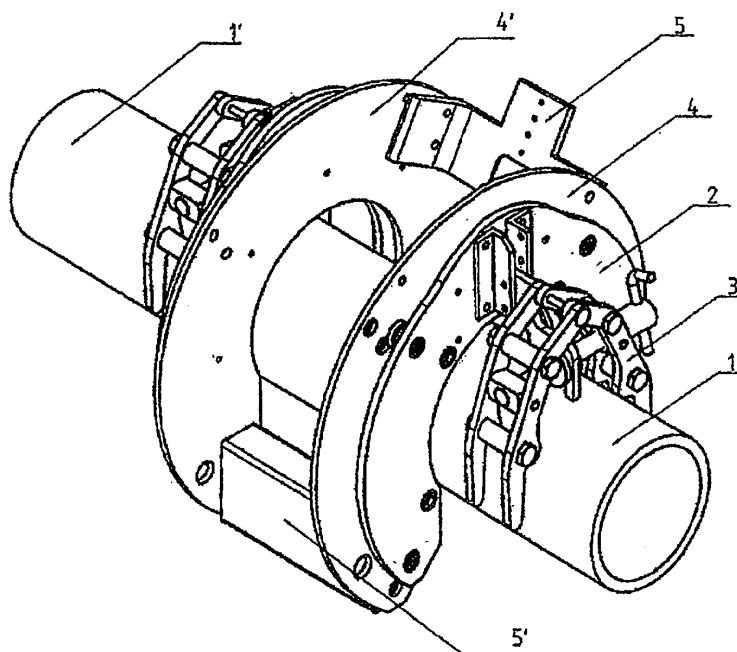


Рис. 3. Роботизированный модуль для соединения концов стальных труб орбитальной сваркой:

1, 1' – соединяемые трубы; 2 – направляющие основания; 3 – зажимные элементы;
4, 4' – поворотные хомуты; 5, 5' – присадочные приспособления

Роботизированный модуль имеет сварочную головку для сварки трением с перемешиванием.

Выводы

В данной статье рассмотрены орбитальная сварка трением с перемешиванием. Предлагается установить сварочную головку для сварки трением с перемешиванием в роботизированный орбитальный модуль, что позволит ускорить процесс сварки и получить более качественный шов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2627066, 03.08.2017. Устройство для соединения концов стальных труб орбитальной сваркой // Патент России № 2627066. 03.08.2017. Бюл. № 22. / КОКС, Ханс-Юрген(DE), Винкельс, Йорн(DE), Кайтель, Штеффен(DE), и др.

УДК 004.942

Н. С. ХАСАНОВ

hasanov.n.99@mail.ru

Науч. руковод. – А. Ф. ШАЙХУЛОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

СОВРЕМЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ

Аннотация. Цифровые производственные модели («цифровые двойники») являются многоуровневыми макетами как технологических и производственных процессов, так и отдельных технологических операций, оперируют огромным количеством производственных объектов (оборудование, рабочие места сотрудников, сервисные службы и т. д). Функционирование таких моделей требует учета и анализа огромного количества разнородных данных. Это одна из причин, почему цифровое производство в современном значении этого слова потребовало значительного развития технологий, прежде чем стать возможным

Ключевые слова: «умная» модель; «умный» цифровой двойник (Smart Digital Twin); «умная» цифровая тень (Smart Digital Shadow); «цифровая сертификация»; «Фабрики Будущего».

В нынешних условиях как конечный продукт, так и производственные процессы постоянно усложняются, а возрастающая скорость изменений приводит к быстрому устареванию любой комбинации инженерных, технических и технологических компетенций. Напротив, глобализация рынков, постоянно растущая глобальная конкуренция, использование инноваций, требующих интенсивных научных исследований, появление очень сложных научно-технических проблем, требующих от отрасли ускорения темпов развития, чрезвычайно короткие циклы разработки, более низкие цены и более высокие цены [1, 2].

Чтобы соответствовать этим требованиям, мир переживает глобальную цифровую трансформацию экономики в цифровую экономику, высокотехнологичную отрасль в цифровую индустрию, цифровые платформы, цифровых двойников (цифровых двойников) реальных вещей / продуктов (DT1) и производственные процессы (DT2) находятся в стадии разработки, а также разрабатываются экспертные системы. Интеллектуальные помощники в качестве первого этапа развития в направлении использования искусственного интеллекта, автоматизации, робототехники и интеллектуализации промышленности, пере-

ход к киберфизическим системам. реализованы, объединены физический и цифровой (виртуальный) миры. Эти глобальные изменения сопровождаются созданием новых бизнеспроцессов на всех уровнях.

Одним из обязательных условий организации цифрового производства (Индустрия 4.0) на промышленном предприятии является создание единого информационного пространства, в котором все автоматизированные системы управления предприятием, а также промышленное оборудование могут быстро и эффективно обмениваться информацией. Обязательным условием является использование системы MDC (machine data collection), которая позволяет собирать данные о работе всех производственных объектов (оборудования, рабочих мест ключевого персонала, сервисных служб и т. Д.) Для целей управления производством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровков А. И., Рябов Ю. А., Марусева В. М. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. М.: Департамент корпоративного обучения Московской школы управления СКОЛКОВО, 2018.
2. Блехман И. И., Мышкис А. Д., Пановко Я. Г. Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов. Киев: Наукова думка, 1976.

УДК 629.7.05:629.735.7

Е. О. ЦЕЛИЩЕВ

ztselishchev@mail.ru

Науч. руковод. – д-р техн. наук, доц. В. С. ФЕТИСОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

СИСТЕМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ КВАДРОКОПТЕРА С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Аннотация. В статье выполнена обзорно-аналитическая работа, в которой: описаны разновидности существующих систем и изучены их достоинства и недостатки; проведен краткий анализ используемых датчиков; разработана схема системы предотвращения столкновений квадрокоптера с препятствиями.

Ключевые слова: система; квадрокоптер; инфракрасный датчик; ультразвуковой датчик; микроволновой датчик; предупреждение столкновений.

В наше время существует определенное количество различных систем предупреждения столкновений квадрокоптеров с препятствиями:

1. Система от компании DJI
2. Altitude Angels
3. FlightHorizon PILOT

Первая система представляет собой полноценную платформу для БПЛА с системой предупреждения столкновений, а также комплектом программных средств разработки.

Основными компонентами системы являются стереокамеры и ультразвуковые датчики. С их помощью система может обнаруживать объекты на расстоянии до 20 метров вокруг объекта и автоматически стабилизировать его над землей. Система совместима с любым роботизированным устройством от компании DJI и может быть подключена через разъем USB или UART.

Важнейший недостаток описанной выше системы – это невозможность ее применения к БПЛА произведенных другими компаниями. Также стоит упомянуть, что данная система довольно дорогостоящая, что для многих пользователей может быть довольно существенным недостатком.

Altitude Angels. Система оборудована CRS для разрешения конфликтов. Первым компонентом является «стратегический» режим, который организует планирование маршрута до взлета аппарата. При этом он предлагает изменения маршрута и времени взлета, чтобы снизить риски столкновения с другими регулярными рейсами. Как только БПЛА оказывается в небе, система переключается в «тактический» режим. Она сканирует окружение на наличие других беспилотных летательных аппаратов, коммерческих авиалайнеров и частных самолетов, оснащенных транспондерами.

Если CRS выявляет какой-либо риск столкновения, он выполнит корректировки маршрута в середине полета, которые обеспечат безопасное расстояние от других пользователей воздушного пространства или обведут БПЛА вокруг любого ограниченного воздушного пространства. Это руководство по уклонению направляется пилоту-человек, но при отсутствии реагирования CRS сам выполняет корректировку движения.

Недостатки: сложность системы, стоимость.

FlightHorizon PILOT – это комплексное решение для полностью автономных беспилотных летательных аппаратов, позволяющее им обнаруживать, отслеживать и прогнозировать другие летательные аппараты, а также отправлять команды уклонения на бортовой автопилот для быстрого и эффективного самоотделения от конфликтов.

Устанавливается как независимый бортовой компьютер или как программный модуль на основном бортовом компьютере на борту беспилотного летательного аппарата и использует сигнал от авиационного транспондера (ADS-B) на беспилотном летательном аппарате для отслеживания в режиме реального времени всех других близлежащих летательных аппаратов.

Недостаток: использование серверной части для контроля воздушного пространства.

Анализируя все вышеописанные системы предлагается следующее: между приемником и полетным контроллером установить модификаторы управля-

ющих ШИМ-сигналов, которые могли бы изменять их при срабатывании датчиков передней, задней и боковых сторонах корпуса квадрокоптера (D1-D4).

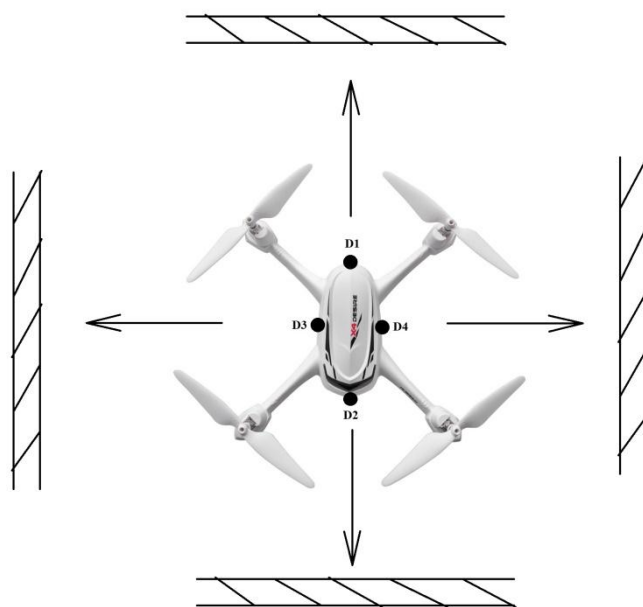


Рис. 1. Установка датчиков на корпусе коптера

Для предотвращения столкновения с препятствиями, находящимися спереди, сзади, слева и справа, достаточно модифицировать сигналы только двух каналов управления, а именно Pitch и Roll.

Например, при появлении препятствия спереди, датчик D1 будет выдавать логическую «1», и это должно быть использовано для уменьшения длительности импульсов в ШИМ-последовательности канала Pitch на 10-20%, или примерно на 50-100 мкс. Это приведет к замедлению квадрокоптера и позволит обойти препятствие. Действие будет продолжаться пока на выходе датчика D1 будет сохраняться логическая «1».

Аналогично, при появлении препятствия в поле действия датчика D2 выходной сигнал установится в логическую «1», тогда необходимо увеличить длительность текущих управляющих импульсов в канале Pitch.

Соответственно, для канала Roll, то есть для датчиков D3, D4, модификатор импульсов должен работать аналогично.

Описанному принципу действия соответствует следующая структурная схема:

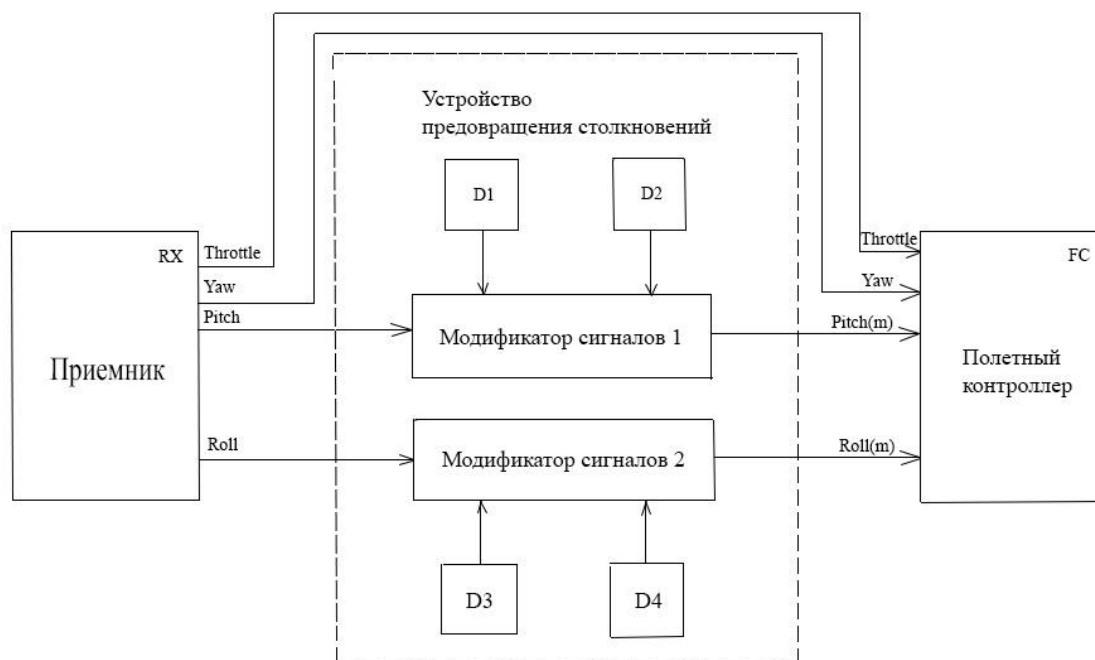


Рис. 2. Структурная схема принципа действия устройства

Модификаторы сигналов 1 и 2 совершенно аналогичны и могут быть выполнены на одной плате.

В соответствии с принципом действия модификатора разработана следующая функциональная схема:

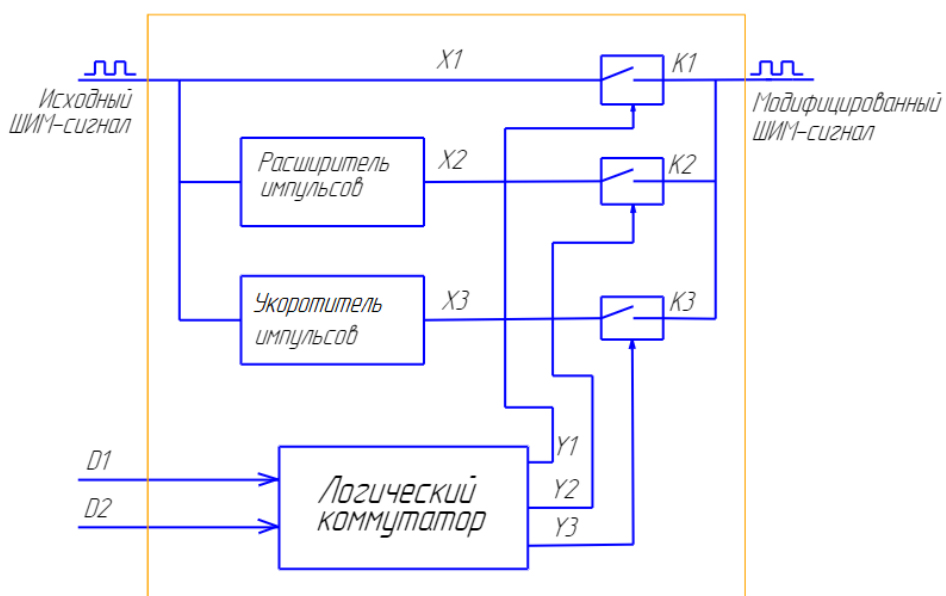


Рис. 3. Функциональная схема модификатора сигналов

Основу схемы составляют расширитель и укоротитель импульсов, описываемые далее, и логический коммутатор, работающий в соответствии со следующей таблицей истинности:

Таблица 1

Таблица истинности логического коммутатора

D1	D2	Y1	Y2	Y3
0	0	1	0	0
1	1	1	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	0	1

Таким образом, управляющие сигналы Y1-Y3 вырабатываются в зависимости от состояния датчиков D1-D2 и коммутируют ключи K1-K3. Ключи K1-K3 показаны условно, - в реальной схеме их роль выполняют логические элементы.

Дальнейшей детализацией функциональной схемы является логическая схема модификатора. В ней представлены абстрактные логические элементы, безотносительно типа логики и типов микросхем.

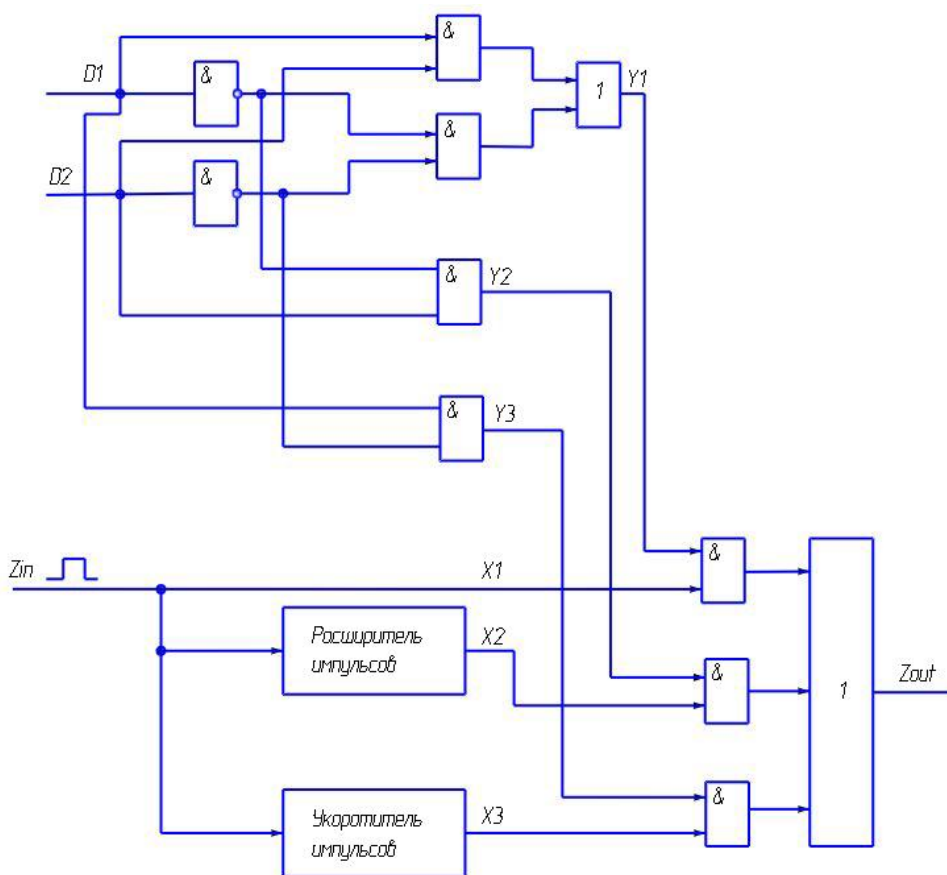


Рис. 4. Модификатор ШИМ-сигнала приемника. Логическая схема

На схеме показаны входы с датчиков D1, D2, так как схема соответствует модификатору 1 (канал Pitch). Для канала Roll схема будет идентичной, кроме входов. Вместо D1, D2 будут D3, D4.

В настоящее время для укорачивания прямоугольных импульсов по длительности широко применяются ИМС. Принцип работы укоротителя с использованием интегральных микросхем основан на временной задержке перепада напряжения.

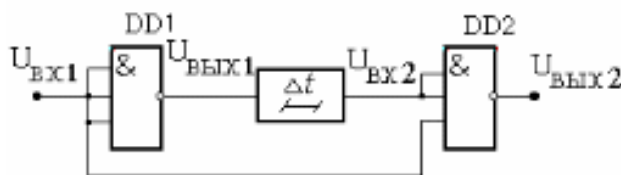


Рис. 5. Структурная схема укоротителя импульсов

Для изменения формы импульсов по длительности используются различные методы, но в интегральной микросхемотехнике в основном нашли распространение два:

- схемы ждущих мультивибраторов;
- формирователи с использованием триггера и элемента задержки.

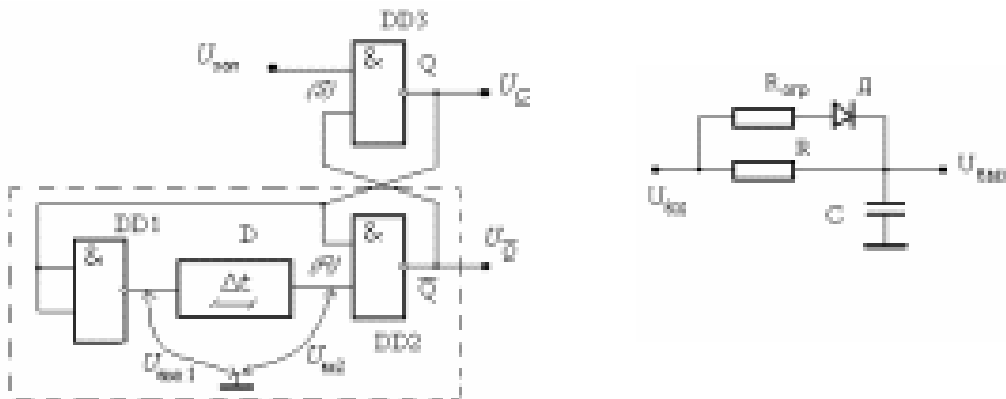


Рис. 6. Схема расширителя импульсов по длительности с RS-триггером и элемент задержки с RC-цепью

Такие схемы по основным показателям лучше ЖМВ с времязадающей цепью в петле обратной связи. Основу расширителя составляет формирователь прямоугольных импульсов с элементом задержки (эта часть схемы на рисунке обведена пунктиром).

Вывод

Подбор элементной базы системы занимает очень важное место в создании данного прибора, как и везде в приборостроении. Каждый элемент должен соответствовать требованиям относительно остальных составляющих, от напряжения питания до условий эксплуатации. Также к серьезным вопросам создания данного устройства относится программная часть аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расширители импульсов на ИЛЭ [Электронный ресурс] / Онлайн справочник «StudFiles» - Режим доступа: <https://www.studfile.net/preview/9726438/>.
2. Укоротители импульсов на ИЛЭ [Электронный ресурс] / Онлайн справочник «StudFiles» - Режим доступа: <https://www.studfile.net/preview/9726438/>
3. Система Guidance [Электронный ресурс]: VIDO – Режим доступа: <https://vido.com.ua/article/12354/ekspierimentalnaia-sistiema-dji-pomoghaiet-priedotvrashchat-stolknovieniia-dronov-zalogh-biezopasnogho-vozdushnogho-dvizhieniia/>
4. Клаассен К. Б. Основы измерений. Датчики и электронные приборы [Текст] пер. с англ: учебное пособие / Воронов Е. В., Ларин А. Л. – Долгопрудный: Интеллект, 2008
5. FlightHorizon: система предупреждения столкновения БПЛА [Электронный ресурс] / Онлайн журнал «ДроноМания» - Режим доступа: <https://dronomania.ru/news/9246.html>
6. Altitude Angel запускает первую в мире систему предотвращения столкновений для беспилотников [Электронный ресурс] / Онлайн-портал «Российские Беспилотники» - Режим доступа: https://russiandrone.ru/news/altitude_angel_zapuskaet_pervuyu_v_mire_sistemu_predotvrashcheniya_stolknoveniy_dlya_bespilotnikov/

И. В. ЧЕКЕНЕВ

i.chekenev@priuralnadzor.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук Р. М. САЛИХОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 0,4/6/10 КВ

Аннотация. Внедрение автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии является одним из основных технических мероприятий, направленных на снижение коммерческих потерь электроэнергии. Все уровни АСКУЭ связаны между собой каналами связи. Быстрым и недорогим способом модернизации каналов передачи данных без снятия и замены счетчиков электроэнергии является использование «умной» крышки.

