
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

№ 1(13)
2019

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в
машиностроении 2019» (9 – 13 сентября 2019 года)*

Севастополь 2019

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., проф. – ХАРЧЕНКО А.О.

Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

Редакционная коллегия

АБДУЛГАЗИС У.А.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ГЛЕЗЕР А. М.	д. ф-м. н, проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
БУРНАШЕВ М.А.	д. т. н., доц. (г. Орел)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., доц. (г. Белгород)
КОЗЛОВ А.М.	д. т. н., проф. (г. Липецк)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
МАЛЫШЕВА Г.В.	д. т. н., проф. (г. Москва)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, Украина)
НОСЕНКО В.А.	д. т. н., проф. (г. Волжский)
ОБЖЕРИН Ю.Е.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
НОВОСЕЛОВ Ю.К.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.,	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФЕДОНИН О.Н.	д. т. н., проф. (г. Брянск)
ЯКУБОВ Ф.Я.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ЯРОШЕНКО А.А.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Методика повышения эффективности формообразования режущего твердосплавного инструмента.....	4
Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Метляев И.А. Повышение эффективности шлифования деталей из материалов с эффектом памяти формы	12
Крылова С.Е., Завьялов В.А., Оплеснин С.П. Обеспечение эксплуатационных характеристик оборудования нефтегазодобывающей отрасли на основе совершенствования технологии газопорошковой лазерной наплавки	19
Левченко Е.А., Покинтелица Н.И. Анализ динамики процесса обработки деталей с использованием вибраций	26
Арбузов М.О., Некрасов А.Я., Соболев А.Н. Прогрессивный способ крепления деталей машин на валу.....	31
Хазин М. Л., Апакашев Р.А. Микро- и наноструктурированные пленки меди в машиностроении	38
Асоян А.Р., Горшков А.С., Ерошенко В.О. поверхностное упрочнение титана пластическим деформированием	44
Владецкая Е.А. Расширенная модель объекта для операции шлифования.....	51
Максимов А.Б., Ерохина И.С. Трещиностойкость термически армированного толстолистового проката	57
Ковалев С.В., Кольцов В.И., Портных А.И. Электронно-лучевая сварка титановых шаробаллонов	61

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация; ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября, д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

CONTENTS

Chief Editor

D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.

Associate Editor in Chief

Ph.D., Prof. – KHARCHENKO A.O.

Scientific Editor

D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.

Executive Secretary

Ph.D., Associate Prof. – LEVCHENKO E.A.

Editorial team

ABDULGAZIS U.A.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
GLEZER A.M.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHEV M.A.	D.Sc., Associate Prof. (Orel)
DUYUN T.A.	D.Sc., Associate Prof. (Belgorod)
KOZLOV A.M.	D.Sc., Prof. (Lipetsk)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MALYSHEVA G.V.	D.Sc., Prof. (Moscow)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NOSENKO V.A.	D.Sc., Prof. (Volzhsky)
OBEZHERIN YU.E.	D.Sc. Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAKUBOV F.YA.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Muliukhin N.V. Methods of improving the efficiency of forming cutting carbide tools	4
Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu., Metlyaev I.A. Improving the efficiency of grinding parts from materials with shape memory effect	12
Krylova S.E., Zavyalov V.A., Oplesnin S.P. Ensuring operational characteristics of the equipment of the oil and gas extraction industry on the basis of improvement of technology of gas powder laser building up	19
Levchenko E.A., Pokintelitsa N.I. Analysis of the dynamics of the process of treating details using vibrations	26
Arbuzov M.O., Nekrasov A.Ya., Sobolev A.N. A progressive method of mounting machine parts on the shaft	31
Khazin M.L., Apakashev R.A. Micro and nanostructured copper films in mechanical engineering.....	38
Asoyan A.R., Gorshkov A.S., Eroshenko V.O. Surface hardening of titanium by plastic deformation	44
Vladetskaya E.A. Extended model object for operation grinding	51
Maksimov A.B., Erohcina I.S. Fracture toughness of thermally reinforced steel plates	57
Kovalev S.V., Koltsov V.I., Portnykh A.I. Electron-beam weldina in the manufacture of spherical ballon.....	61

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; FSBEU HE «Bryansk State Technical University», Boulevard 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation

The collection is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass communications. The certificate PI № FS 77 - 64121 of 25.12.2015

УДК 539.3:666.9-16;621.9

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

А.С. Янюшкин¹, Д.В. Лобанов¹, Н.В. Мулюхин¹¹ФГБОУ ВО Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Российская Федерация

Аннотация

В работе обозначена проблема формообразования качественного режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом. Рассмотрены пути решения описанной задачи. Приведена методика модернизации существующего оборудования под процессы комбинированной электроалмазной обработки. На примере станка 3Е624 достаточно подробно описана его модернизация. Для выбора рациональных режимов обработки, с целью получения минимальных разрушений на режущей кромке, приведена методика моделирования алмазного шлифования твердого сплава, которая основывается на модели разрушения Джонсона-Кука. Предложенная методика моделирования позволит сократить время на исследования, направленные на выбор рациональных режимов затачивания для конкретных инструментальных материалов с точки зрения возникновения разрушений вдоль режущей кромки. Сформулированы выводы по результатам исследования.

Ключевые слова: шлифование, модернизация, прогнозирование, режущий инструмент, твердый сплав, качество, разрушение.

METHODS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF FORMING CUTTING CARBIDE TOOLS

A.S. Yanyushkin¹, D.V. Lobanov¹, N.V.¹, Muliukhin