Ключевые слова: автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии; «умные» крышки; потери электроэнергии.

Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии — это совокупность технического и программного обеспечения, позволяющая производить измерение и вычисление количества потребления (выработки) электроэнергии субъектами оптового рынка.

Внедрение автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ), как для промышленных, так и для бытовых потребителей является одним из основных технических мероприятий, направленных на снижение коммерческих потерь электроэнергии.

АСКУЭ позволяет автоматизировать:

– учет потребления электроэнергии с высокой точностью, используя соответствующие технические средства с высоким классом точности – электронные электросчетчики, измерительные трансформаторы тока и напряжения;

– сбор, хранение и передача данных о потребленной электроэнергии посредством УСПД;

– ведение единого системного времени с возможностью его корректировки;

– передачу полученных данных на другие информационные уровни – в базы данных серверов как самого объекта учета (АРМ энергетика и диспетче-

ров), так и энергосбытовых организаций (АРМ инспекторов, системных инженеров) и общереспубликанских центров хранения и анализа данных, используя при этом различные каналы и среды для передачи данных, в том числе и резервные;

– анализ и выработку управляющих воздействий на другие технические средства, при выходе учитываемых параметров электроэнергии за заданные пределы (лимиты).

В структуре автоматизированных систем контроля и учета энергоресурсов, можно выделить четыре уровня:

– первый уровень – первичные измерительные приборы (ПИП) с цифровыми выходами, осуществляющие непрерывно или с минимальным интервалом усреднения измерение параметров энергоучета потребителей (потребление электроэнергии) по точкам учета (фидер, труба и т.п.);

– второй уровень – устройства сбора и передачи данных (УСПД), специализированные измерительные системы или многофункциональные программируемые преобразователи со встроенным программным обеспечением энергоучета, осуществляющие в заданном цикле интервала усреднения круглосуточный сбор измерительных данных с территориально распределенных ПИП, накопление, обработку и передачу этих данных на верхние уровни;

– третий уровень – персональный компьютер (ПК) или сервер центра сбора и обработки данных со специализированным программным обеспечением АСКУЭ, осуществляющий сбор информации с УСПД (или группы УСПД), итоговую обработку этой информации как по точкам учета, так и по их группам - по подразделениям и объектам предприятия, документирование и отображение данных учета в виде, удобном для анализа и принятия решений (управления) оперативным персоналом службы главного энергетика и руководством предприятия;

– четвертый уровень – сервер центра сбора и обработки данных со специализированным программным обеспечением АСКУЭ, осуществляющий сбор

информации с ПК и/или группы серверов центров сбора и обработки, данных третьего уровня, дополнительное агрегирование и структурирование информации по группам объектов учета, документирование и отображение данных учета в виде, удобном для анализа и принятия решений персоналом службы главного энергетика и руководством территориально распределенных средних и крупных предприятий или энергосистем, ведение договоров на поставку энергоресурсов и формирование платежных документов для расчетов за энергоресурсы.

Все уровни АСКУЭ связаны между собой каналами связи. Быстрым и недорогим способом модернизации каналов передачи данных без снятия и замены счетчиков электроэнергии является использование «умной» крышки.

«Умная» крышка представляет собой клеммную крышку со встроенным внутри модемом передачи данных. Варианты встроенных модемов различаются технологией передачи данных:

Крышка предназначена для работы в составе трехфазного счетчика электроэнергии стороннего производителя (Меркурий, Энергомера и проч.). Крышка устанавливается на место, предназначенное для штатной крышки, закрывающей клеммы счетчика. При этом места пломбировки остаются неизменными. Крышка производит автоматический периодический опрос параметров счетчика и последующую передачу данных на базовую станцию.

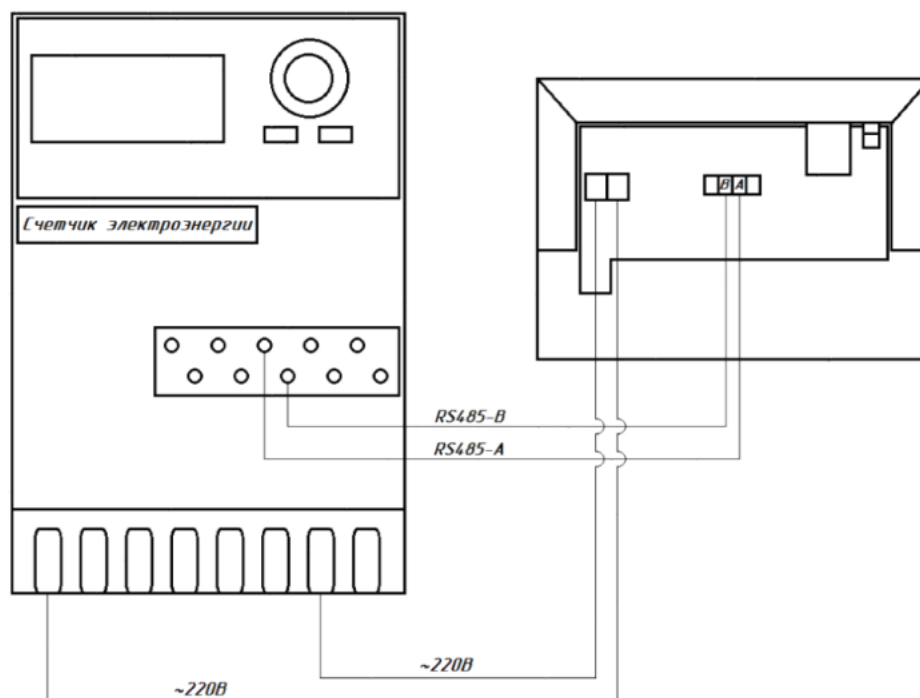


Рис. 1. Схема подключения крышки к счетчику и питания

Таким образом, для модернизации существующей системы АИИС КУЭ не требуется закупки новых счетчиков и модемов передачи данных, а требуется только смена клеммных крышек на «умные» крышки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сенько, В.В. Автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии: учеб. пособие/В.В. Сенько: – Изд. 2-е. – Тольятти: ТГУ, 2011 –
2. Воротницкий В. Э., Калинкина М. А., Апрыткин В. Н. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях энергоснабжающих организаций// Энергосбережение. 2000 № 3
3. Воротницкий В. Э., Апрыткин В. Н. Коммерческие потери электроэнергии в электрических сетях. Структура и мероприятия по снижению// Новости электротехники. Информационно-справочное издание. 2002 № 4
4. Гельман электроснабжением промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984.– 255 с.
5. Красник, В. В. 102 способа хищения электроэнергии / В. В. Красник. М.: ЭНАС. 2010 160 с.

СЕКЦИЯ 2.6 СВАРОЧНЫЕ, ЛИТЕЙНЫЕ И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.74

Н. М. АНТИПИН

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О. Б. ДЕМЕНОК

Уфимский государственный авиационный технический университет

АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СТЕРЖНЕЙ ПУСТОТЕЛЬНЫХ ЛОПАТОК

Аннотация. В работе рассматриваются огнеупорные материалы и анализ огнеупорных материалов используемых при изготовлении отливок газотурбинных двигателей, анализ дефектов при изготовлении стержней пустотелых лопаток. Качество отливок непосредственно зависит от огнеупорных материалов, которые влияют на качество стержней, стержни должны иметь гладкую поверхность и без дефектов, так как они точно повторяют внутреннюю полость отливки, через которую проходят определенное количество газов для ее охлаждения. Таким образом, рациональный выбор огнеупорных материалов является актуальной задачей при изготовлении стержней.

Ключевые слова: огнеупорные материалы; жаропрочность; литье по выплавляемым моделям (ЛПВМ); дефекты; стержень.

Огнеупорные материалы – изделия на основе минерального сырья, отличающиеся способностью сохранять свои свойства в условиях эксплуатации при высоких температурах, и которые служат в качестве конструкционных материалов и защитных покрытий.

Литье по выплавляемым моделям (ЛПВМ) - способ получения отливок в многослойных оболочковых неразъемных керамических формах, изготавливаемых с использованием выплавляемых, выжигаемых или растворяемых моделей однократного использования.

В качестве эксплуатационных свойств огнеупорных материалов определяются комплексом химических, физико-химических и механических свойств.

Основное свойство огнеупорных изделий – огнеупорность, то есть способность изделия выдерживать, противостоять, не расплавляясь, действию высоких температур.

Классификация огнеупорных материалов:

Выбор огнеупорного материала зависит от требований и качества предъявляемые к отливки (точности, шероховатости, механической прочности).

В авиационной промышленности используют огнеупорные материалы на основе окислов и их соединений.

Таблица 1

Материал и химическая формула	Физико-химические свойства				Рекомендуемая поверхность пылевидного материала м ² /кг
	Химические	t _{пл} , °С	ρ, кг/м ³	Коэффициент линейного расширения 1/°С	
Окислы					
Кварц кристаллический SiO ₂	Кислый	1713	2650	13,7*10 ⁻⁶	400-600
Кварц плавленный(аморфный) НКС SiO ₂	Кислый	1713	2200	0,5*10 ⁻⁶	400-600
Электрокорунд белый αAl ₂ O ₃	Амфотерный	2050	3900	8,6*10 ⁻⁶	600-700
Окись магния(магнезит)MgO	Основной	2400	3870	13,5*10 ⁻⁶	500-600
Соединения окислов					
Дистен-силлиманит Al ₂ O ₃ *SiO ₂	Слабо кислый	1545	3250	-	500-600
Циркон ZrO ₂ *SiO ₂	Слабо кислый	1800	4570	5,1*10 ⁻⁶	600-800
Высокоглиноземистый шамот 3Al ₂ O ₃ *SiO ₂	Амфотерный	1600	3000	5,3*10 ⁻⁶	-
Муллит 3Al ₂ O ₃ *2SiO ₂	Амфотерный	1810	-	(4,5-5,7)*10 ⁻⁶	-

Так как стержни изготавливаются из огнеупорных материалов к огнеупорным материалам предъявляются ряд требований:

1. Отсутствие химического взаимодействия с жидким металлом.
2. Низкий коэффициент термического расширения.
3. Низкая стоимость и не дефицитность.
4. Обладать достаточной прочностью.
5. Выдерживать динамические и статические напоры расплава, не деформировать при заливке, затвердевания и охлаждения отливки.

Керамическими называют негасотворные стержни без связующих или с неорганическими связующими. Такие стержни применяют для получения в отливках протяженных узких сложных полостей или отверстий, например в по-

лых охлаждаемых лопатках с щелями, сужающимися до 0,4 мм, в цельнолитых колесах со сложным профилем лопаток, в сложных корпусных отливках.

Стержни со знаками изготавливают в металлических полированных стержневых ящиках, затем прокаливают или сушат, контролируют их точность и проч-ность, после чего устанавливают в прессформы для изготовления удаляемых моделей. После образования оболочек на блоках моделей и удаления последних стержней в полости оболочковых форм зафиксированы знаками.

В области верхних знаков между стержнем и оболочкой предусматривают термические зазоры, чтобы при прокаливании оболочек последние не препятствовали расширению стержней, а также чтобы расширение оболочек при нагреве не вызывало растягивающих напряжений и трещин в стержнях. Зазоры предусматривают вокруг верхнего знака стержня и на его торце, величину их рассчитывают и выполняют путем наклеивания сгорающей при прокаливании пленки или слоя выплавляемого модельного состава.

Свойства керамических стержней:

У стержней должна быть гладкая поверхность – высота микронеровностей $Rz < 30$ мкм; низкий коэффициент линейного расширения – менее $2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ в интервале температур 20 – 1100 °С; стойкость к тепловым ударам до температуры 1250 – 1300 °С; точность размеров – в пределах менее плюс, минус 0,15% номинальных; высокая прочность – $\sigma_{\text{и}} > 15$ МПа; высокая пористость (влагоемкость) – 25 – 30 %; низкая (сравнительно) плотность – 1200 – 1700 кг/м³. Стержни тем же не должны деформироваться при заливке оболочек расплавом. Деформация под нагрузкой 0,4 МПа не должна происходить при температуре ниже 1250 °С. Стержень не должен взаимодействовать химически со сплавом или его окислами; удаление его из полостей отливок должно осуществляться без особых затруднений механическим, электрохимическим, химическим способами. Материалы для изготовления керамических стержней должны быть недефицитными и по возможности недорогими.

В процессе изготовления стержней могут возникать различные дефекты как вздутие, припек, скол, наплывы, незаливы, пятна от пластификатора, изменение длины стержня.

Дефекты зависят от стержневой массы и от содержащимся компонентам, которые входят в стержневую массу.

Для анализа дефектов, которые возникают в процессе изготовления стержней, была проделана исследовательская работа.

Целью данной работы является: Анализ дефектов при изготовлении стержней пустотелых лопаток ГТД. При выполнении данной задачи необходимо решить следующие подзадачи:

1. Изготовить опытную партию стержней из трех масс;
2. Прокалить их в печи ПГ-30;
3. Провести визуальный контроль на наличие дефектов.

В процессе визуального контроля были выявлены ряд дефектов: вздутие, припек, скол, наплывы, которые перечислены в таблицы 2 (в скобках обозначено количество стержней). В результате анализа дефектов, которые перечислены в таблице 2 построена гистограмма.

Таблица 2

Дефект	Вздутие	Припек	Линейные	Скол	Наплывы
Массы					
1 (36)	28	35	0	4	35
2 (36)	14	34	0	8	21
3 (36)	32	34	0	4	29

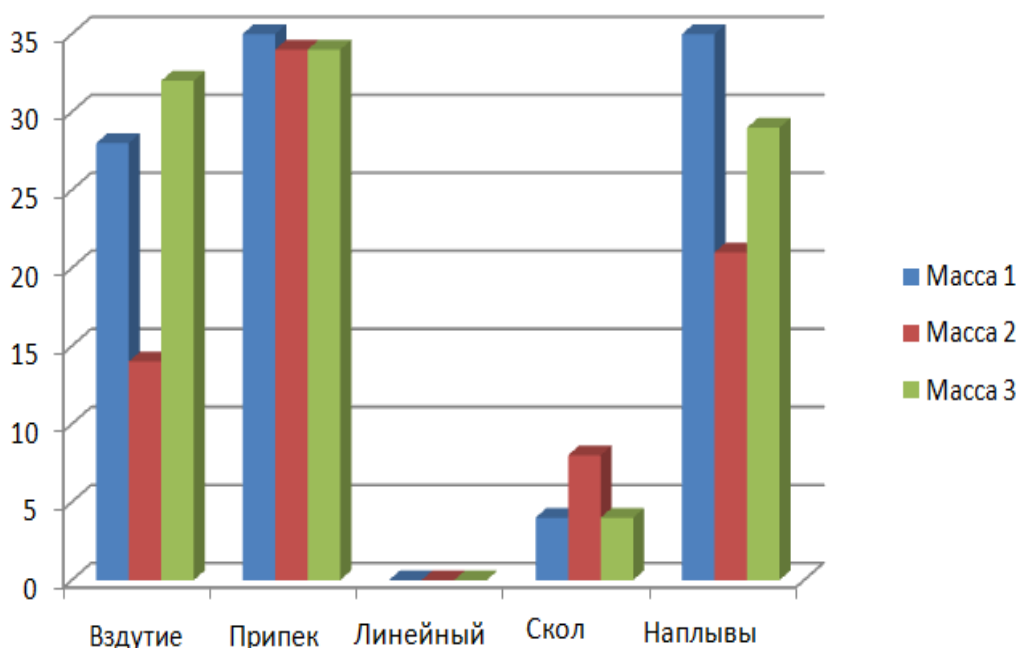


Рис. 1. «Гистограмма дефектов которые возникают в процессе изготовления стержней»

Таким образом, при подборе стержневых материалов должны учитывать стоимость, дефицитность и подобрать такие материалы, чтобы они подходили ряду требований которые предъявляются к огнеупорным материалам, для того, чтобы избавиться от дальнейших дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкленник Я.И., Озеров В.А. Литье по выплавляемым моделям – Москва, 1984. – 408 с.
2. Гуляев Б.Б., Липницкий А.М., Оболенцев Ф.Д. Специальные способы литья 1971. – 264 с.
3. Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. Технология литейного производства (специальные виды литья) 2005. – 352 с.
4. Ефимов В.А., Анисович Г.А., Бабич В.Н. Технология литейного производства (специальные способы литья) 1991. – 436 с.

Р. Е. АРТЕМЬЕВ, Д. А. АДЖИБАЕ
aruslan98@mail.ru, danno23@mail.ru
Науч. руковод. – М. П. САВИЧЕВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Аннотация. В статье оцениваются возможности различных методов неразрушающего контроля для определения характерного для сварки трением с перемешиванием дефекта в виде “заглаженного непровара”, применительно к стыковому соединению из алюминиевого сплава АМг4. С помощью металлографического исследования получена характерная морфология рассматриваемого дефекта. Для его идентификации также применялись такие методы, как цветная и люминесцентная дефектоскопия, рентгенографический контроль, цифровая радиография, ультразвуковой контроль и ультразвуковой контроль цифровокусируемыми антенными решетками, тепловизионный контроль. Получена информация о дефекте не только в местах его выхода на лицевую поверхность сварного соединения, но и в местах, заглаженных плечами инструмента, где визуально данный дефект не определяется. Проведено сравнение полученных результатов контроля.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; сварка трением с перемешиванием; алюминиевые сплавы.

Проблема сварки алюминиевых сплавов традиционным способом заключается в склонности металла шва с высокой теплопроводностью, коэффициентом теплового расширения в сравнительно широком диапазоне температуры застывания и растворимостью водорода в алюминии в расплавленном состоянии к усадке в два раза большей при затвердевании, разрушению в зонах теплового воздействия по стыкам деталей и образованию дефектов: несплошностей, цепочек пор в шве и у зоны сплавления, трещин в высокотемпературной зоне термического влияния, включений прочной оксидной пленки и ферросплавов в шве. Одним из вариантов решения указанной проблемы является использование сравнительно нового сварочного процесса - сварки трением с перемешиванием (СТП). Схема СТП представлена на рисунке 1.

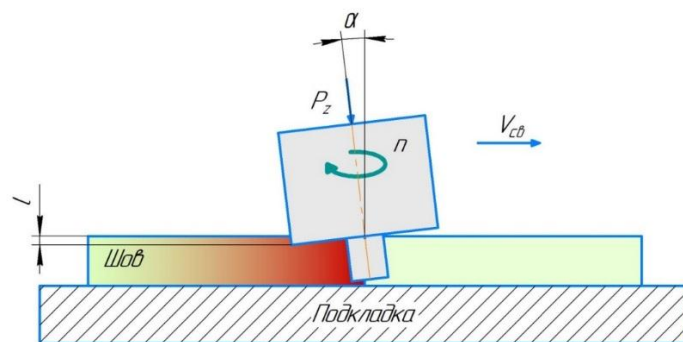


Рис. 1. Схема СТП

Преимуществом метода СТП по сравнению с обычными методами сварки можно считать отсутствие расплава при сварке трением и дефектов, обусловленных затвердеванием жидкого металла. Сварка трением с перемешиванием успешно применяется при соединении различных металлов и сплавов: алюминия, титана, меди и стали, но наибольшее распространение получила при сварке конструкций из алюминиевых и медных сплавов. За рубежом процесс сварки трением с перемешиванием в последние годы применяется в судостроении, вагоностроении, автомобилестроении, в ракетно-космической и авиационной отраслях. Постоянно растущий список пользователей СТП включает крупные компании и организации Boeing, SpaceX, Airbus, Eclipse Aviation Corporation, NASA, ВМС США, Mitsubishi, Kawasaki, Alstom LHB GmbH, а также другие промышленные предприятия в США, Европе, Китае и Японии. В авиационно-космической промышленности США с помощью сварки трением с перемешиванием изготавливаются крупные отсеки для ракет и спутников из высокопрочных алюминиевых сплавов. В авиационной промышленности применение СТП позволяет отказаться от большого количества заклепок и крепежей, что обеспечивает значительный рост производительности. Кроме того, повышается прочность соединений и усталостная прочность. В Европе производители железнодорожного подвижного состава используют этот процесс для изготовления крупных панелей, полученных сваркой алюминиевых профилей. В настоящее время ряд железнодорожных компаний – Alstom, CAF, Angel Trains, HSBC Rail и «РССБ» участвуют в совместном проекте с целью расширить применение сварки трением с перемешиванием в железнодорожной отрасли.

В настоящее время наблюдается отставание России от ведущих мировых держав в освоении технологии сварки трением с перемешиванием в отраслях промышленности. В России наиболее успешно данный метод применяется на ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», где метод СТП используется при изготовлении автомобильных полуприцепов-цистерн из алюминиевого сплава. Разработка и внедрение СТП корпусных конструкций ракет-носителей из алюминиевых сплавов ведется в Государственном космическом научно-производственном центре имени М. В.Хруничева., в Пермском национальном исследовательском политехническом [2] и Донском государственном техническом университетах [4]. ОАО РКК «Энергия» [1].

Вместе с тем в настоящее время в России отсутствуют нормативные документы и нет однозначных критериев образования качественного сварного соединения при СТП. Для формулирования таких критериев необходимо всестороннее изучение механизмов формирования структуры материала, в том числе структурных неоднородностей и несплошностей, в зоне сварного соединения. Также в ходе литературного обзора выяснилось, что и выбор методов НК существенно разнится. Целью данного исследования является практическая проверка эффективности различных методов НК для оценки качества сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП.

В настоящее время на кафедре СМСиКК проводятся работы по разработке технологии СТП алюминиевых сплавов с использованием, переоборудованного под СТП вертикально-фрезерного станка SSS-400. Принятое обозначение опытных образцов приведено на рисунке 1. В результате работ получено образцы листа АМг4 толщиной 5, 6 и 10 мм (рисунок 2), годных по результатам визуально-измерительного контроля, но имеющие непровар в виде туннеля, идущего вдоль сварного линии стыка. Дефект во многих источниках принято называть «заглаженный» непровар.

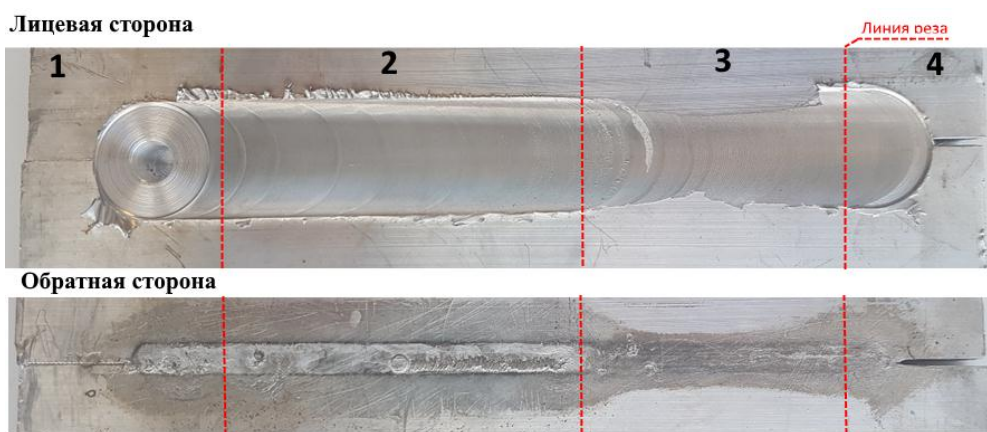


Рис. 2. Образец №38 из сплава АМг5 толщиной 10 мм, полученный СТП:
 1 – начало шва; 2 – участок с “правильной” шириной шва равной диаметру
 “заплевика” инструмента; 3 – участок недостаточной ширины шва; 4 – конец шва

Для полученных образцов опробованы часть методов контроля качества, выбранных в ходе литературного обзора [3, 5, 6]: ВИК, капиллярный контроль двумя методами: цветная дефектоскопия (ЦМ) и люминесцентный контроль (ЛЮМ-1ОВ), радиографический контроль (РК), цифровая радиография (ЦРК) и тепловизионный контроль (ТК).

Для проведения ЦМ использовался набор дефектоскопических материалов “Sherwin” и контрольный образец по 2 классу чувствительности ГОСТ 18442-80 с раскрытием дефекта 2,3 мкм. Контроль проводился в соответствии с инструкцией производителя, указанной на наборе: 1) очистка путем нанесения очистителя DR-60; 2) через 30 секунд после нанесения сушка поверхности сухой тканью; 3) нанесение пенетранта DP-55 на поверхность ровным слоем; 4) через 10 мин. удалить излишки пенетранта с поверхности до исчезновения розового фона с помощью сухой ткани или ткани, смоченной очистителем. 5) сушка поверхности; 6) нанесение проявителя DP-100.

Для проведения ЛЮМ1-ОВ использовался набор дефектоскопических материалов, рекомендованный для особо ответственных деталей: очиститель ОЖ-1, люминесцентная жидкость ЛЖ-6А, проявитель ПР-1; а также контрольный образец по 1 классу чувствительности ГОСТ 18442-80 с раскрытием дефекта 0,12...0,5 мкм. Контроль проводился в соответствии с инструкцией от-

раслевого авиационного стандарта ОСТ 1 90282-79: 1) очистка 5 мин в ацетоне; 2) очистка 5 мин. в бензине “Нефрас”; 3) сушка на воздухе 1 час; 3) окунание в люминесцентную жидкость ЛЖ-6А на 15 мин; 4) удаление излишек пенетранта под струей воды с использованием душевой насадки; 5) очистка в жидкости ОЖ-1 40 сек. с непрерывным перемешиванием; 6) проверка отсутствия “фона” путем просмотра очищенного образца в ультрафиолетовом облучении; 7) сушка не более 5 мин., образец при этом не должен полностью высохнуть; 6) нанесение проявителя ПР-1 с использование краскопульта давлением 2...4 атм.; 7) сушка не менее 1 часа; 8) осмотр в ультрафиолетовом излучении интенсивностью с использованием фонарика “Микрокон УФ-102”.

РК проводился по 1 классу чувствительности ГОСТ 7512 с использованием источника излучения постоянного действия “Raycraft CP-250” на высококонтрастную пленку Agfa D4 в вакуумной упаковке со свинцовыми усиливающими экранами. Режимы просвечивания: фокусное расстояние $f=1000$ мм; время экспозиции 18 сек (0,3 мин). Результаты РК приведены на рисунке 3.



Рис. 3. Радиографический контроль темплета 2 и 3

ЦРК проводился в соответствии с ГОСТ ISO 17636-2— 2017 с использованием эталоне типа “дуплекс” на комплексе “Цифракон” с применением импульсного аппарата “Арина 7” на режиме: время экспозиции 5 сек, мощность 20%, 1 кадр. Результаты ЦРК приведены на рисунке 4.

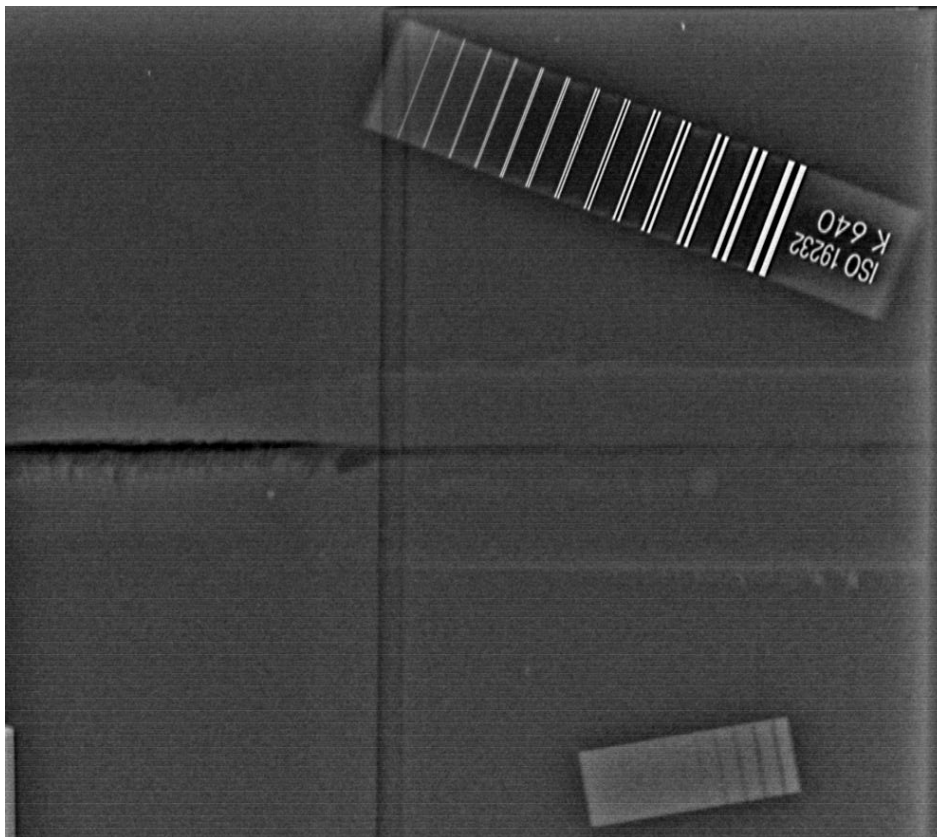


Рис. 4. Компьютерная радиография “Цифракон” темплета 2 и 3

Ультразвуковой контроль (“классический” и цифрофокусированными антенными решетками) проводился на дефектоскопе А1550 “Introvisor“ с настройкой по настроенному образцу (НО), выполненного на заказ из исследуемого материала, с зарубкой 2×1 . Результаты УЗК приведены на рисунке 5.

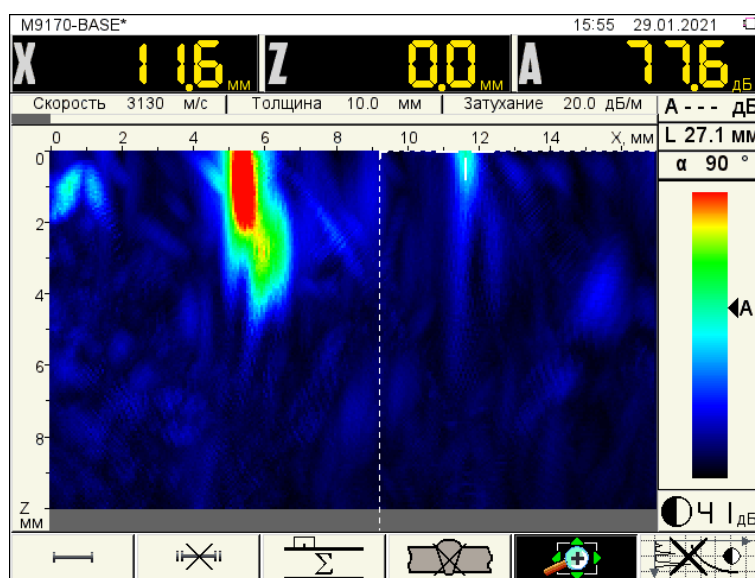


Рис. 5. Результаты УЗК

Тепловизионный контроль проводился на тепловизоре Testo 868. Образцы перед контролем нагревались в камерной печи до 300 °С. Для настройки коэффициента отражения использовался контактный термометр Testo 905-T2. УЗК с цифровой фокусировкой – хорошо различим непровар на как на 3, так и на 3 темплете. Результаты ТК приведены на рисунке 6 и 7.

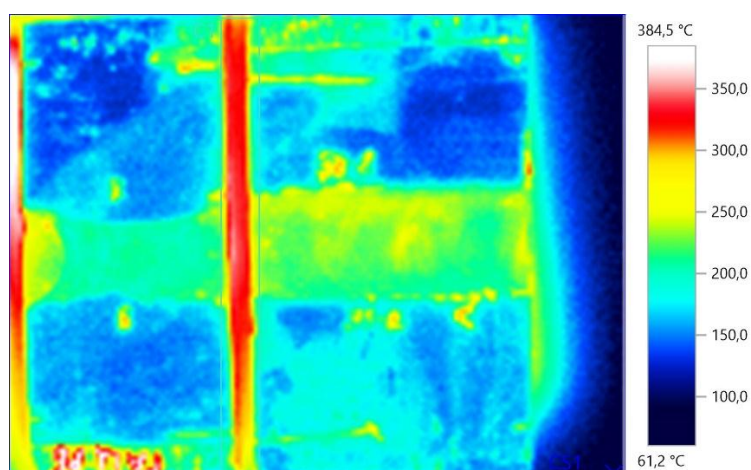


Рис. 6. Тепловизионный контроль темплета 2 и 3 (лицевая сторона)

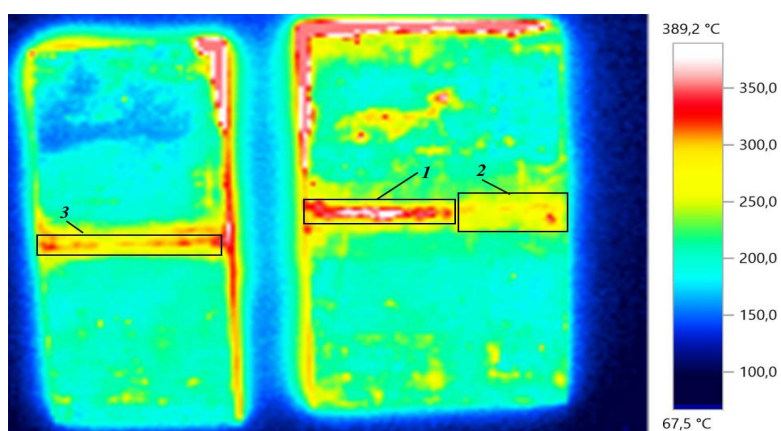


Рис. 7. Тепловизионный контроль темплета 2 и 3 (обратная сторона):

*1 – дефект поверхности с большой шероховатостью на темплете №2;
2 – бездефектная область темплета №2; 3 – Темплет №3 с заглаженным непроваром*

Образец был разрезан на три части для проведения металлографии. Для шлифования использовались зернистые шкурки со следующей последовательностью зернистости: 120, 320, 860, 1200, 1500, 2000. При переходе на более мелкую зернистость шкурки изменялось направление обработки поверхности на 90°. Затем проводилась полировка образцов на специальном полировальном

станке, диск которого обтянут бархатом. Полировальный диск смачивался алмазной суспензией. Для травления образцов использовался реактив Келлера. Результаты контроля представлены на рис.8.

Темплеты 3,4 имеют дефект в виде заглаженного непровара. Характерная морфология рассматриваемого дефекта была изучена при металлографическом исследовании. Макрошлиф темплетата №4 представлен на рисунке 8.



Рис. 8. Макрошлиф темплетата №4 с дефектом типа “заглаженный непровар”

Дефект ЗН присутствует даже на 2 темплетате. Хотя ТК и УЗК его не выявляют (рисунок 9).



Рис. 9. Макрошлиф темплетата №2 с дефектом типа “заглаженный непровар”

Выводы

1. Радиографический контроль позволил выявить только непровар в корне. Требуется дальнейшая проверка выявляемости дефектов шва, типичных для СТП (несплавлений по кромке и пр.), путем сравнения полученных радиографических пленок с данными металлографических исследований.

2. В ходе дальнейших исследований необходимо опробовать других вышеупомянутых методов НК: УЗК с ФАР, ВК и ТК. После получения достаточного количества сварных образцов предполагается проведение ROC-анализа эффективности различных методов неразрушающего контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колубаев Е.А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 887-893.
2. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А., Гнусов С.Ф. Использование методов неразрушающего контроля для диагностики дефектов в сварных швах, полученных сваркой трением с перемешиванием // Контроль. Диагностика. 2015. № 2. с. 51-58.
3. Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Тарасов С.Ю. Методика ультразвукового контроля сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, с использованием технологии фазированной антенной решетки // Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия. Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. с. 229.
4. Филиппов А.В., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А., Рубцов В.Е. Определение дефекта в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием при неразрушающем контроле // Фундаментальные исследования. 2015. № 6-2. с. 296-300.
5. Hossein Taheri, Margaret Kilpatrick, Matthew Norvalls, Warren J. Harper, Lucas W. Koester, Timothy Bigelow and Leonard J. Bond. Investigation of Nondestructive Testing Methods for Friction Stir Welding // Iowa state university. 2019. №9. с. 5-29.
6. Кузин А.И., Егоров А.В., Мазуркевич А.Н., Ахмедов Ф.А., Кинжагулов И.Ю., Степанова К.А., Ермаков В.А., Сухоруков К.А. Оценка применимости метода акустической эмиссии для контроля качества соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием // Сварочное производство. 2020. №4. с. 41-47.

УДК 621.791

Д. А. БАЧАЕВ, М. Г. ПЕТРОВ, Р. А. ГИБАДУЛЛИН
denisba4aev14@gmail.com, petmaksiseee@mail.ru, gibadullin.98.98@list.ru
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. А. С. СЕЛИВАНОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ

Аннотация. Проведен анализ научных статей по сварке трением с перемешиванием (СТП) сталей толщиной от 1 до 6 мм, приведены результаты механических испытаний и исследования микроструктуры сварного шва. Описано влияние режимов СТП на механические свойства сварного соединения. Указаны рекомендации по выбору геометрии и материала инструмента для СТП стали.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; СТП; сварка стали; сталь.

Сталь является одним из самых распространенных конструкционных материалов. Она используется для изготовления сварных конструкций в строительной, машиностроительной, нефтяной отрасли и многих других. Хорошо зарекомендовавшим себя методом образования сварного соединения из стали является дуговая сварка. Одним из ключевых ее преимуществ является возможность использования в «полевых условиях», вне специального помещения, а также отсутствие необходимости применения громоздкого оборудования.

Сталь обладает привлекательными свойствами, такими как высокая прочность и хорошая износостойкость. Свариваемость стали зависит от ее химического состава. Более высокое количество углерода и других легирующих элементов приводит к более высокой прокаливаемости и, следовательно, к снижению свариваемости. Были разработаны методы, технологии и материалы для сварки и соединения стали, однако, эта область все еще сталкивается с большими проблемами.

В то же время, перспективной при сварке сталей и уже зарекомендовавшей себя в отраслях сварки цветных сплавов является технология сварки трением с перемешиванием (СТП). Она позволяет осуществлять сварку алюминие-

вых, магниевых, титановых сплавов, углеродистых, нержавеющей и легированных сталей. Главными преимуществами метода является высокая прочность изготавливаемого соединения, повышенная твердость в ядре шва, не расходующийся инструмент и процесс не нуждается в трудоемкой подготовке кромок. В довершение к этому, использование технологии СТП сталей позволяет повысить их механические свойства, в частности – микротвердость и износостойкость могут повыситься в несколько раз, что доказано исследователями.

Схема процесса СТП представлена на рисунке 1. Основными параметрами процесса являются: n - частота вращения инструмента, $V_{св}$ - скорость сварки, α - угол наклона инструмента, P_z - осевое усилие или глубина погружения инструмента l , конструкция инструмента.

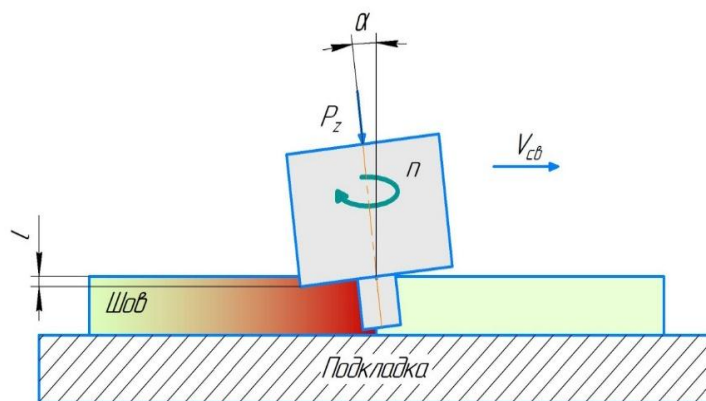


Рис. 1. Схема процесса СТП

При СТП сварка производится вращающимся инструментом. Форма инструмента представлена на рисунке 2, в наиболее простом исполнении это цилиндр с плоским заплечиком диаметром D и пином меньшего диаметра d_n длиной l_n .

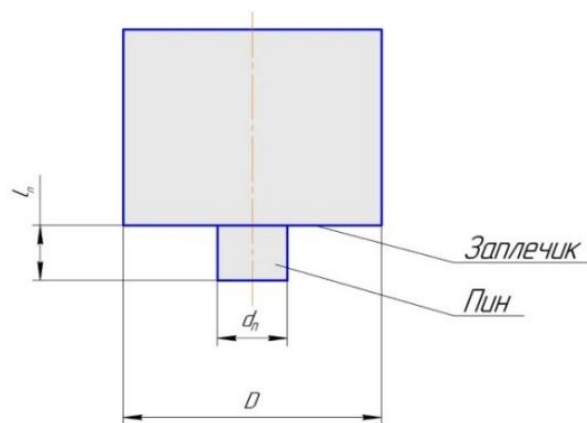


Рис. 2. Инструмент для СТП

Большинство современных публикаций по сварке стали посвящено оценке влияния режимов сварки на свойства и структуру сварных соединений. Также в некоторых публикациях рассматривалась геометрия инструмента СТП и ее влияние на структуру сварного шва.

При сварке образцов из низкоуглеродистой стали AISI 1018 толщиной 3 мм использовались следующие режимы сварки [1]: частота вращения инструмента - 450 об/мин, скорость сварки - 60 мм/мин. По результатам испытаний прочность соединения составляла 414 Мпа. Соединение оказалось без дефектов, трещин на участке не было.

В публикации [2] использовался лист из нержавеющей стали AISI 316L толщиной 2,7 мм. Для сварки использовался инструмент из поликристаллического кубического нитрида бора (PCBN), который имел диаметр пина 7,6 мм, высоту пина 3,7 мм и диаметр запечника 24 мм. Сварка трением с перемешиванием проводилась на установке МТИ РМ-1. Скорость вращения инструмента составляла 500 об / мин, скорость сварки 25,4 мм / мин и угол наклона инструмента 2 °. Глубина врезания инструмента составила 2,5 мм от верхней поверхности нержавеющей стали. Соединение оказалось без дефектов. Соединение из нержавеющей стали выдерживает нагрузку - 7,1 кН.

В исследовании [3] пластины из нержавеющей стали 409 толщиной 2 мм были сварены СТП, но сваривались с использованием инструмента с выпуклым закругленным пином, сделанного из поликристаллического кубического нитри-

да бора (PCBN). Инструмент PCBN, используемый в данном исследовании, имел диаметр заплечика 36,8 мм, диаметр пина 5,7 мм и длину пина 1,2 мм. СТП проводилась частотой вращения инструмента 1100 об/мин, а скорость сварки составляла 7.62 мм/мин с глубиной врезания 1.65 мм. На протяжении всего процесса СТП использовался защитный газ аргон, чтобы минимизировать поверхностное окисление. В результате эксперимента сварной шов был без дефектов. В сварочной зоне была получена мелкозернистая микроструктура путем динамической рекристаллизации из-за сильной деформации сдвига и высокого тепла, выделяемого во время процесса СТП. Полученная мелкозернистая микроструктура увеличила твердость сварочной зоны.

В статье [4] были изучены характеристики сварного шва пластины из высокоуглеродистой стали AISI-1080 толщиной 1,6 мм, длиной 250 мм и шириной 50 мм. Инструмент был выполнен из карбида вольфрама (WC) и имел диаметр заплечика 12 мм и диаметр пина 4 мм. Длина пина составляла 1,5 мм, а инструмент был наклонен на 3° в направлении сварки. Скорость вращения составляла 400 об / мин, скорость сварки составляла 200 мм мин. Во время сварки использовался аргон в роли защитного газа.

В результате эксперимента шов был произведен без трещин, с полным проплавлением и без дефектов. Соединения СТП обладают улучшенной пластичностью благодаря однородной микроструктуре соединений.

Для выявления оптимальных режимов сварки в статье [5] были проведены эксперименты по СТП листов толщиной 4 мм из стали ст3 с использованием инструментов из карбида вольфрам с кобальтовой связкой с различной геометрией и при разных режимах.

Таблица 1

Используемые инструменты

№	Диаметр буртика, мм	Форма пина
1.	20	Усеченный конус
2.	12	Трояко выпуклый усеченный тетраэдр
3.	12	Конический

Было проведено 4 эксперимента при разных режимах сварки для выявления оптимального режима с наименьшими дефектами.

Было выявлено, что бездефектный шов пластин толщиной 4 мм из стали ст3 с измельченными в несколько раз зернами в зоне перемешивания может быть получен при соблюдении определенных условий. Оптимальный температурный режим при использовании инструмента из карбида вольфрама – до 950 °С. Оптимальная частота вращения в случае использования инструмента №3, составляет 500 об/мин, при этом осевая сила, при которой образуется качественное соединение – 15-18 кН. Оптимальная глубина погружения буртика инструмента в металл – 0.05-0.1 мм.

Таблица 2

Применяемые режимы сварки

№ эксп.	Частота вращения, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	№ Ин-стр.	Угол наклона инструмента	Дефекты	Причины дефектов
1	2	3	4	5	6	7
1	800	40	1	2 °	заглаженный непровар	Не правильно подобрана глубина погружения
2	800	40	1	2 °	Оплавление пина инструмента	В процессе сварки, сила давления инструмента на заготовки составляла более 30 кН. При изготовлении образца температура превышала 950 °С, а максимальное значение составило 1060 °С. Данные значения превышают температуру теплоустойчивости материала, из которого изготовлен инструмент

1	2	3	4	5	6	7
3	500	50	2	2 °	Дефект в виде канала по всей длине, в конце шва заглаженный не провар	Дефект в виде канала на протяжении всего шва при прочих оптимальных параметрах вызван либо перегревом материала, либо чрезмерно большим размером пина. Предполагается, что от дефекта, наблюдающегося на образце №3 можно избавиться, уменьшив габаритные размеры пина, оставив диаметр буртика 12 мм
4	500	50	3	2 °	дефекты на образце отсутствуют	-

В работе [6] СТП проводилась на пластинах из мартенситностареющей стали MDN 250 толщиной 5,5 мм. Инструмент для СТП был изготовлен из вольфрама молибден (WMo). Было обнаружено, что частота вращения 600 об/мин и скорость перемещения 25 мм/мин позволяют производить сварные швы без пустот с гладкой поверхностью.

Мартенситностареющая сталь (МДН-250) толщиной 5,5 мм была успешно сварена трением с перемешиванием с использованием инструмента WMo. Были исследованы микроструктурные характеристики и определяющие механические свойства, такие как твердость и ударная вязкость сварных швов трением с перемешиванием из мартенситностареющей стали. Мелкозернистая микроструктура ядра сварного шва в сочетании с отсутствием реверсированного аустенита обеспечивает превосходную ударную вязкость по сравнению с основным металлом.

В ходе работы [7] была произведена СТП пластин из стали AISI-316 размером 120мм x 80мм x 4мм. Для сварки использовался поликристаллический кубический нитрид бора (PCBN) с композитным инструментом из вольфрамокарбида

(WRe). Бездефектный сварной шов получился при параметрах частоты вращения 1100 об / мин и скоростью перемещения 8 мм / мин и показал такую же прочность на растяжение, что и у основного материала, с сопоставимым удлинением 37%.

В таблице 3 приведены сводные данные по применяемым режимам сварки для стали различной толщины, при которых не наблюдалось образование дефектов.

Таблица 3

Применяемые режимы сварки стали методом СТП

Толщина свариваемых листов, мм	Частота вращения, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Источник
1,6	400	200	[4]
2	1100	7,62	[3]
2,7	500	25,4	[2]
3	450	60	[1]
4	500	50	[5]
3	1100	8	[7]
5,5	600	25	[6]

Из таблицы 3 видно, что по данным различных исследований формирование бездефектных соединений возможно в широком диапазоне параметров режимов сварки, что затрудняет выбор конкретных режимов сварки для заготовок определенной толщины.

Форма пина инструмента влияет на течение пластифицированного материала, микроструктуру и механические свойства сварного шва, сваренной трением с перемешиванием [5]. Результаты экспериментов показали, что надежные бездефектные соединения могут быть получены с использованием шести различных форм пина, таких как конический, цилиндрический, конический с резьбой, цилиндрический с резьбой, треугольный, квадратный, пятиугольный и шестиугольный. Разработанный инструмент в работе [5] имел коническую геометрию пина. Инструмент изготавливался из карбида вольфрама.

При выборе материала инструмента при СТП необходимо учитывать теплофизические свойства свариваемых материалов. Для сварки стали рекоменду-

ется применять инструменты на основе вольфрама, а также комбинированные инструменты с пином из карбида вольфрама.

В таблице 4 приведены основные характеристики конструкции инструментов, применяемых для СТП титановых сплавов.

Таблица 4

Характеристики инструментов для сварки методом СТП

Толщина свариваемых листов, мм	Диаметр заплечика, мм	Диаметр пина, мм	Длина пина, мм	Форма пина	Материал инструмента	Источник
1,6	12	4	1,5	Цилиндрическая	Карбид вольфрама (WC)	[4]
2	36,8	5,7	1,2	Коническая	поликристаллический кубический нитрид бора (PCBN)	[3]
2,7	24	7,6	3,7	Цилиндрическая	(PCBN)	[2]
3	12	-	-	Конический	Корбид вальфрама с кобальтовой связкой	[5]
4	-	-	-	Цилиндрическая	поликристаллический кубический нитрид бора (PCBN) с композитным инструментом из вольфрам-рения (WRe)	[7]
5,5	-	-	-	Цилиндрическая	Вольфраммолибден	[6]

Из таблицы видно, что нет корреляции между толщиной свариваемых листов и геометрией применяемых инструментов. Широкий диапазон геометрических размеров, применяемых в различных исследованиях инструментов для СТП затрудняет выбор конструкции инструмента для сварки заготовок определенной толщины.

Выводы:

1. Большинство исследований по сварке трением с перемешиванием стали посвящено оценке влияния режимов сварки на свойства и структуру свар-

ных соединений. В публикациях различных авторов прочность соединений составила от 85 до 97% от прочности основного металла.

2. По данным различных исследований формирование бездефектных соединений возможно в широком диапазоне параметров режимов сварки, что затрудняет выбор конкретных режимов сварки для заготовок определенной толщины.

3. Широкий диапазон геометрических размеров применяемых в различных исследованиях инструментов для СТП затрудняет выбор конструкции инструмента для сварки заготовок определенной толщины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anmol Bhatia a, B, Rita Vattalia. Friction-mixing welding of carbon steel: effect on microstructure and tensile strength // *Materials Today: Proceedings* №26. 2020. pp. 1803-1808.
2. GR Argade 1, S. Shukla 1, K. Liu 1, and R. S. Mishra. Friction lap welding of stainless steel and plain carbon steel to enhance corrosion// *Journal of Materials Processing Tecnology* №48. 2018. pp. 314–322.
3. Hong-hwe Cho a , Hyun NamHan a, Sun-Tae Hong b,*, Park Jung-hwan b , Yong-Jai Kwon c , Seok-hyun Kim d, Russell J. Steel e. Microstructural analysis of ferritic stainless steel welded by friction with stirring// *Materials Science and Engineering* №528 2011. pp. 2889-2894.
4. Yu. D. Chang, a. H. Fuji, a, * R. Uji b and N. Tsuji c. Friction stir welding of high-carbon steel with excellent viscosity and ductility // *Scripta Materialia* №63. 2010. pp. 223-223.
5. И. К. Черных, Е. В. Васильев, А. Н. Разработка технологии сварки трением с перемешиванием листов из стали ст3.
6. S Suresh D. Meshram, J. Madhusudhan Reddy, Sunil Pandey. Friction welding with mixing of martensitic-aging steel (grade-250)// *Materials and Design* №188 2013. pp. 352-358.
7. Manish P. Meshram, Basant Kumar Kodli, Suhash R. Dey *. Friction cooking of austenitic stainless steel using a PCBN tool and its connection // *Procedia Materials Science* №6 2014. pp. 135-139.

УДК 621.791

Р. А. ГИБАДУЛЛИН, Д. А. БАЧАЕВ

gibadullin.98.98@list.ru, denisba4aev14@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. А. С. СЕЛИВАНОВ

selivanov@naks-rb.ru

Уфимский государственный авиационный технический университет

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТРУБОПРОВОДНЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация. В процессе обзора были изучены исследования применения технологии сварки трением с перемешиванием (СТП) трубопроводных сталей, выявлены технологические особенности.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; СТП; сварка стали, сварные соединения и конструкции, рабочий инструмент, режимы сварки, сварочное оборудование.

Получение сварного соединения процессом СТП происходит за счет разогрева в зоне сварки методом трения. С помощью данного процесса можно получить соединения сплавов, трудно свариваемых традиционными способами (алюминиевые сплавы, содержащие цинк; дуралюмины; литейные алюминиевые сплавы). Схема процесса СТП изображена на рисунке 1. В начале процесса сварки инструмент (рисунок 2), вращаясь, погружается в свариваемый металл и в результате приложенного давления и возникающего трения металл под заплечиком нагревается и переходит в пластичное состояние. Затем инструмент перемещается вдоль стыка и за счет перемешивания пластичного металла образуется сварной шов.

Основными параметрами процесса СТП относят: частоту вращения инструмента, скорость сварки, угол наклона инструмента, глубина погружения инструмента и его конструкция (рисунок 3). Ранние исследования процесса СТП были ограничены алюминиевыми и магниевыми сплавами из-за их более низкой температуры плавления.

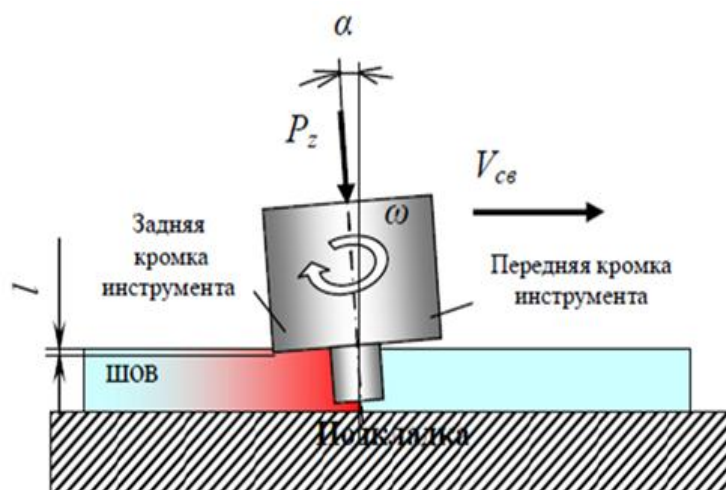


Рис. 1. Схема процесса СТП

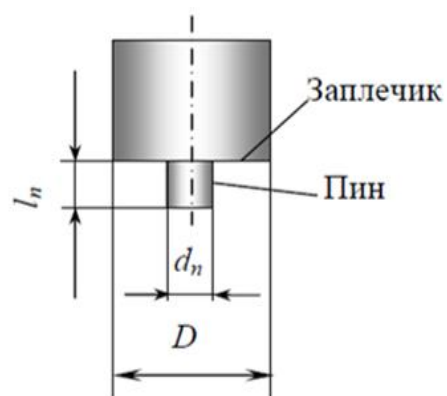


Рис. 2. Инструмент для СТП

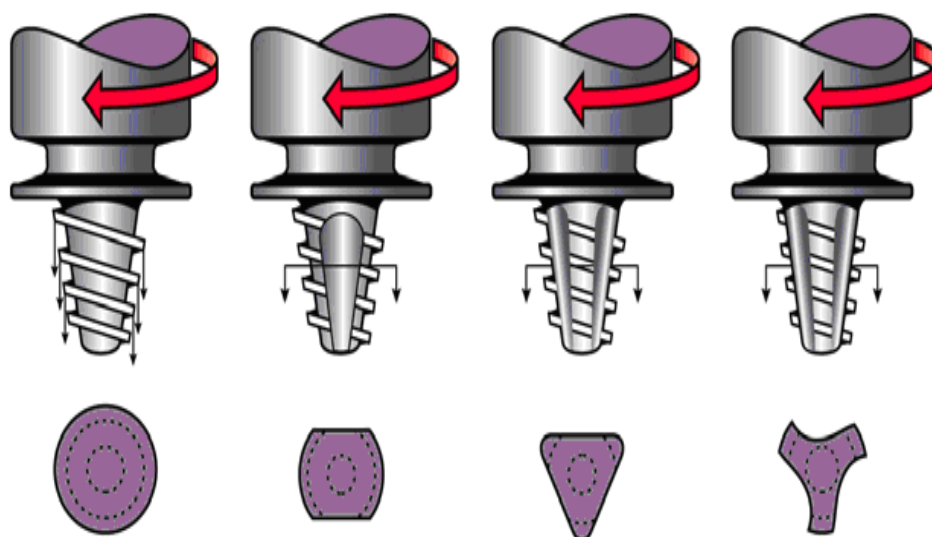


Рис. 3. Конструкция инструмента для СТП

Использование специальной орбитальной оснастки (рисунок 4) открываются перспективы применения СТП трубопроводов.



Рис. 4. Установка для орбитальной сварки

Анализ публикаций по СТП трубопроводных сталей, показал, что процесс обеспечивает хорошее качество сварных соединений по ряду показателей, в том числе при сварке трубопроводных сталей типа X80 и X100.

Таблица 1

Механические характеристики трубопроводных сталей типа X80, X100

Категория прочности	Временное сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	σ_B σ_T	Относительное удлинение, δ , %	Работа удара, KV 40°C, Дж		Доля вязкой составляющей в изломе образца при ИПГ основного материала при минус 20°C
					Основной металл	Сварной шов	
	Не менее		Не более		Не менее		
X80	625	555	0,92	18	155	56	90
X100	760	690	0,95	17	160	40	90

Химический состав сталей типа X80, X100

Категория прочности	Содержание элементов, %												
	C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu	Mo	Ni	Cr	Nb	Ti
X80	0,07	0,39	1,89	0,012	0,0007	0,003	0,032	0,21	0,26	0,22	0,04	0,054	0,019
X100													

В статье на тему изучения микроструктуры стали X80 выяснилось, что СТП сталей типа X80 имеет большое преимущество по сравнению с дуговой сваркой, особенно в особенности, более точно контролируемые и более низкие пиковые температуры во время сварки, что позволяет избежать чрезмерного роста аустенита и образования МА ожерелья. Более того, представленные результаты показали более высокие значения ударной вязкости.

На основании литературного обзора, были выявлены особенности формирования соединения.

В статье [1] был проведен эксперимент в котором при помощи СТП были сварены стальные пластины толщиной 3мм, с применением инструмента из карбида вольфрама, в результате опыта. В стыке наблюдались феррит и перлит. Причина этого роста феррита и перлита связана с относительно медленными скоростями охлаждения. Также было выявлен рост дендритов, микроструктура состоит из измельченных зерен феррита и перлита. Основной металл состоял зерен феррита и аустенита.

Испытание на поперечное растяжение показывает, что соединение имело прочность 99,5% (414,10 МПа) с относительным удлинением 18,41%. Уменьшение удлинения связано с наличием дендритов в области сварного шва.

В статье [2] с помощью СТП была произведена сварка стали СК5, в результате Основной металл имеет структуру феррита и структуру глобулярного цементита, в сварном шве наблюдалась некоторая дуплексная структура феррита и цементита, и структура остаточного аустенита не была четко видна. В ходе испытаний на растяжение образцы были разрушены в зоне основного металла.

Стоит отметить дефекты, которые могут возникнуть в процессе СТП. Характерным для СТП дефектом является вогнутость на протяжении всего сварного шва, так как инструмент углубляется заплечиком в металл. Также стоит отметить что в конце шва на месте выхода инструмента имеется углубление (рисунок 3).

Возможно появление твердых включений: осколки рабочей части инструмента, остатки грязи и масла.

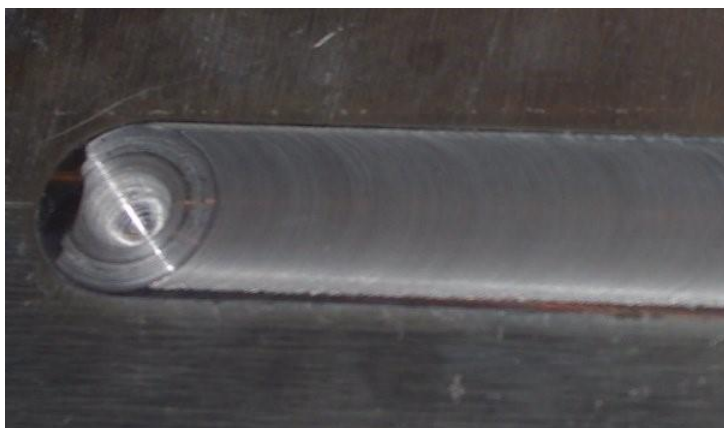


Рис. 5. Углубление в конце

Возможно возникновение заглаженного непровара (рис.6), который представляет собой протяженную несплошность как внутри, так и на поверхности сварного шва, ориентированная в долевом направлении.

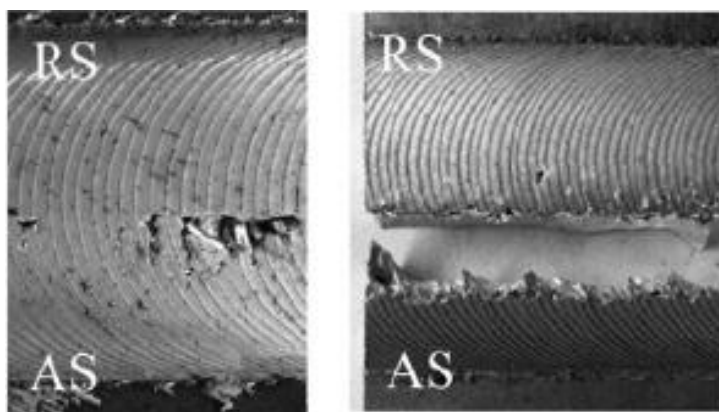


Рис. 6. Заглаженный непровар

В статье [4] проведена серия экспериментов с использованием инструментов с различной геометрией и при разных режимах. Для сравнения также был проведен опыт в котором четыре инструмента были испытаны на одном режиме, при скорости вращения инструмента 500 об/мин и скорости сварки равной 50 мм/мин. В ходе эксперимента на трех образцах был получен дефект на поверхности в виде канала. На четвертом образце полученным с помощью инструмента с коническим пином внешних дефектов не обнаружено, но радиогрифический контроль показал наличие заглаженного непровара. В ходе дальнейших экспериментов были сварены образцы с применением инструмента №4, но на другом режиме. В полученном соединении дефектов не обнаружено.

Анализ публикаций по СТП трубопроводных сталей, показал, что процесс обеспечивает хорошее качество сварных соединений по ряду показателей, в том числе при сварке сталей типа X80 и X100.

В публикации [6] было проведено исследование микроструктуры стали X80 толщиной 9,5 мм и 15мм, результаты показали что, СТП сталей типа X80 имеет большое преимущество по сравнению с дуговой сваркой, в особенности, более точно контролируемые и более низкие пиковые температуры во время сварки, что позволяет избежать чрезмерного роста аустенита. Более того, представленные результаты показали более высокие значения ударной вязкости.

В публикации [7] проведены эксперименты применения СТП для сварки стали X100 толщиной 5мм по результатам которых выяснилось в зоне перемешивания образовалась твердая зона, где была достигнута максимальная твердость. Остаточные напряжения были относительно низкими по сравнению с пределом текучести зоны перемешивания и основного металла в результате более низких пиковых температур процесса СТП по сравнению со сваркой плавлением. Наибольшие напряжения имели растягивающий характер и располагались в продольном направлении сварного шва вблизи границы зоны термического влияния / основного металла.

Особым преимуществом сварки сталей методом СТП отмечается устранение водородного растрескивания.

Применение инструмента из W-Re позволяет повысить ударную вязкость сварного соединения на 5-15%. Кроме этого, были получены более низкие значения остаточных напряжений, по сравнению с соединениями, полученными сваркой плавлением.

Вывод

На основании изученной литературы были выявлены критерии, к ним относятся: правильно подобранный режим СТП, при котором формируется необходимая микроструктура, положительно влияющая на механические свойства соединения. Конструкция и геометрия инструмента, позволяющие избежать появления дефектов как наружных, так и внутренних.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Friction stir welding of carbon steel: Effect on microstructure and tensile strength/Author links open overlay panel Anmol Bhatiaab Reeta Wattal/Volume 26, Part 2, 2020, Pages 1803-1808.
2. Hybrid friction welding with mixing of high-carbon steel/ Dong-Hyun Chai, Chang-Yong Lee, Bung-Wook Ahn, Jung-Hyun Chai, Yoon-My Young, Ketun Song, Seung-gab Hong, Won-Bae Lee, who-Bong Kang, and Seung-Boo Jun/J. Mater. Sci. Технол., 2011, 27 (2), 127-130.
3. Разработка инструмента для сварки трением с перемешиванием конструкционных, нержавеющей сталей и титановых сплавов/ Е. И. Ткаченко, А. С. Лукин, Д. А. Прошутинский/
4. Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility/ Author links open overlay panelY.D.ChungaH.FujiiiaR.UejibN.Tsujic/ Scripta Materialia Volume 63, Issue 2, July 2010, Pages 223-226.
5. A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure, and properties/ F.C. Liu, Y. Hovanski, M.P. Miles, C.D. Sorensen, T.W. Nelson // Journal of Materials Science & Technology. – 2017. – №34. – С. 39 – 57.
6. Study on the fracture toughness of friction stir welded API X80/ Allan Tribe, Tracy W. Nelson // Engineering Fracture Mechanics. – 2015. – №150. – С. 58 – 69.
7. The microstructural evolution and impact toughness of nugget zone in friction stir welded X100 pipeline steel / H.B. Cui, G.M. Xie, *, Z.A. Luo, J. Ma, G.D. Wang, R.D.K. Misra // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – №681. – С. 426 – 433.

УДК 621.791.75.

Д. С. ДУБОВЧЕНКО

zkvserjant@bk.ru

Науч. руковод. – д-р техн. наук, доц. А. Ю. МЕДВЕДЕВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РУЧНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА ИЗ СПЛАВА ЭП718

Аннотация. Цель исследования – произвести обзор возможности использования ручной PWA сварки взамен ручной сварки TIG. В статье описаны основные проблемы, с которыми сталкиваются при сварке сплава ЭП718 методом TIG. Научная новизна заключается в перспективности применения ручной PWA для сваривания опоры ГТД ПД-14 изготавливаемой из сплава ЭП718. В результате исследования было обоснован выбор типа сварки PWA взамен TIG. Рассмотрены возможные первоначальные режимы сварки PWA и подобрано оборудование в соответствии с ожидаемыми режимами сварки.

Ключевые слова: PWA; TIG; ЭП718 (ХН45МВЮТБР); опора ГТД ПД-14; MIG; роботизированная сварка.

Согласно государственной программе развития авиационной промышленности до 2025 года [1], перед отечественной авиационной промышленностью стоит цель войти в тройку производителей авиационной техники на мировом рынке, по объемам выпуска продукции и закрепить данные позиции. Один из таких продуктов, который отвечает поставленным целям – это ГТД ПД-14. В данном авиадвигателе применяются самые современные сплавы и отрабатываются инновационные технологии.

Одной из проблем ПД-14, является сборка опоры ГТД (рис. 1), путем сварки ручным TIG.



Рис. 1. Схематическое расположение опоры ГТД, ее основные части

Технологические проблемы, связанные с конструктивными особенностями:

– Согласно рекомендации ВИАМ при сварке ЭП718 (ХН45МВЮТБР) используются следующие способы сварки: При толщине сплава 0,5-0,8 мм, АрДЭС без присадочного материала; При толщине сплава 1,5-2,0 мм, АрДЭС + ЭП533; При толщине сплава более 2,0 мм ЭЛС. При толщине в месте сварки 4 мм единственно рекомендованным способом сварки является ЭЛС, под которую невозможно обеспечить требования по сборке.

– Ограниченный доступ к стыку с внешней стороны вынуждает вести сварку с многочисленными прерываниями, в том числе и на механическую обработку;

– Чувствительность материала к термическому циклу в совокупности с жесткостью конструкции и большим количеством сварных швов повышает вероятность образования горячих трещин.

При сварке опоры ГТД ПД-14 из сплава ЭП718, наиболее часто встречающаяся проблема — это образование горячих трещин. Наиболее рациональный путь решения данной проблемы - это снижение тепловложений на погонный метр сварного шва. На данный момент этот путь прорабатывается в двух направлениях.

1-ое направление - это использование роботизированной MIG сварки. На базе лабораторий УГАТУ был получен хороший результат применения роботизированной MIG сварки [7], что позволило снизить тепловложения на 30%, против ручной TIG, что позволило избежать образование горячих трещин в свариваемых образцах [8]. Однако внедрение роботизированной MIG сварки, требует от предприятия глубокой модернизации и улучшения множества производственных процессов, что не является экономически выгодно в настоящее время.

2-ое направление - это подбор способа сварки с высококонцентрированным источником тепла (схожим с ЭЛС), но при этом обладающим значительными мобильными свойствами (такими как у ручной TIG). Наиболее близко к заданным критериям, подходит ручная плазменная сварка (РВА).

Плазменная сварка — это сварка плавлением, при которой нагрев проводится направленным потоком дуговой плазмы (плазменной струей). Плазменную струю получают в специальных устройствах, которые в сварочных процессах называют плазменными горелками (плазмотронами) (Рис. 2). Наиболее распространены способы получения плазменных струй путем сжатия и интенсивного охлаждения газовым потоком столба дугового разряда, горящего в сравнительно узком водоохлаждаемом канале плазменной горелки [2].

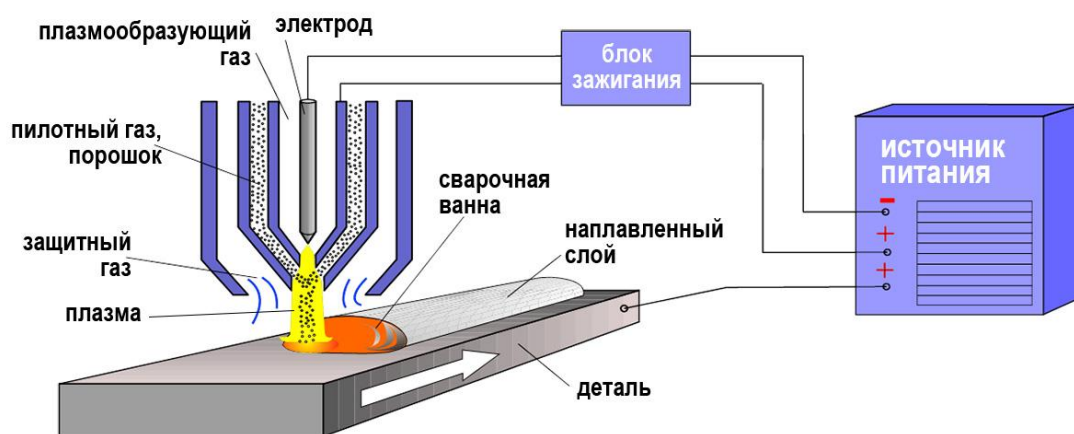


Рис. 2. Схема плазмотрона с источником питания

PWA успешно конкурирует с MIG и TIG по производительности, экономичности и качеству получаемых соединений. PWA получило распространение в авиастроение, ракетостроение, приборостроение, машиностроение, медицинская техника и др., где до PWA широко использовалась TIG.

По сравнению с TIG преимущества PWA следующие:

- меньшее влияние возможного изменения расстояния от торца сопла до изделия на геометрические размеры зоны проплавления;
- меньшее влияние изменения тока на форму дуги;
- высокая надежность зажигания дуги благодаря дежурной дуге;
- отсутствие включений вольфрама в сварном соединении;
- повышение скорости сварки;
- меньшие тепловложения на погонный метр сварочного шва.

Если принять одинаковую скорость сварки, то при PWA необходим ток

почти в два раза меньший чем для TIG, сварные швы более узкие и с меньшей зоной термического влияния. [2]

Наибольшее применение PWA нашла в производстве изделий из тонколистовых металлов толщиной от 0,05 до 1,5 мм, в тех случаях, когда требуется жесткий контроль тепловложений. О широких возможностях PWA свидетельствуют примеры применения для изготовления ответственных сварных конструкций толщиной от 3 до 20 мм из низкоуглеродистых, низколегированных, высокопрочных и нержавеющей сталей, никелевых и титановых сплавов, меди и ее сплавов, алюминиевых сплавов.

К основным параметрам PWA относят:

- сварочный ток от 80 до 650 А;
- напряжение от 25 до 35 В;
- скорость сварки от 10 до 50 м/ч;
- подача плазмообразующего газа от 1,5 до 5 л/мин;
- подача защитного газа от 3 до 10 л/мин;
- расстояние от среза сопла до изделия от 4 до 8 мм;
- диаметр сопла от 2,5 до 5 мм;
- длина канала сопла от 1 до 3 мм.

Обзор открытых источников не дал результатов по точным режимам PAW, используемые для ЭП718. Для отправной точки взяты режимы свариваемости никеля, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Примерные режимы сварки стыковых соединений методом PWA для никеля [2]

δ, мм	I, А	U, В	V, м/ч	dc, мм	Q, л/мин (аргон)	
					Плазм.	Защит
Никель						
3,2	200-205	29-30	40-41	2,8	6,5-6,9	24-25
6,0	245-250	30-32	20-21	3,4	4,5-4,7	24-25
8,0	310-312	31-32	14-15	3,4	5,5-5,7	24-25

В соответствии с предполагаемыми режимами сварки S=4 мм, I=220-230 А, U=29-30 В, V=30-35 м/ч, было подобрано следующее оборудование.

– *EWM TETRIX PLASMA 400*. Плазменная сварка постоянным током на прямой полярности: углеродистой, низко- и высоколегированной стали, никеля, меди, золота, титана, циркония и их сплавов, специальных сплавов.

Области применения: ремонтные и производственные работы в авиационной и космической промышленности, и производство промышленных установок.

Таблица 2

Технические характеристики EWM TETRIX PLASMA 400[3]

Параметры	Значения
Сетевое напряжение, В	400 (50-60 Гц)
Диапазон регулирования тока, А	5-400
Ток дежурной дуги, А	5-25
ПВ, %	45 (400 А); 65 (380 А); 100 (330 А)
Максимально потребляемая мощность, кВА	20,7
COSφ	0,99
Габариты, мм	660x335x850
Вес, кг	87
Страна производитель	Германия
Цена, руб	По договоренности*

– *PI PLASMA 350*. Плазменная сварка постоянным током на прямой полярности: углеродистой, низко- и высоколегированной стали, никеля, меди, золота, титана, циркония и их сплавов, специальных сплавов. Области применения: ремонтные и производственные работы в авиационной и космической промышленности, химическая и пищевая промышленность, машиностроение и производство промышленных установок.

Таблица 3

Технические характеристики PI PLASMA 350 [4]

Параметры	Значения
Сетевое напряжение, В	400 (50-60 Гц)
Диапазон регулирования тока, А	5-350
Ток дежурной дуги, А	3-20
ПВ, %	100 (350 А)
Максимально потребляемая мощность, кВА	18,1
COSφ	0,93
Габариты, мм	980x545x1090
Вес, кг	85
Страна производитель	Дания
Цена, руб	По договоренности*

– *PLASMA-KEYHOLE*. Установка для плазменной сварки хромоникелевых сплавов, с покрытием и без покрытия, стали, титана. Область применения: автомобильная промышленность, строительство трубопроводов и контейнеров, а также в машиностроении.

Таблица 4

Технические характеристики PLASMA-KEYHOLE [5]

Параметры	Значения
Сетевое напряжение, В	400 (50-60 Гц)
Диапазон регулирования тока, А	3-500
Ток дежурной дуги, А	3-30
ПВ, %	100 (350 А), 60 (440 А), 40 (500 А)
Максимально потребляемая мощность, кВА	17,9
COSφ	0,99
Диаметр сопла, мм	2,5; 2,8; 3,4; 4,0
Диаметр электрода, мм	4,8-6,4
Габариты, мм	725x290x1550
Вес, кг	133
Страна производитель	Австрия
Цена, руб	По договоренности*

Из рассмотренных трех вариантов оборудования для ручной PAW, для решения поставленной задачи, предпочтительнее всего выглядит сварочный аппарат PLASMA-KEYHOLE. Он имеет наибольший диапазон по максимальной силе тока $I=500$ А, при этом обладает наименьшей «Максимально потребляемая мощность = 17,9 кВА.

Заключение

В работе проведен анализ существующего технологического процесса изготовления деталей и сборочных единиц корпуса наружной опоры ГТД ПД-14 из сплава ЭП718 с точки зрения минимизации склонности к горячему трещинообразованию и снижения уровня остаточных напряжений. Рассмотрена возможность применения ручной плазменной сварки PAW, взамен применяемой TIG. Произведен поиск и подбор разных вариантов оборудования от ведущих производителей в области плазменной сварки. Наиболее оптимальным, согласно предполагаемым режимам ручной PAW, можно считать оборудование PLASMA-KEYHOLE (таб.4). Ожидаемое уменьшение тепловложений от при-

менения ручной PAW против ручной TIG может составить до 45%. PAW в сравнении с роботизированной MIG, выигрывает за счет значительно меньшей модернизации процессов по предприятию, отсутствия необходимости сертифицировать PAW в отрасли, меньший срок на переобучение сварщиков и как следствие более высоких экономических показателей. Стоит отметить, что для предприятия переход на ручной PAW взамен ручной TIG займет меньший период времени, чем переход с ручной TIG на роботизированный MIG.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная программа Российской Федерации "Развитие авиационной промышленности". - URL: <https://docs.cntd.ru/document/499091776?marker=65A0IQ>. – (дата обращения: 12.09.2021). - Режим доступа: свободный.
2. Еремин Е.Н. «Плазменно-дуговые технологические процессы в сварочном производстве.» Учеб. Пособие. –Омск: Изд-во ОмГТУ, 2000. -275с.
3. Электронный каталог продукции компании «EWN Simple more», - TETRIX 400 COMFORT Plasma - URL: http://www.ewmrussia.ru/catalog/main_264/section_0/item_37593/ (дата обращения 12.09.2021). Режим доступа: свободный.
4. Официальный сайт компании «MigatronicWelding Value», каталог, Pi 350 Plasma. – URL: <https://www.migatronic.com/en/products-and-solutions/welding-machines/pi-plasma/> (дата обращения 10.09.2021). Режим доступа: свободный.
5. Официальный сайт компании «Fronius International GmbH», каталог, PLASMA-KEYHOLE URL: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/robotic-welding/plasma-welding/plasma/plasma> (дата обращения 12.09.2021). Режим доступа: свободный.
6. Малаховский В.А. Плазменная сварка М.: 1987, 80 с
7. Разработка технологии роботизированной сварки плавящимся электродом соединений из сплава ХН45МВТЮБР.Атрощенко В.В., Медведев А.Ю., Никифоров Р.В., Галимов В.Р., Муругова О.В. Сварка и диагностика. 2020. № 4. С. 46-49.
8. Особенности формирования микроструктуры околошовной зоны при роботизированной сварке гетерогенного сплава на основе никеля / Медведев А.Ю., Никифоров, Р., Галимов, В., Муругова, О., Савичев, М., Большаков, Б. // Materials. Technologies. Design [Онлайн], Том 3 Номер 1 (3) (19 Апрель 2021)

И. А. ЕВДОКИМОВА

tdljrbvjdf@mail.ru

Науч. руковод. – д-р техн. наук, доц. А. С. ГОРЮХИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация. В статье описаны основные виды аддитивных технологий, используемые для изготовления керамических изделий. *Научная новизна* заключается в перспективности применения аддитивных технологий в производстве керамических стержней для газотурбинных лопаток газотурбинных двигателей. *В результате* исследования были представлены виды аддитивных технологий, их преимущества и недостатки для изготовления керамических изделий.

Ключевые слова: Селективное лазерное спекание (SLS); Селективное лазерное плавление (SLM); Лазерная стереолитография (SLA); аддитивные технологии.

Керамические материалы получили широкое распространение во многих областях промышленности.

Керамические материалы имеют уникальные свойства и применение благодаря своим прочностям связи, кристаллическим и зонным структурам. Ключевыми преимуществами данных материалов является их высокая твердость, высокая прочность, химическая стабильность и высокотемпературные характеристики. Но также из-за этого возникает затруднение формообразования и обработку деталей. Такие способы формообразования керамики, как литье из шликера, сухое прессование, пленочное литье и гель-формование имеют определенные недостатки [1, 2]:

– Формирование сложных компонентов требует использования пресс-форм с высокой геометрической точностью. В следствие чего, подготовка производства занимает большое количество времени на проектирование изготовление и доработку формы, а внесение изменений в конструкцию изделия влечет за собой повторения цикла изготовления необходимой оснастки.

– Изделия после спекания часто требуют либо обработки лазером, либо механической обработки с использованием твердосплавных или алмазных ре-

жущих инструментов для обеспечения достаточной точности размеров и формы готового изделия.

– Некоторые специальные формы и элементы трудно изготовить с использованием обычных процессов формования, например, внутренние полости, отверстия, внутренние канавки и изгибы с небольшими углами. Эти недостатки наложили значительные ограничения на широкое распространение высокотехнологичной керамики.

Благодаря использованию технологий аддитивного производства для формирования сложных керамических деталей можно обойти вышеупомянутые проблемы, сократить процент брака, повысить гибкость производства и обеспечить быстрое изготовление высокоточных керамических деталей [2–4].

Существуют две основные категории процессов аддитивного производства с точки зрения формообразования:

– Одностадийные процессы (также называемые «прямыми» процессами), в которых детали изготавливаются за одну операцию

– Многоступенчатые процессы (также называемые «косвенными» процессами), в которых детали изготавливаются в две или более операций, где первая обычно обеспечивает базовую геометрическую форму, а последующая обеспечивает заготовке заданные свойства материала.

Далее рассмотрим несколько видов аддитивных технологий, подходящих для изготовления керамических изделий.

Селективное лазерное спекание (SLS)

В процессе SLS, мощный лазерный луч используется для избирательного облучения поверхности целевого слоя порошка. Затем порошок нагревается и происходит спекание (т. е. межчастичное плавление) для объемного соединения. После этого новый слой порошка наносится на предыдущую поверхность для следующего прогрева и соединения. Таким образом, процесс повторяется слой за слоем, пока не будет изготовлена трехмерная деталь.

Преимуществом данного метода является, что для изготовления нет необходимости в специальной подготовке дополнительных опорных конструк-

ций для нависающих областей, так как они все время окружены сыпучим порошком в слое.

В недостатки можно отнести процесс освобождения внутренних полостей от остатков порошка, который из-за особенностей формы может протекать затруднительно.

Селективное лазерное плавление (SLM)

Принцип технологии SLM (selective laser melting) очень близок к технологии SLS, за исключением того, что это более экономичное по времени одностадийное полное плавление в заранее сформированном порошковом слое. В данном методе используются лазерные источники с гораздо более высокими плотностями энергии и не требуются вторичные легкоплавкие порошки.

Преимуществом данного метода можно отметить, точность, хорошие механические характеристики изготавливаемого изделия, а так же возможность экономии материала за счет построения объектов в внутренних полостях.

Один из больших недостатков данного метода – вред для здоровья человека, так как в качестве сырья для производства изделий используются порошки мелкой фракции, что влечет за собой также определенные требования к охране окружающей среды.

Лазерная стереолитография (SLA)

Технология SLA (stereolitho-graphy) представляет собой процесс, в котором источник света определенной длины волны (обычно в ультрафиолетовом диапазоне) используется для селективного отверждения поверхности жидкости в ванне, содержащей в основном фотополимеризуемый мономер в комбинации с требуемой твердой фракцией керамических порошков наряду с другими добавками в очень небольших количествах. Процесс полимеризации, активируемый светом (то есть жидкий мономер превращается в твердую смолу), как правило, протекает от линии к линии, от линии к слою, затем от слоя к слою в соответствии со сканированием света на поверхности жидкости. Когда полимеризация завершается для одного слоя, чан или платформа, поддерживающие производимую деталь, перемещаются по высоте. В результате процесса печати получается геометрия детали из отвердевшей полимерной мат-

рицы с высоконаполненным содержанием керамического порошка. Для получения финального керамического изделия требуется термическая обработка для удаления связующего полимера.

Преимущества данного метода:

- получение деталей сложной структуры и формы, в том числе тонкостенных изделий и мельчайших деталей;
- один из самых лучших показателей точности среди аддитивных технологий в керамическом производстве;
- напечатанный прототип можно использовать как готовый продукт за счет свойств применяемых фотополимеров.

Недостатками данного метода являются:

- Низкая скорость печати и массивность оборудования;
- Высокая стоимость 3D-принтера. Из-за того, что ведущим предприятием – изготовителем данного оборудования является зарубежная компания это ведет к значительным последующим затратам для обслуживания и ремонту данного оборудования;
- Дороговизна и ограниченность в материалах, необходимых для печати изделия (информация актуальна на момент написания статьи).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deckers: 3D printing of ceramics: A review. *Journal of Ceramic Science and Technology*.- Электрон. журнал.- режим доступа: <https://www.omicsonline.org/scholarly/ceramic-materials-journals-articles-ppts-list.php>
2. Питерсков П. Сравнение традиционной технологии изготовления охлаждающих стержней лопаток газотурбинного двигателя и метода 3D-печати керамикой. Спб.: молодежь. техника. космос статьи и доклады XI Общероссийской молодежной научно-технической конференции. Сер. Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ» 2019.
3. Chen Z, Li Z, Li J, Liu C, Liu C, Li Y, Wang P, Yi H, Lao C, Yuelong F. 3D printing of ceramics: A review//*Journal of the European Ceramic Society*. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>
4. Deckers, Jan & Vleugels, Jozef & Kruth, J. (2014). Additive Manufacturing of Ceramics: A Review. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 5. 245–260. 10.4416/JCST2014-00032.
5. Волошина. М.: Технологии 3D печати (SLS, SLA, FDM, MJM).- Электрон. статья. – Режим доступа: <https://klona.ua/blog/3d-pechat-i-prototipirovanie/tehnologii-3d-pechat-sls-sla-fdm-mjm>

УДК 621.791

Ю. В. ЛОГАЧЕВ, В. С. ЛОБАЧЕВ, А. П. ТАЙМЕТОВ
yuryk33@mail.ru, Vladik1997okt@mail.ru, mr.drysha@gmail.com
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. А. С. СЕЛИВАНОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОЙ МЕДИ

Аннотация. В процессе экспериментальных исследований технологии сварки трением с перемешиванием (СТП) чистой технической меди толщиной 5 мм был разработан инструмент для СТП, определен режим сварки и был выявлен дефект в виде заглаженного непровара.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; СТП; сварка меди; медь.

Медь благодаря высокой электро- и теплопроводности, сочетанию прочности и пластичности, а также коррозионной стойкости, находит применение в ряде отраслей промышленности, таких как атомная, электронная, электроэнергетическая, нефтегазовая и химическая промышленность, при изготовлении токоведущих деталей, электротехнических шин силового оборудования, различного технологического оборудования и других изделий.

Сварка меди традиционными способами сварки плавлением осложнена ее высокой теплопроводностью, жидкотекучестью, высокой скоростью окисления при температуре плавления и склонностью к образованию трещин.

Для решения проблем, возникающих при сварке меди возможно применение способов сварки в твердой фазе, одним из которых является сварка трением с перемешиванием (СТП). В настоящее время СТП успешно применяется в различных отраслях промышленности: судостроении, железнодорожном транспорте, аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, строительстве и ряде других [1]. Первоначально данный способ применялся как альтернатива дуговой сварке легких сплавов на основе алюминия, но с развитием процесса СТП начал находить применение для сварки материалов с более высокой температурой плавления. Несмотря на значительное количество публикаций по исследованию и применению процесса СТП, большинство из них

посвящены сварке сплавов на основе алюминия, а количество работ по сварке меди и медных сплавов незначительно.

Схема процесса СТП представлена на рисунке 1. Основными параметрами процесса являются: n – частота вращения инструмента, $V_{св}$ – скорость сварки, α – угол наклона инструмента, P_z – осевое усилие или глубина погружения инструмента l , конструкция инструмента.

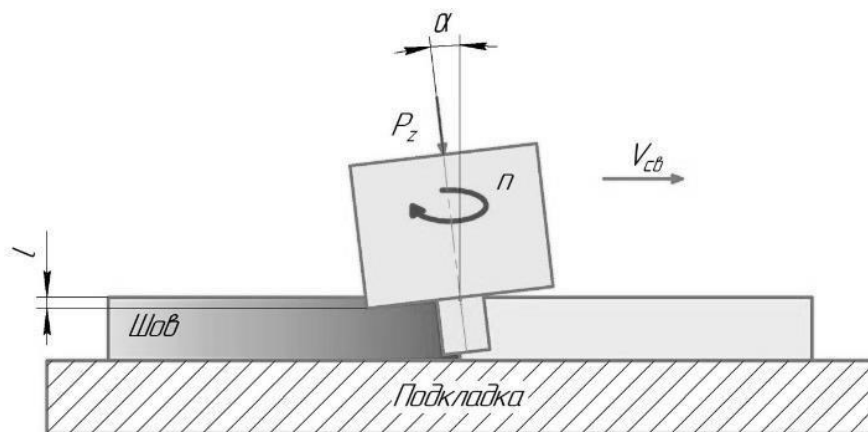


Рис. 1. Схема процесса СТП

В отличие от традиционных способов сварки трением, при которых вращается одна из свариваемых деталей, при СТП сварка производится вращающимся инструментом. Форма инструмента представлена на рисунке 2, в наиболее простом исполнении это цилиндр с плоским заплечиком диаметром D и пином меньшего диаметра d_n длиной l_n .

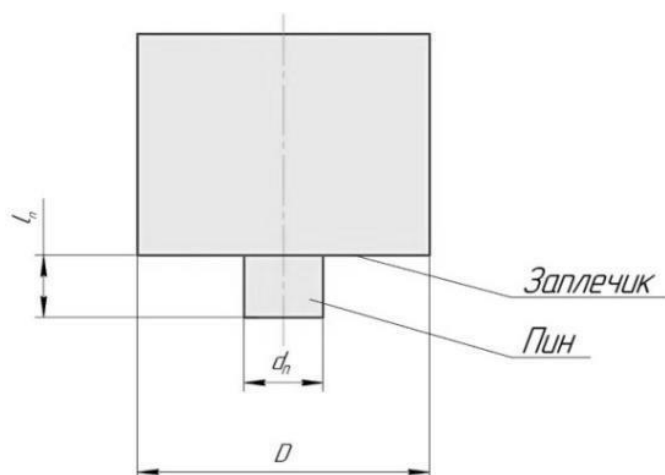


Рис. 2. Инструмент для СТП

Форма пина инструмента влияет на течение пластифицированного материала, микроструктуру и механические свойства сварного шва, сваренной трением с перемешиванием [2]. Надежные соединения могут быть получены с использованием шести различных форм пина, таких как конический, цилиндрический, конический с резьбой, цилиндрический с резьбой, треугольный, квадратный, пятиугольный и шестиугольный.

При выборе материала инструмента при СТП необходимо учитывать теплофизические свойства свариваемых материалов. В работе [3] приведены рекомендации по выбору материала инструмента для СТП меди и ее сплавов. Для сварки рекомендуется применять инструменты из стали Н13, жаропрочных никелевых сплавов, вольфрама и поликристаллического нитрида бора [3], а также комбинированные инструменты с пином из вольфрама и заплечиком из быстрорежущей стали [4].

На основании литературного обзора был сконструирован инструмент для сварки трением с перемешиванием медных листов толщиной 5,0 мм (рисунок 3). Инструмент для сварки включает в себя корпус, выполненный из легированной стали марки 20Х13 и цилиндрический пин из вольфрама. Основные параметры рабочего инструмента D заплечика 25 мм, L пина 4,8 мм, d пина 6 мм.



Рис. 3. Инструмент для СТП меди 5 мм

С использованием данного инструмента был получен пробный образец чистой меди толщиной 5 мм на стальной подкладке при частоте вращения инструмента $n=900$ об/мин, скорости сварки $v=80$ мм/мин и углом наклона инструмента в 1° (рисунок 4) [5,6].



Рис. 4. Образец полученный СТП

После сварки образец был проверен визуально измерительным контролем (ВИК), рентгенографическим контролем (РК) и металлографическим контролем. В результате ВИК поверхностных дефектов не обнаружено. Рентгенографический контроль показал дефект заглаженный непровар по всей длине шва (рисунок 5). Металлографический метод контроля помог выявить, что заглаженный непровар уменьшается в области окончания шва (рисунок 6).

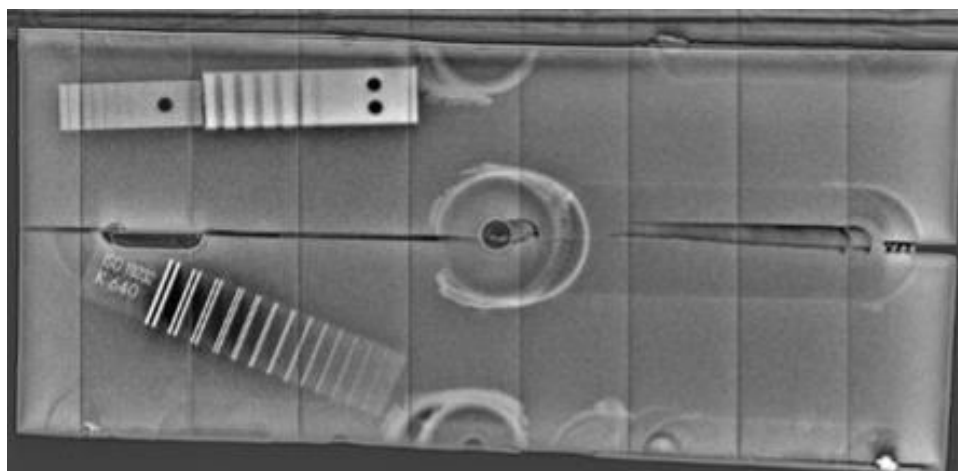


Рис. 5. Рентген снимок образца, полученного способом СТП меди 5 мм

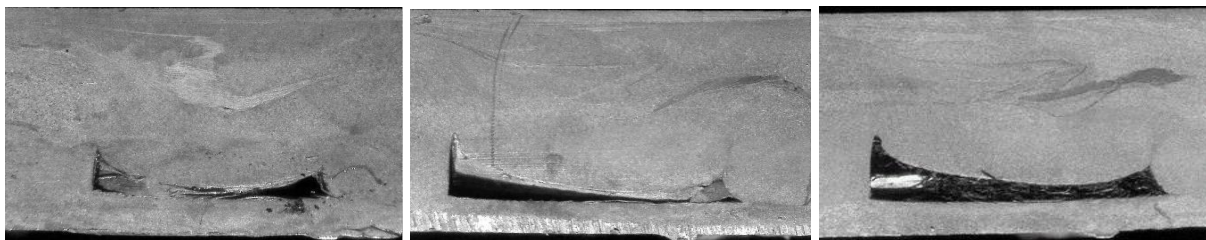


Рис. 6. Макрошлифы образца, полученного способом СТП меди 5 мм:
а – конец шва; б – середина шва; в – начало шва

Выводы

1. В ходе проведенной работы был разработан инструмент для сварки трением перемешиванием меди толщиной 5 мм. Геометрические размеры инструмента: D заплечика 25 мм, L пина 4,8 мм, d пина 6 мм.

2. С использованием разработанного инструмента был получен сварной образец из чистой технической меди толщиной. Режимы сварки: скорость вращения инструмента 900 об/мин, скорость сварки 80 мм/мин, угол наклона инструмента 1° .

3. В полученном образце наблюдался дефект типа заглаженный непровар по всей длине шва.

4. В дальнейших исследованиях, для исключения наблюдаемого дефекта, планируется уменьшить скорость сварки с 80 мм/мин до 40 мм/мин, изменение угла наклона инструмента с 1° до 2° и 3° , увеличение диаметра заплечика с 25 мм до 30 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений. Ч. 3. Промышленное применение процесса СТП. // Сварочное производство. 2007. № 11. С. 36-45.
2. A. Kumar, L. Suvarna Raju. Influence of Tool Pin Profiles on Friction Stir Welding of Copper // Materials and Manufacturing Processes. 2012. Т. 27. № 12. pp. 1414-1418.
3. K. Nakata. Friction stir welding of copper and copper alloys // Welding International. 2005. № 19 (12). pp. 929-933.
4. H. Pashazadeh, J. Teimournezhad, A. Masoumi. Numerical investigation on the mechanical, thermal, metallurgical and material flow characteristics in friction stir welding of copper sheets with experimental verification // Materials and Design. 2014. № 55. pp. 619–632.
5. H. Farrokhi, A. Heidarzadeh, T. Saeid. Frictions stir welding of copper under different welding parameters and media // Science and Technology of Welding and Joining. 2013. Т. 18. № 8. pp. 697-702.

6. H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, A. Heidarzadeh, E. Nazari. Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behavior of pure copper joints // *Materials and Design*. 2012. T. 35. pp. 330–334.

УДК 621.74

О. О. МОДИНА

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. А. С. ГОРЮХИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ И ПРОСЛЕЖИВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИТ

Аннотация. В работе рассматриваются особенности управления и прослеживания технологического процесса получения отливок посредством оцифровки карт контроля. Рассматривается ERP-система и ее основные функции. Рассматриваются функционал технологического процесса, достоинства, недостатки цифрового прослеживания и управления получения отливок на предприятии.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям (ЛВМ); информационные технологии (ИТ); автоматизация; контроль качества; отливка; контролируемые параметры; процедуры контроля; штрихкодирование; ERP-система; Infor LN.

Применение информационных технологий позволяет сократить технологические ошибки и повысить качество труда работников предприятия.

В литейном производстве одной из задач, это получение качественной отливки. Наиболее рациональным способом повышения качества, применение литья по выплавляемым моделям.

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) – это способ получения отливок в многослойных оболочковых неразъемных разовых формах, изготавливаемых с использованием выплавляемых моделей. Применение способа ЛВМ обеспечивает возможность изготовления из любых литейных сплавов фасонных отливок, в том числе тонкостенных и сложных по конфигурации с шероховатостью поверхности $R_z = 20\text{мкм}$ или $R_a = 1,25\text{мкм}$ (ГОСТ 2789-73) и повышенной точностью размеров [1].

В технологический процесс получения отливок входят основные этапы:

1. Изготовление моделей;
2. Изготовление литейных форм;
3. Плавка металла и заливка форм;
4. Выбивка, очистка и термообработка отливок;

5. Контроль качества отливок [2].

При прослеживании получения отливок одним из ответственных этапов в технологическом процессе является контроль качества.

Правильный выбор подходящей информационной системы для производства – непростое и очень важное решение.

На предприятии «ОДК УМПО» внедряется штрихкодирование с использованием системы управления ERP – Infor LN.

ERP (англ. EnterpriseResourcePlanning, планирование ресурсов предприятия) – организационная стратегия интеграции производства и операций, управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами, ориентированная на непрерывную балансировку и оптимизацию ресурсов предприятия посредством специализированного интегрированного пакета прикладного программного обеспечения, обеспечивающего общую модель данных и процессов для всех сфер деятельности. ERP-система – конкретный программный пакет, реализующий стратегию ERP [3].

Основные функции - ERP системы:

- 1) ведение конструкторских и технологических спецификаций;
- 2) управление спросом и формирование планов производства;
- 3) планирование потребностей в материалах;
- 4) управление запасами и закупочной деятельностью;
- 5) планирование производственных мощностей;
- 6) функции управления проектами.

Основные бизнес-цели применения ERP системы:

Сокращение трудозатрат и минимизация количества ошибок пользователей в системе Infor LN;

- Ведение нормативных данных о качестве продукции;
- Регистрация фактических данных о качестве продукции;
- Оценка состояния продукции и стабилизация технологического и производственного процессов.

– Признание продукции несоответствующей либо годной по результатам контроля.

Для прослеживания и управления технологическим процессом получения отливок пользователь, (чаще всего инженер-технолог) ведет в системе перечень контролируемых параметров, а также режимам и условиям их контроля, таким образом, создавая справочник параметров в системе. При этом для каждого параметра может быть указан инструмент, с помощью которого контролируется данный параметр.

Далее технолог ведет в системе перечень процедур контроля параметров, а также нормативных значений контролируемых параметров. При этом выполняется привязка процесса контроля к изделиям и операциям маршрутов их изготовления.

На основании выполненного распределения процедур контроля по операциям – система выполняет автоматическое планирование заданий на контроль в соответствии с пооперационным планом производства.

По мере выполнения производственных операций система производит выдачу заданий на операционный контроль качества.

Пользователь (в дальнейшем, контролер бюро технологического контроля), у которого есть в системе роль «Операционный контроль качества» выполняет регистрацию фактических значений контролируемых параметров.

На основании введенных данных система автоматически выдает заключение о признании продукции годной – путем сравнения фактических данных с нормативными, которые прежде вводились в справочник параметров.

Продукция, по которой контроль пройден, регистрируется на операции как годная и передается в дальнейшее производство. Продукция, по которой контроль не пройден – регистрируется на операции как несоответствующая и исключается из дальнейшего производства.

Несоответствующая продукция передается на склад-изолятор. Далее на нее составляется карточка несоответствия, выявляется виновник, производится

расследование причин несоответствия, разрабатываются и выполняются корректирующие мероприятия. В результате, принимается решение о дальнейшем движении указанной продукции.

На основании принятого по несоответствию решения – система автоматически формирует действие (признание годным, доработка, списание) для продукции, находящейся на складе-изоляторе.

Если по несоответствующей продукции принято решение - брак, то выполняется процесс оформления акта на брак, продукция утилизируется.

Если по несоответствующей продукции принято решение об использовании (с доработкой или без доработки), то продукция передается со склада-изолятора в производство.

По итогам выполненного контроля изделий, а также выполнения производственных операций – в системе предусмотрено формирование электронного паспорта изделия в виде отчетной формы, содержащей показатели качества и технологического процесса.

Основные преимущества и недостатки системы управления ERP – INFOR LN

Преимущества системы:

1. Рациональное использование материальных и человеческих ресурсов предприятия;
2. Достоверность и своевременность учетной информации;
3. Единое хранилище информации об отливках, деталях и ДСЕ;
4. Прослеживание и управление технологическим процессом производства продукции;
5. Прозрачность производства продукции;
6. Оперативное отражение данных и результатов, что дает возможность принимать обоснованные управленческие решения в режиме реального управления.

7. Увеличение скорости принятия решений, так как информация доступна для всех работников, имеющих необходимые полномочия в системе.

Недостатки системы:

1. Затраты на расходы на оборудование и обучение персонала;
2. Риск возникновения сбоя в системе Infor LN;
3. Возникновение ошибок в процессе ввода параметров и регистрации фактических данных, замедляющих процесс;
4. Отсутствие у кадров базовых навыков и умений в ОС Windows.

Таким образом, благодаря внедрению системы управления ERP – Infor LN осуществляется контроль выполнения процессов, мониторинг отклонений и оперативная реакция на них, иными словами реализуются полная прослеживаемость и контроль технологического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В.А., Анисович Г.А., Бабич В.Н. и др.; Под общ. ред. Ефимова В.А. Специальные способы литья: Справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
2. Иванов В.Н., С. А. Казеннов и др. под общ. ред. Я. И. Шкленника, В. А. Озерова. Литье по выплавляемым моделям / В. Н. Иванов, С. А. Казеннов и др. под общ. ред. Я. И. Шкленника, В. А. Озерова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М: Машиностроение, 1984. – 408с.
3. Автоматизация литейного производства А. С. Горюхин, Е. С. Гайнцева, А. А. Ганеев, И. И. Шайхутдинова 2018. 134 с

УДК 621.791

В. В. НИКИТИН, Р. М. ИШНИЯЗОВ
vladislav.n2010@mail.ru, renat.ishni@gmail.com
Науч. руковод. – Р. Ш. САФИУЛЛИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПОЛУЧЕНИЕ НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПЛАСТИН ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СПОСОБОМ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Аннотация. В результате экспериментальных исследований технологии сварки трением с перемешиванием (СТП) алюминиевого сплава АМг4 толщиной 6 мм был разработан инструмент для СТП, определены режимы сварки и проведены исследования сварного соединения. Даны рекомендации для дальнейших исследований сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; СТП; сварка алюминиевых сплавов, сварные соединения и конструкции, рабочий инструмент, режимы сварки, сварочное оборудование.

Проблема сварки алюминиевых сплавов традиционным способом (клепка, дуговая сварка плавящимся электродом в среде инертного (MIG) или активного газа (MAG), ручная сварка неплавящимися вольфрамовыми электродами в среде защитного газа - аргона (TIG), а также высоко - энергетическая лазерная или электронно-лучевая сварка) заключается в склонности к образованию дефектов: рыхлостей, цепочек пор в шве и у зоны сплавления, трещин в высокотемпературной ЗТВ, включений прочной оксидной пленки и ферросплавов в шве [1, 2]. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование сравнительно нового сварочного процесса - сварки трением с перемешиванием (СТП), известного в России с 1967 года [3] и реализованного в Великобритании [4] в 1990-х годах в Технологическом институте сварки (TWI – Techno-logicalWeldingInstitute) [1].

Исследования, выполненные в последние годы показали, что СТП является эффективным способом получения высококачественных соединений различной геометрии, включая листовые материалы, пространственные профильные конструкции, трубы, восстановления изношенных деталей, модифицирования и

улучшения структуры материалов, заживления трещин и литейных дефектов. Обладая широкими технологическими возможностями по получению неразъемных соединений деталей и узлов, она может быть использована в качестве альтернативы заклепочным соединениям, контактной, шовной электродуговой, электроннолучевой и лазерной сварки.

Таким образом, СТП становится универсальной технологией, имеющей большие перспективы в различных отраслях производства [1]. По мнению ведущих мировых экспертов, данный процесс является революционным в области сварки листовых материалов из легких сплавов (алюминиевых и магниевых).

Целью исследования является разработка инструмента и определение режимов сварки на которых образуется сварное соединение пластин из сплава АМг4 толщиной 6,0 мм.

Для реализации процесса сварки использовался вертикальный консольно-фрезерный станок FSS-400 показанный на (рисунок 1).



Рис. 1. Фрезерный станок FSS 400 [4]

Несмотря на большое количество патентов по СТП, а так же большой объем исследований в области разработки инструментов, определенной методики по разработки инструмента нет. Основным требованием к конструкции инструмента является обеспечение нагрева металла в зоне сварки до пластического состояния, перемешивание его по всей толщине свариваемых кромок и перемещение в замкнутом объеме при избыточном давлении.

Для разработки сварочного инструмента необходимо определить следующие параметры: диаметр пина; длина пина; диаметр заплечика; материал инструмента.

На основании литературного обзора и экспериментальных данных, была сконструирована форма инструмента для сварки трением с перемешиванием листов из сплава АМг4 толщиной 6,0 мм, так же удалось найти информацию рекомендательного характера по подбору некоторых параметров инструмента, для получения качественного сварного соединения листов из сплава АМг4 толщиной 6,0мм.[5,6]:

– Диаметр заплечика D отвечает за генерирование тепла и перемешивание верхних слоев металла. Используя дополнительные источники информации было решено принять диаметр заплечика 25 мм.

– Пин отвечает за перемешивание металла по толщине (дробление оксидных пленок и их равномерное распределение в объеме, обеспечение физического контакта, активация поверхностей) свариваемых заготовок. Пин имеет форму усеченного конуса, что бы предупредить разрушение пина под большими касательными напряжениями, которые будут возникать в процессе сварки. Диаметр конуса приняли 6,0 мм. Угол наклона между осью и образующим 15°

– Длину инструмента (без учета пина) приняли, основываясь на глубину установки инструмента в патрон ЧПУ, на котором планируется проводить эксперименты, так же учитывались и параметры оснастки, чтобы рабочие элементы станка и оснастки не препятствовали нормальному протеканию процесса. Длину инструмента (без учета пина) приняли равным 59,7 мм;

Инструмент для СТП работает в достаточно сложных условиях: при высокой температуре и значительных нагрузках, поэтому крайне важно правильно подобрать материал инструмента. Для данной конструкции была выбрана легированная сталь марки 20Х13. Химический состав стали представлен в табл. 1 [7].

Химический состав стали марки 20X13 [7]

Примеси	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Fe
Содержание, %	0,16-0,25	До 0,6	До 0,6	До 0,6	До 0,025	До 0,03	12-14	~84

Опираясь на вышеописанные данные, был разработан инструмент в соответствии с рис. 2.



Рис. 2. Рабочий инструмент для СТП алюминия 6,0 мм

Основными параметрами рабочего инструмента для сварки алюминия толщиной 6,0 мм способом СТП являются: диаметр заплечика 25 мм; длина пина 6,0 мм; диаметр пина 6,0 мм.

Данным инструментом было выполнено стыковое сварное соединение алюминиевых пластин толщиной 6,0 мм на стальной подкладке.

Сварное соединение представленное на (рис. 3), получено на режиме №5 (таблица 2): частота вращения инструмента $n=900$ об/мин, скорость сварки

$v=80$ мм/мин, угол наклона инструмента в 1° , величина заглабления заплечика 0,43 мм. [8].

Таблица 2

Режимы сварки

№	Частота вращения, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Результат
1	1400	315	Формирование сварного шва не произошло, вследствие разрушения пина.
2	1400	80	Формирование шва произошло с туннельным дефектом (заглаженный непровар) с залеганием на глубине выходного отверстия пина, так же произошел износ пина (стал короче на 0,15 мм)
3	1400	16	Формирование шва произошло с туннельным дефектом (заглаженный непровар) с залеганием на глубине выходного отверстия пина (дефект увеличился по сравнению с экспериментом №2)
4	900	80	Произошло хорошее формирование шва, после визуального осмотра туннельный дефект (заглаженный непровар) не обнаружен. Заглабление заплечика составило 0,74 мм при угле наклона инструмента 1° .
5	900	80	Произошло хорошее формирование шва, после визуального осмотра туннельный дефект (заглаженный непровар) не обнаружен. Заглабление заплечика составило 0,43 мм при угле наклона инструмента 1° .



Рис. 3. Сварка алюминиевого листа толщиной 6,0 мм способом СТП

Из (рисунок 3) видно, что инструмент обеспечивает необходимый разогрев металла, его пластическое деформирование и формирование сварного шва.

Вывод

В ходе исследования получили хорошее формирование сварного шва из алюминиевого сплава АМг4 толщиной 6,0 мм. Во время экспериментов было замечено, что в процессе сварки рабочий инструмент незначительно сточился.

Выяснили, что частота вращения не так важна для формирования шва, в отличие от скорости сварки и угла наклона рабочего инструмента. В дальнейших исследованиях планируется скорректировать режимы сварки таким образом, чтобы полностью уйти от дефекта под названием заглаженный непровара, а именно увеличить угол наклона рабочего инструмента с 1° до 3°, так же следует уменьшить скорость перемещения рабочего инструмента без изменения его частоты вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Людимский Ю.Г., Котлышев Р.Р. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов в строительстве // Научный вестник ВГАСУ. – 2010. - №3. – С. 15-22.
2. Aritoshi M. Friction stir welding of magnesium alloys sheets // Journal of the Japan Welding Society. – 2005. – 74, №3. – С. 18 – 23.
3. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Мелкоступов К.А. К вопросу актуальности исследования сварки трением с перемешиванием конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов // Ученые записки. – 2010. - №11-2(2). - С. 110-125.
4. Технические характеристики фрезерного станка FSS-40
URL: http://stanki-katalog.ru/sprav_fss400.htm
5. Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Подбельников С.В. Влияние параметров процесса сварки трением с перемешиванием на формирование швов соединений алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5мм // Автоматическая сварка.. – 2008. - №10. – С. 27–30.
6. Третьяк Н.Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка.. – 2002. - №2. – С. 12–21.
7. Марочник стали и сплавов URL: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1429
8. Сафин В.Н., Щуров И.А., Федоров В.Б. Отработка технологии сварки трением с перемешиванием для соединения труб из алюминиевых сплавов // Вестник ЮУрГУ– 2012. - №33. – С. 117–121.

УДК 669.2

И. А. ПОДКОПАЛОВ

Fess56rus@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О. Б. ДЕМЕНОК

Уфимский государственный авиационный технический университет

ОБЗОР СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ ТИТАНА

Аннотация. Объектом исследования являются интерметаллиды титана. Целью данной работы является обзор сплавов, на основе интерметаллидов титана.

Ключевые слова: титан; интерметаллид; сплав; никель; кремний; алюминий; бор; жаропрочный.

В настоящее время повышение эффективности авиадвигателей и аналогичных силовых установок становится невозможным без использования принципиально новых конструкционных материалов. Современные жаропрочные сплавы, основанные на твердорастворном и дисперсионном упрочнении, уже не могут в полной мере удовлетворить требования, предъявляемые к изделиям авиакосмической техники ответственного назначения, а в частности, к лопаткам газотурбинных двигателей. Решить эту задачу можно путем использования сплавов на основе интерметаллидов, которые обладают высокой твердостью и коррозионной окислительной и жаростойкостью, а также имеют более высокую температуру плавления, чем исходные металлы, которые образуют интерметаллиды. Благодаря уникальным свойствам интерметаллиды титана находят применение в: медицине (производство стентов, эндопротезов, имплантатов), двигателестроении, энергогенерирующих и турбовентиляционных установках, газотурбинных системах, ракетной технике, самолетостроении, бронетехнике, химическом машиностроении, пищевой промышленности и автомобилестроении. Из интерметаллидных соединений титана наиболее широкое применение получили алюминиды, силициды, бориды и никелиды. Рассмотрим основные особенности этих соединений.

1 Никелиды титана

Соединение Ti_2Ni образуется по перитектической реакции и имеет область гомогенности. Соединение $TiNi$ кристаллизуется из расплава при температуре 1310 оС и имеет наибольшую область гомогенности при 1118 оС. Предполагается, что при температуре ниже 630 оС $TiNi$ эвтектоидно распадается на смесь двух фаз $Ti_2Ni + TiNi_3$. Соединение $TiNi_3$ плавится конгруэнтно при 1380 °С.

Из никелидов титана наиболее известен сплав нитинол (англ. nitinol от англ. nickel — никель, англ. titanium — титан, англ. Naval ordnance laboratory (NOL) — Лаборатория морской артиллерии США, где был разработан материал)— интерметаллидный сплав титана и никеля, обладающий высокой коррозионной и эрозионной стойкостью [1]. Процентное содержание титана — 50 ат. % (45мас.%), никеля — 50 ат. % (55 мас. %), что соответствует формуле $TiNi$.

Главной особенностью данного сплава является то, что он обладает свойством памяти формы. Если деталь сложной формы подвергнуть нагреву до красного каления, то она запомнит эту форму. После остывания до комнатной температуры деталь можно деформировать, но при нагреве выше 40°С она восстановит первоначальную форму. Такое поведение связано с тем, что при кристаллизации взаимное расположение атомов в решетке упорядочивается и это приводит к запоминанию формы.

Помимо теплового эффекта памяти формы сплав нитинол обладает механическим эффектом памяти формы. Эта деформация может быть в 20 раз больше, чем упругая деформация стали. Это вызвано фазовым переходом из высокотемпературной фазы в низкотемпературную. Деформации, связанные с этими фазовыми превращениями, являются полностью обратимыми после снятия напряжения.

Есть информация об экспериментальном искусственном сердце, в котором использовали нитиноловую проволоку толщиной 500 мкм с электропитанием [1].

2 Силициды титана

В техническом титане и конструкционных титановых сплавах, где требуется высокая ударная вязкость, кремний считается вредной примесью, так как, присутствуя даже в небольших количествах (сотые доли процента), резко снижает эту характеристику. Однако кремний является перспективным легирующим элементом, который может существенно повышать жаропрочность и жаростойкость титановых сплавов за счет его ограниченной растворимости.

Силициды титана используют в качестве материалов для нагревателей, работающих в воздушной среде, благодаря их исключительной окислительной стойкости в интервале температур 1300...1700 °С. Также могут успешно применяться для защиты графита, ниобия и других материалов. Испытания силицидов титана толщиной 200 мкм показали, что на ниобии средняя их жаростойкость при 1450°С составляет 70ч, на графите — 800 ч. Весьма перспективно применение силицидов титана для покрытия сталей.

Силициды титана находят применение во многих отраслях промышленности как огнеупорные и химически стойкие материалы, а в самолетостроении, атомной, ракетной и космической технике, главным образом, в качестве жаропрочных и жаростойких.

3 Бориды титана

Благодаря своим уникальным свойствам (тугоплавкость, твердость, электропроводность, а также хорошая коррозионная стойкость) керамика на основе диборида титана применяется в качестве режущего и износостойкого материалов [2–4]. Титан при сильном нагревании взаимодействует с элементарным бором, образуя очень твердые сплавы.

Диборид титана применяется для изготовления испарителей для расплавов металлов и футеровки электролизеров как компонент жаропрочных сплавов, инструментальных материалов, износостойких наплавочных покрытий.

Бориды титана применяют для изготовления индивидуальной броневой защиты в военной промышленности (бронезилеты), бронированных дверей в

самолетостроении, броневой защиты двигателей и корпусов вертолетов и в автомобильной индустрии.

4 Аллюминиды титана

Высокая температура плавления, низкая плотность, высокие модули упругости, возрастание предела текучести (для TiAl) с повышением температуры, стойкость к окислению и возгоранию, высокое соотношение прочность/плотность, жаропрочность — все это создает благоприятные условия для применения этих материалов для авиакосмических двигателей нового поколения.

Аллюминиды титана могут широко применяться в транспортном машиностроении (двигателе- и автомобилестроение). В частности, для производства клапанов и рабочих колес агрегатов турбонаддува в дизельных и поршневых двигателях, что обеспечивает высокую надежность и эксплуатационную стойкость конструкций.

Также аллюминид γ (TiAl) может применяться в газо- и нефтеперерабатывающих установках химической промышленности и в атомном машиностроении, где требуются специфические характеристики — коррозионная стойкость и стойкость к разбуханию под действием излучения [5].

Перспективность использования материалов на основе аллюминидов титана расширяется в связи с развитием работ по созданию нового поколения гиперзвуковых воздушно-космических летательных аппаратов, причем рассматривается применение их как в элементах обшивки, так и в конструкциях реактивных двигателей. Фольгу из аллюминида титана Ti3Al используют для изготовления активно-охлаждаемых сотовых панелей обшивки, многослойных полых легких валов в ракетной технике и т. д. Предполагается применение аллюминида титана в монолитном виде для элементов корпусов компрессоров, турбин, лопаток, камер сгорания, диффузоров и сопел двигателей. Применение деталей из интерметаллидов титана в газотурбинном двигателе взамен применяемых материалов снизит общую массу двигателя и увеличит его тяговооружен-

ность, т.е. отношение тяги к весу. Для повышения пластичности подобных сплавов необходимо ослабить ковалентную связь между Ti и Al путем легирования элементами с большим атомным радиусом или с большим числом валентных электронов. К таким элементам относятся цирконий, гафний, ниобий, молибден, ванадий.

Если ранее для изготовления деталей из интерметаллидов использовали центробежное литье по выплавляемым моделям, то в последние годы все больше ученых по всему миру занимаются изучением возможности создания деталей из титановых сплавов с помощью аддитивных технологий. Аддитивное производство (АП) — это постройка объектов за счет добавления необходимого материала, а не удаления лишнего. Термин «аддитивное производство» подразумевает технологии по созданию объектов за счет нанесения последовательных слоев материала. Модели, изготовленные аддитивным методом, могут применяться на любом производственном этапе как для изготовления опытных образцов (быстрое прототипирование), так и готовых изделий (быстрое производство).

Одним из методов АП является выборочное спекание порошковых материалов. Слои модели вычерчиваются (спекаются) в тонком слое порошкообразного материала, после чего рабочая платформа опускается и наносится новый слой порошка. Процесс повторяется до получения цельной 3D модели. Неизрасходованный материал остается в рабочей камере и служит для поддержки нависающих слоев не требуя создания специальных опор. Другой вариант АП — использование присадочной проволоки в качестве образующего материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нитинол [Электронный ресурс] // URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Нитинол> (Дата обращения: 20.09.21)
2. Ronald G. Munro, J. Res.(2000) Nat. Inst. Stand. Technol., 105.
3. Basu B., Raju G. B., Suri A.K. (2006) International Materials Reviews, 51.
4. Raju G. B., Basu B. (2009) Key Engineering Materials, 395.
5. Titanium'2003: Science and Technology. Proc. 10th World Conf. on Titanium, 13–18 July 2003, Hamburg, Germany, 1–5, pp. 3425

УДК 621.791

А. Р. САДРИСЛАМОВ, Ш. Д. ШУГАИПОВ
artem22sad@gmail.com, shugaipov17@gmail.com
Науч. руковод. – Э. И. КАГАРМАНОВ
kagarmanov@naks-rb.ru

Уфимский государственный авиационный технический университет

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СВАРКИ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТА ВИДА «ЗАГЛАЖЕННЫЙ НЕПРОВАР» ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Аннотация. В процессе экспериментальных исследований технологии сварки трением с перемешиванием (СТП) алюминиевого сплава АМг4 толщиной 6 мм был разработан инструмент для СТП, определены режимы сварки и их влияние на дефект в виде заглаженного непровара.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; СТП, сварка алюминиевых сплавов; сварка сплава АМг4; заглаженный непровар, тоннельный дефект.

Введение

В процессе изготовления изделий из алюминиевых сплавов возникают трудности при сварке из-за наличия плотной оксидной пленки на поверхности, высокой теплопроводности в сочетании с низким модулем упругости. В связи с этим при плавлении материала в процессе сварки имеет место неравномерно распределение температуры и увеличение объема зоны расплавления, что приводит к повышенной чувствительности структуры сварного соединения к условиям сварки, появлению трещин и других дефектов сварки [1].

Большинства этих проблем можно избежать применением способа сварки алюминиевых сплавов в отсутствие жидкой фазы, из которых наиболее перспективным является способ сварки трением с перемешиванием (FSW). К сожалению, многие публикации по сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов не раскрывают механизм образования и предотвращения тоннельного дефекта или заглаженный непровара.

Заглаженный непровар (канал) предоставляет собой протяженную несплошность внутри сварного шва, ориентированная в долевом направлении [3].

Может образоваться как по толщине, так и выходить на поверхность сварного шва [2]. На рисунке 1 представлен эскиз данного дефекта.

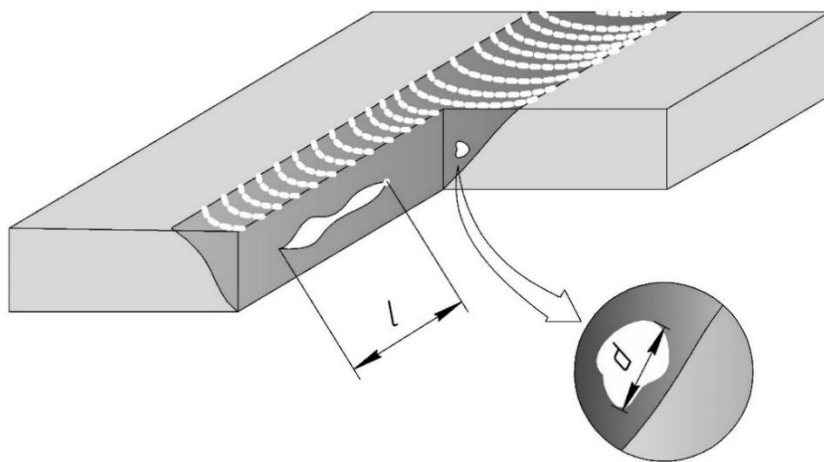


Рис. 1. Эскиз тоннельного дефекта

По ОСТ 134-1051-2010 «Сварка фрикционная. Технические требования к сварным соединениям» данный дефект называется «каналом» и является недопустимым. В ГОСТ ISO 25239-5-2020 «Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 5. Требования к качеству и контролю» данный дефект не обозначен.

Перед авторами встала задача исследовать механизм образования и возможности предотвращения заглаженного непровара.

Материалы и методика исследования

Объектом исследований является сварное соединение двух пластин толщиной 6 мм из сплава АМг4, выполненное сваркой трением с перемешиванием. Химический состав был подтвержден на оптико-эмиссионном спектрометре Belec IN-SPECT.

Работы велись на фрезерном станке модели FSS-400. Для контроля перемещения инструмента использовались цифровые оптические линейки с точностью 0,001 мм.

Исходя из условий работы инструментов, в качестве материала была выбрана сталь 20Х13 [1,2], обладающая высокой теплоустойчивостью. Сварка

осуществлялась на подкладке, выполненной в виде стальной пластины размером 500x300x25.

Первым этапом проводимых работ было получение соединения на различных режимах сварки. В ходе данных работ проводилась оценка внешнего вида получаемых участков. Для выявления дефектов, полученные стыки подвергались оценке внешнего вида, микроструктурному анализу, радиографической дефектоскопии. РГК контроль проводился при помощи программно-аппаратного комплекса цифровой радиографии «Цифракон». Методика контроля проводилась согласно методическим указаниям. По результатам НК режимы сварки корректировались.

Решено было использовать заплечик с плоской формой так как выпуклая форма плеча является неэффективной, а вогнутая приведет к значительному утонению шва [10].

Для упрощения конструкции, форму пина приняли цилиндрическую [8,10]. Определили, что длина пина должна быть равной 90-95% толщины материала [2], так же учли то, что заплечик погружается в материал на 0,2-0,7 мм. Опираясь на вышеописанные данные, был разработан инструмент в соответствии с рисунком 2.



Рис. 2. Инструмент для СТП листов толщиной 6 мм из сплава АМг4

Регулирование режимов сварки производилось по четырем параметрам: частота вращения (n), скорость сварки (v), глубина погружения заплечика (l), угол наклона инструмента (α).

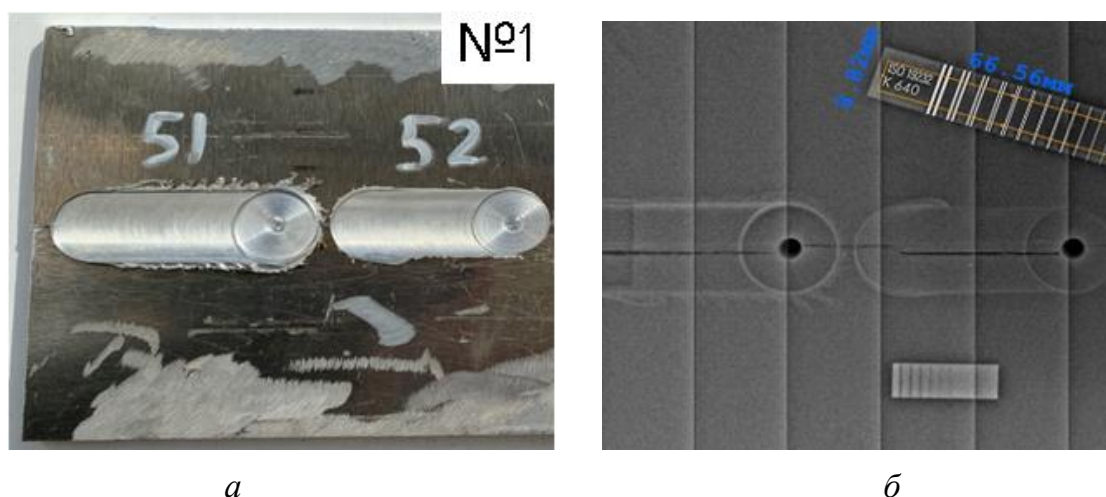
Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 3,а показан образец, на котором проводилась сварка на режимах, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Режимы сварки образца №1

№ соединения	n , об/мин	v , мм/мин	l , мм	α , град.
51	900	80	0,74	1
52	900	80	0,43	1



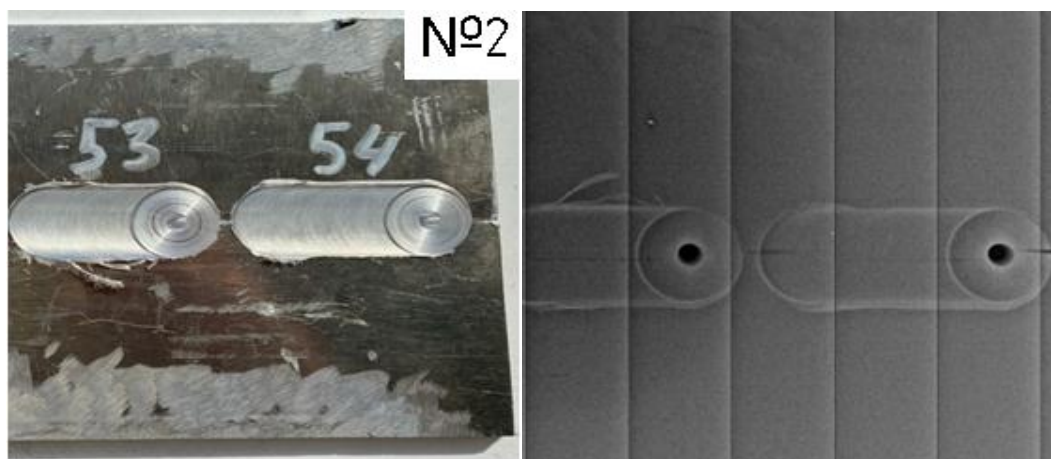
а

б

Рис. 3. Образец № 1:
а – внешний вид; б – рентген снимок

Соединения имеют удовлетворительный внешний вид. На рентген снимке соединения образца №1, представленным на рисунке 4, обнаружен заглаженный непровар, который образовался вследствие недостаточного давления в зоне сварки [2]. Увеличить давление можно увеличив глубину погружения инструмента и угол наклона инструмента.

На основании, проведенных исследований было решено изменить угол наклона инструмента в интервале 2-3° и глубину погружения инструмента, при неизменных скорости сварки и частоты вращения инструмента. На рисунке представлен образец, полученный на режимах, приведенных в таблице 2.



а

б

Рис. 4. Образец №2:
а – внешний вид; б – рентген снимок

Таблица 2

Режимы сварки образца №2

№ соединения	п, об/мин	v, мм/мин	l, мм	α , град.
53	900	80	0,53	2
54	900	80	0,51	3

Рентген снимок (рисунок 4,б) образца №2 показал уменьшение дефекта заглаженного непровара по сравнению с образцом №1.

Для полного исключения данного дефекта было решено изменить скорость сварки и частоту вращения, глубину погружения инструмента. На рисунке 5 показан образец №3, на котором проводилась сварка на режимах, приведенных в таблице 3.

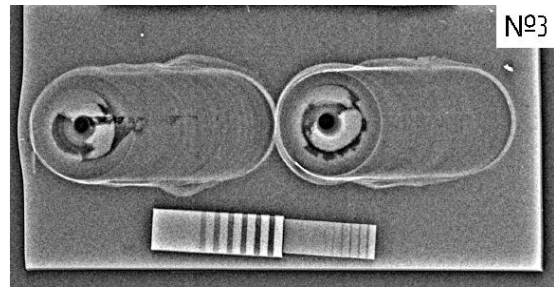
Таблица 3

Режимы сварки образца №3

№ соединения	п, об/мин	v, мм/мин	l, мм	α , град.
81	1400	16	0,64	3
82	1400	16	0,55	3



a



б

Рис. 5. Образец №3:
a – внешний вид; *б* – рентген снимок

Соединения имеют удовлетворительный внешний вид. Радиографический контроль не выявил дефект заглаженный непровар на соединении 81.

Для оценки величины заглаженного непровара, был проведен металлографический контроль сварных соединений. На рисунке 6 представлены результаты.



a



б



в



г

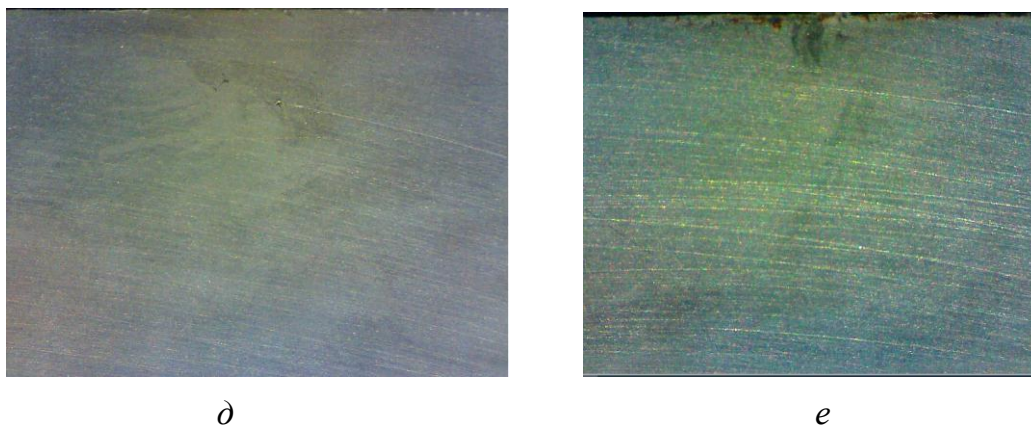


Рис. 6. Макрошлифы образцов с 6 кратным увеличением:
а – соединение №51; *б* – соединение №52; *в* – соединение №53;
г – соединение №54; *д* – соединение №81; *е* – соединение №82

В результате проведения металлографического контроля было выявлено, полное исключение заглаженного непровара.

Выводы

Заглаженный непровар по толщине образуется вследствие недостаточного давления на свариваемый металл. Экспериментально выявлено, что увеличение угла наклона инструмента в пределах 2-3°, глубины погружения инструмента уменьшает размер заглаженного непровара. Полное устранение дефекта стало возможным после увеличения частоты вращения инструмента и уменьшения скорость сварки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов в строительстве/ Ю.Г. Людимский, Р.Р. Котлышев// Научный вестник ВГАСУ. – 2010. - №3. – С. 15-22.
2. Котлышев Р.Р. Сварка трением с перемешиванием алюминиевого сплава АД31 / Р.Р. Котлышев // Сварочное производство: сб. тр. молодых ученых / ДГТУ. - г. Ростов н/Д, 2009. - С. 65-71
3. ГОСТ ISO 25239-1:2011 Сварка трением с перемешиванием алюминий. Часть 1. Словарь.
4. ГОСТ ISO 25239-5-2020 Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 5. Требования к качеству и контролю
5. ОСТ 134-1051-2010 «Сварка фрикционная. Технические требования к сварным соединениям»
6. The role of tool offset on the microstructure and mechanical properties of Al/Cu friction stir welded joints / Wentao Hou, Luqman Hakim Ahmad Shah, Guoqiang Huang, Yifu Shena Adrian Gerlic // Journal of Alloys and Compounds - Volume 825, 5 June 2020.

7. Effect of Tool Rotational Speed on Mechanical Properties Of Aluminium Alloy 5083 Weldments in Friction Stir Welding / K. Aruna Prabha. Prasad Kumar Putha, Balla Srinivasa Prasad // Materials Today: Proceedings - Volume 5 - Issue 9 - Part 3- 2018 – C. 18535-18543
8. Review: friction stir welding tools/ R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia and T. DebRoy//University of Cambridge. – 2011. - №4. – c. 325-342.

А. Ф. СИТДИКОВА, А. В. БЕЛОВ
nastyasitdikova@yandex.ru, 9173759339@mail.ru
Науч. руковод. – М. П. САВИЧЕВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

МЕТОДИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Аннотация. Предпринята попытка изучения возможностей различных методов неразрушающей и разрушающей дефектоскопии для швов, полученных методом сварки трением с перемешиванием (СТП) на медных сплавах. Данный метод сварки не предполагает плавления металла в зоне сварки и поэтому имеет свои типы дефектов. В результате были получены данные о типах дефектов и местах их залегания, которые выявляются отдельными методами. Проведено сравнение результатов по применяемым методам, которое подтверждает вывод о необходимости использования комплексного подхода к дефектоскопии СТП-соединений.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; СТП; сварка меди; медь; неразрушающий контроль; разрушающий контроль.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – это относительно новый процесс соединения, который в настоящее время вызывает значительный интерес. Этот процесс является твердотельным по своей природе и основан на локальной ковке зоны сварного шва для создания соединения [1].

В России СТП активно применяется при разработке принципиально новых образцов техники и прорывных промышленных технологий: автомобильных полуприцепов, железнодорожных вагонов и цистерн, пешеходных мостов и др. Предложены технологии и оборудование для неразрушающего контроля (НК), сварные швы которых выполнены СТП. СТП является одной из разновидностей сварки трением, отличительная черта по сравнению с другими методами состоит в том, что во время процесса движется не свариваемая заготовка, а инструмент. Основные элементы инструмента – пин и заплечник. Медь и ее сплавы широко используются в промышленности благодаря их превосходной электрической и теплопроводности, хорошей прочности, устойчивости к коррозии и усталости. Схема СТП представлена на рисунке 1.

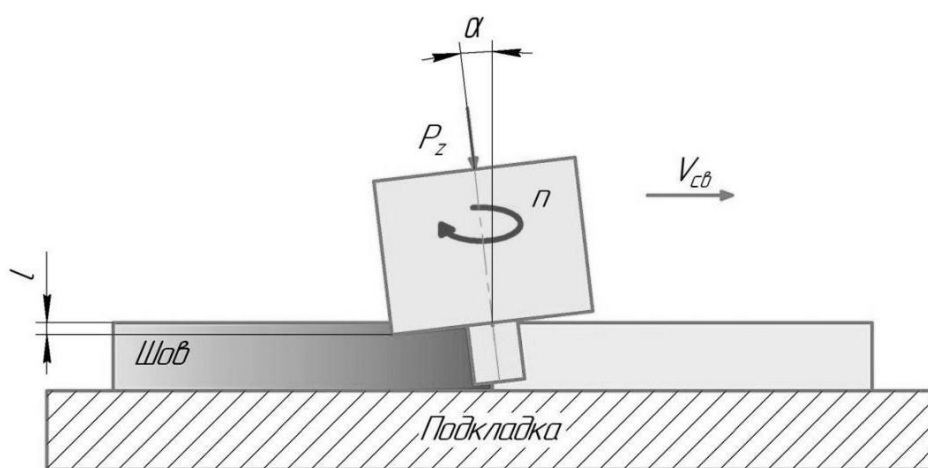


Рис. 1. Схема СТП

Однако сварка меди обычными методами сварки плавлением обычно затруднена из-за ее высокой теплопроводности, которая в 10–100 раз выше, чем у сталей. Следовательно, тепловложение, необходимое для сварки медных сплавов, намного выше, что приводит к довольно низким скоростям сварки. Более высокая теплопроводность и тепловое расширение меди приводят к большей деформации сварного шва, чем сталь.

При дуговой сварке меди и медных сплавов кислород выделяется на границах зерен металла. Это может привести к охрупчиванию сварного шва. Осадочно-твердеющие медные сплавы могут терять свои легирующие элементы из-за окисления во время сварки плавлением, что снижает их прочность. Медные сварные швы часто страдают от неплавления из-за высокой теплопроводности меди, поскольку она снижает концентрацию тепла, необходимого для плавления критической массы металла, и обеспечивает полное заполнение сварочной полости [2].

В настоящее время на кафедре современных методов сварки и неразрушающего контроля конструкций (СМСиКК) ФГБОУ ВО УГАТУ проводятся опытные работы по разработке технологии СТП меди. Из-за отсутствия российских нормативных документов, регламентирующих СТП, одной из ключевых задач является выбор технологии оценки качества полученных соединений.

Целью исследования является практическая проверка эффективности различных методов НК, взятых с зарубежных статей для оценки качества сварных соединений медных сплавов, полученных СТП.

Методика проведения исследования

На момент публикации на переоборудованном под СТП фрезерном станке 6В75 был получен пробный образец медного сплава толщиной 5 мм на стальной подкладке при частоте вращения инструмента $n=900$ об/мин и скорости $v=80$ мм/мин, результат образца представлен на рисунок 2.

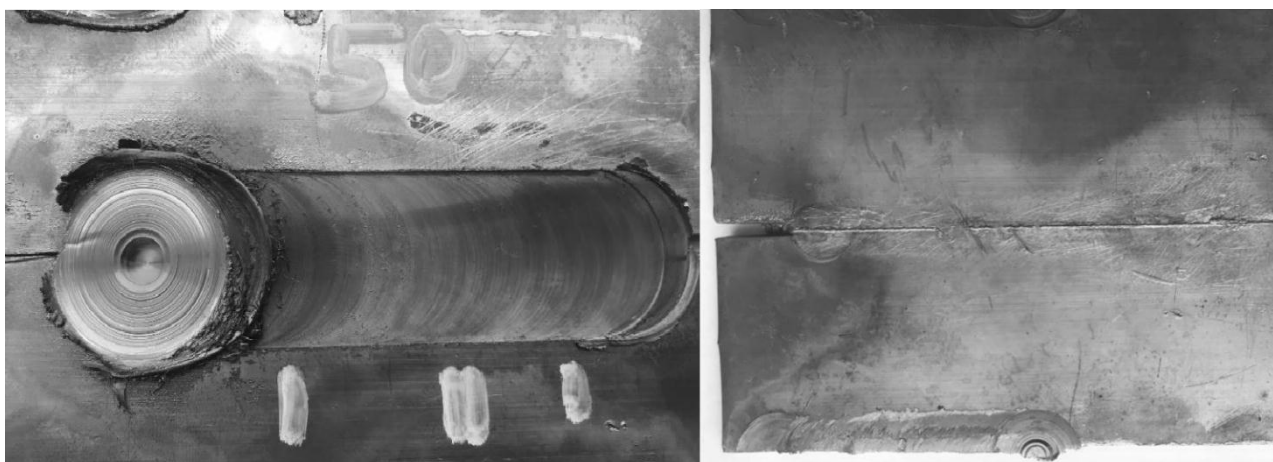


Рис. 2. Образец, полученный СТП

Для полученного образца опробованы часть методов контроля качества, выбранных в ходе литературного обзора статей [3,4,5]: ВИК, капиллярный контроль двумя методами: цветная дефектоскопия (ЦМ), люминесцентный контроль (ЛЮМ-1ОВ), радиографический контроль (РК) и цифровая радиография (ЦРК). Ввиду отсутствия требований нормативной документации к размерам сварных швов, выполненных СТП, на этапе ВИК проводилась проверка отсутствия наружных дефектов.

Образец был разрезан на три части для проведения металлографии. Для шлифования использовались зернистые шкурки со следующей последовательностью зернистости: 120, 320, 860, 1200, 1500, 2000. При переходе на более мелкую зернистость шкурки изменялось направление обработки поверхности на 90° . Затем проводилась полировка образцов на специальном полировальном станке, диск которого обтянут бархатом. Полировальный диск смачивался ал-

мазной суспензии. Для травления образцов использовался реактив Марбле. Результаты контроля представлены на рисунке 3.

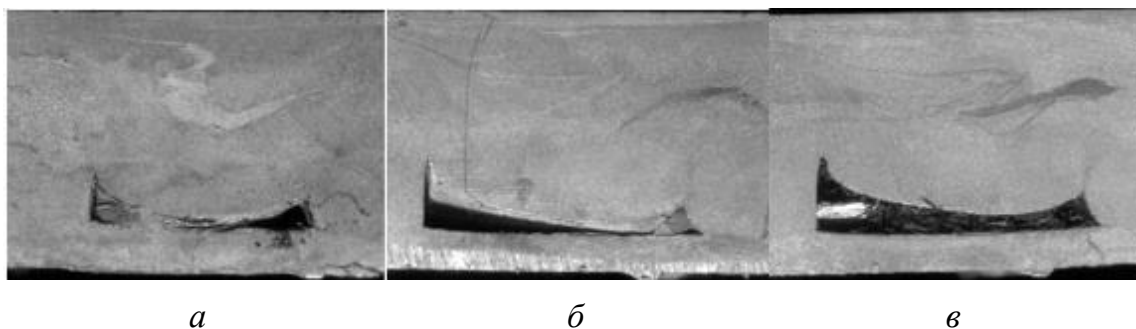


Рис. 3. Макрошлифы образца, полученного способом СТП меди 5 мм:
а – начало шва; б – середина шва; в – конец шва

В результате металлографии был выявлен дефект – незаглаженный непровар по всей длине шва. По снимкам микрошлифов было определено что непровар возрастал от начала шва и до его конца. Это объясняется неправильным подбором параметров сварки и формы инструмента.

РК проводился по 1 классу чувствительности ГОСТ 7512 с использованием источника излучения постоянного действия «Raycraft CP-250» на высококонтрастную пленку Agfa D4 в вакуумной упаковке со свинцовыми усиливающими экранами. Режимы просвечивания: фокусное расстояние $f=500$ мм; время экспозиции 18 сек (0,3 мин). Результаты РК представлены на рис. 4.



Рис. 4. Рентген снимок образца, полученного способом СТП меди 5 мм

ЦРК проводился в соответствии с ГОСТ ISO 17636-2 — 2017 с использованием эталоне типа «дуплекс» на комплексе «Цифракон» с применением им-

пульсного аппарата «Арина 7» на режиме: время экспозиции 5 сек, мощность 20%, 1 кадр. Результат ЦРК представлен на рисунке 5.

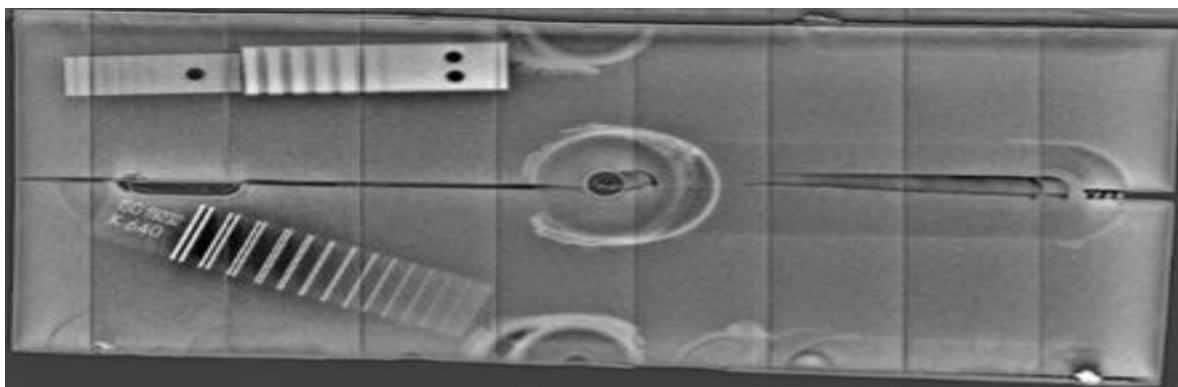


Рис. 5. Цифровой снимок образца, полученного способом СТП меди 5 мм

Для проведения ЦМ использовался набор дефектоскопических материалов «Sherwin» и контрольный образец по 2 классу чувствительности ГОСТ 18442-80 с раскрытием дефекта 2,3 мкм. Контроль проводился в соответствии с инструкцией производителя, указанной на наборе: 1) очистка путем нанесения очистителя DR-60; 2) через 30 секунд после нанесения сушка поверхности сухой тканью; 3) нанесение пенетранта DP-55 на поверхность ровным слоем; 4) через 10 мин. удалить излишки пенетранта с поверхности до исчезновения розового фона с помощью сухой ткани или ткани, смоченной очистителем. 5) сушка поверхности; 6) нанесение проявителя DP-100.

Результаты ЦМ представлены на рисунке 6.

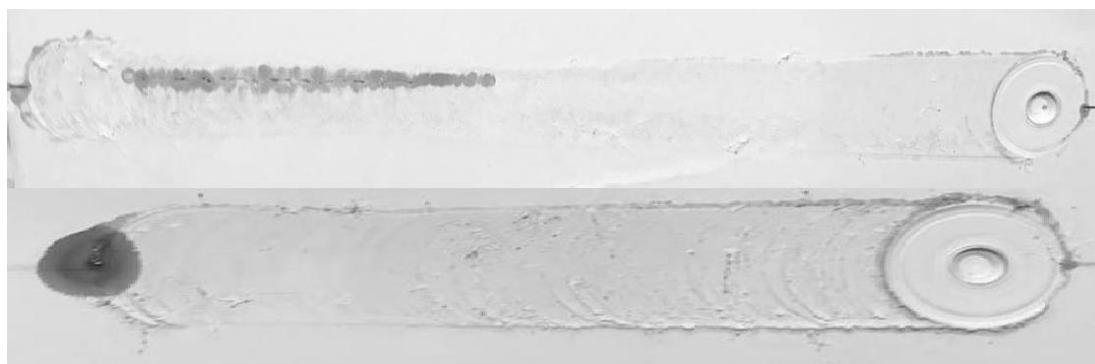


Рис. 6. Результат ЦМ

Для проведения ЛЮМ1-ОВ использовался набор дефектоскопических материалов, рекомендованный для особо ответственных деталей: очиститель

ОЖ-1, люминесцентная жидкость ЛЖ-6А, проявитель ПР-1; а также контрольный образец по 1 классу чувствительности ГОСТ 18442-80 с раскрытием дефекта 0,12...0,5 мкм.

Контроль проводился в соответствии с инструкцией отраслевого авиационного стандарта ОСТ 1 90282-79:

- 1) очистка 5 мин в ацетоне;
- 2) очистка 5 мин. в бензине «Нефрас»; 3) сушка на воздухе 1 час;
- 3) окунание в люминесцентную жидкость ЛЖ-6А на 15 мин;
- 4) удаление излишек пенетранта под струей воды с использованием душевой насадки;
- 5) очистка в жидкости ОЖ-1 40 сек. с непрерывным перемешиванием;
- 6) проверка отсутствия «фона» путем просмотра очищенного образца в ультрафиолетовом облучении;
- 7) сушка не более 5 мин., образец при этом не должен полностью высохнуть; б) нанесение проявителя ПР-1 с использованием краскопульта давлением 2...4 атм.;
- 7) сушка не менее 1 часа;
- 8) осмотр в ультрафиолетовом излучении интенсивностью с использованием фонарика «Микрокон УФ-102». Результаты ЛЮМ1-ОВ представлены на рис. 7.

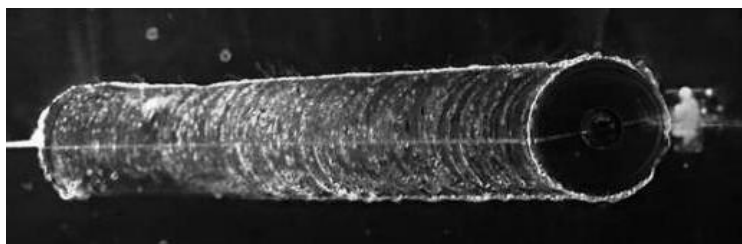


Рис. 7. Результаты ЛЮМ1-ОВ

Выводы

1. ЦМ и ЛЮМ-1ОВ позволяет обнаружить дефекты, выходящие на лицевую поверхность и непровары, выходящие на поверхность со стороны корня. Однако с лицевой стороны контроль затруднителен из-за шероховатости лицевой

вой поверхности шва. Особенно это критично для ЛЮМ-10В, обладающим большей чувствительностью контроля и большими требованиями к подготовке поверхности.

2. РК и ЦРК позволяет достаточно точно определять наличие и расположение непроваров сварных швов, полученных СТП. Данные методы рекомендуются как основные методы обеспечения качества наряду с металлографическими исследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений. Ч. 3. Промышленное применение процесса СТП. // Сварочное производство. 2007. № 11.
2. K. Nakata. Friction stir welding of copper and copper alloys // Welding International. 2005. № 19 (12). pp. 929-933.
3. Филиппов А.В., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А., Рубцов В.Е. // Определение дефекта в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием при неразрушающем контроле. // Фундаментальные исследования. 2015. №6.
4. Е. В. Кривонос И. К. Черных Е. Н. Матушко Е. В. Васильев. // Анализ дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием. // Омский научный вестник. 2017. №2.
5. Hossein Taheri, Margaret Kilpatrick, Matthew Norvalls 3, Warren J. Harper, Lucas W. Koester, Timothy Bigelow, and Leonard J. Bond. // Investigation of Nondestructive Testing Methods for Friction Stir Welding. // Metals. 2019. №9.

С. В. ТОЧИЛКИНА

svetatoc@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О. Б. ДЕМЕНОК

Уфимский государственный авиационный технический университет

АНАЛИЗ СВЯЗУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ЛПВМ

Аннотация. В данной работе рассмотрены связующие материалы, их классификация и сравнительная характеристика. Также представлена рН и электропроводность, вязкость и достоинства связующих.

Ключевые слова: литье; технология; форма; производство; связующее; этилсиликат; водная основа.

В литейном производстве применяют специальные вяжущие добавки, которые принято называть связующими. В процессе изготовления смесей связующие обволакивают зерна песка тонкой пленкой, которая при высушивании прочно скрепляет (склеивает) зерна песка между собой. При этом образуются межзерновые пустоты, которые обеспечивают хорошую газопроницаемость и податливость смеси. Свойство связующих оценивается прочностью, которую они способны сообщать высушенным образцам «восьмеркам», отнесенной к 1 % введенной в смесь связующей добавки.

В основе классификации связующих материалов, используемых в литейном производстве, лежат два основных признака:

- природа материала (органический, неорганический, водный и неводный);
- характер затвердевания (необратимый, промежуточный, обратимый).

Органические материалы не выдерживают высоких температур заливаемого металла и разлагаются, что приводит к облегчению удаления связующего.

Неорганические связующие, напротив, хорошо выдерживают воздействие высоких температур. Они используются для приготовления облицовочных формовочных смесей, а в стержневые смеси добавляются для увеличения прочности в неотвержденном состоянии.

По отношению к воде связующие делятся на водные и неводные.

К *неводным* относятся такие материалы, которые не растворяются в воде и не смачиваются ею, к *водным* – растворимые в воде [1].

Сравнительная характеристика связующих материалов

Сравнительная характеристика связующих материалов представлена в таблице 1 [2].

Таблица 1

Характеристика связующих материалов

Связующее	Бескремнеземное	Кремнезоли	Этилсиликатное
Оксид после термообработки	Al_3O_3	SiO_2	SiO_2
Готовность к использованию	Готовое связующее	Готовое связующее	Требуется гидролиз
Огнеупорность керамической формы, °С	2000	1500	1500
Кинематическая вязкость, сСт	2-3	8-9	2-6
Стойкость формы к действию сплавов	Химическая инертность к жаропрочным и титановым сплавам	Взаимодействует с компонентами жаропрочного и титанового сплава с образованием трудноудаляемого пригара	
Живучесть связующего в закрытой емкости, сут	Не ограничена	Не ограничена	10-30
Живучесть суспензии в закрытой емкости, сут	Не ограничена	Не ограничена	1-5
Условия сушки слоев керамической формы	Камера с повышенной влажностью	Длительная сушка на воздухе	Вакуумно-аммиачная камера

На основании таблицы 1, из основных видов связующих можно выделить кремнезоли, так как они, во-первых, являются экологически безопасными по сравнению с этилсиликатами, а во-вторых, подходят под те задачи, которые стоят перед нами.

Коллоидный раствор кремнезема – готовое связующее, применяемое для литейных красок и форм в литье по выплавляемым моделям. Перечень связующих кремнезоль: Ludox SK (Англия), Remasol LCSi (Англия), Keycote (США), ЕНТ (США), Matrix Sol 30 (США), Армосил KS (Россия), Армосил АМ (Рос-

сия), Армосил SR (Россия), Армосил Л (Россия), Армосил Р (Россия), Армосил Н (Россия) [3].

Плотность связующих материалов и содержание SiO₂

SiO₂ является основным технологическим параметром, отвечающим за прочность керамических форм. Если не корректировать содержание SiO₂, то сокращается срок живучести суспензии и нарушается целостность керамической оболочки. В таблице 2 приведена плотность и концентрации SiO₂ в коммерческих связующих растворах [3].

Таблица 2

Плотность и концентрация SiO₂ в связующих материалах

Марка связующих	Плотность, г/см ³	SiO ₂ , %
Ludox SK	1,176	25,40
Remasol LCSi	1,205	30,00
Keycote	1,205	29,99
ЕНТ	1,265	38,04
Matrix Sol 30	1,214	31,97
Армосил KS	1,184	27,00
Армосил АМ	1,197	29,76
Армосил SR	1,298	41,03
Армосил Л	1,196	29,90
Армосил Р	1,204	30,29
Армосил Н	1,21	30,25

Из таблицы видно, что основной диапазон содержания SiO₂ в ВКС, не зависимо от страны производства, лежит в пределах 25-30%. Исключение составляют связующие под маркой ЕНТ (США) и Армосил SR (Россия). Содержание SiO₂ в них находится в пределах 38-41%. Это обусловлено тем, что данные связующие предназначены для ЛКФ, которые нуждаются в повышенной прочности при длительных термических воздействиях.

pH и электропроводности связующих

Значение pH показывает количество свободных ионов водорода в растворе. ВКС представляют из себя водные золи отрицательно заряженных частиц SiO₂, однако золь не может состоять полностью из отрицательно заряженных частиц, для этого его стабилизируют ионами натрия в виде NaOH. В результате чего величины pH и электропроводности показывают, насколько устойчивы

водно-коллоидные связующие. В таблице 3 приведены значения рН и электропроводность связующих [3].

Таблица 3

рН и электропроводности связующих

Марка связующих	рН	мкСм*см ³
Кислотные связующие		
Армосил KS	3,12	837
Армосил Л	3,12	784
Ludox SK	4,00	1431
Нейтральные связующие		
Keucote	6,74	1838
Щелочные связующие		
Matrix Sol 30	10,49	3750
ЕНТ	10,36	3210
Remasol LCSi	10,10	4510
Армосил АМ	10,65	3970
Армосил SR	10-11	5940
Армосил Р	10,35	4340
Армосил Н	10,42	2670

Из таблицы 3 видно, что золи с кислотной средой имеют значения рН в диапазоне от 3,12 до 4,00, с нейтральной средой – 6,74, со щелочной средой - от 10,35 до 11, а электропроводность возрастает с увеличением значения рН. Значения рН необходимо учитывать при составлении рецептуры керамических суспензий, поскольку некоторые материалы могут приводить к изменению рН связующего и, как следствие, к их огеливанию.

Вязкость связующих

Значение вязкости связующих необходимо для расчета рецептуры керамических суспензий и показывает какое количество наполнителя можно ввести в суспензию. Вязкость связующих представлены в таблице 4 [3].

Вязкость водно-коллоидных связующих

Марка связующих	Вязкость, сСт
Ludox SK	7,06
Remasol LCSi	2,83
Keycote	8,67
ЕНТ	3,38
Matrix Sol 30	4,75
Армосил KS	5,43
Армосил АМ	3,28
Армосил SR	4,04
Армосил Л	6,03
Армосил Р	3,08
Армосил Н	2,73

Из таблицы 4 видно, что вязкость ВКС находится в пределах от 2,73 до 8,67 сСт. Полученные результаты позволяют заключить, что связующие марок: ЕНТ, Remasol LCSi, Армосил АМ, Армосил Р и Армосил Н из-за низкой вязкости могут быть использованы для приготовления суспензий с большим содержанием огнеупорных порошков.

Достоинства водных связующих

- Исключается операция гидролиза (исчезает из оборота кислота, ацетон и т.п.), производство становится пожаро-, взрывобезопасным и экологичным;
- Суспензии на основе водных связующих имеют длительный срок живучести (до 12 месяцев), стабильны по своим свойствам, не требуют дополнительных операций по приготовлению;
- Сводится к минимуму деформация и растрескивание лицевых слоев керамических оболочек;
- Отсутствие пригара на поверхности отливки;
- Хорошая адгезия с воском;
- Более легкое нанесение обливочного слоя;
- Формы не пересушиваются и обладают оптимальной прочностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексенко В.Ю., Рябова М.М., Королев А.В., Бойков А.М. Связующие материалы для литья порошков под давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2015, №3.
2. Емельянов В.О. [и др.]. Водный раствор кремнезоля как альтернатива этилсиликату в лvm // *Литейное производство*. 2012. № 3. с. 30-31
3. Ордин Д.А. Физико-химические основы и технология литейных керамических форм на основе водно-коллоидного кремнезоля // *Порошковая металлургия и композиционные материалы*. 2020.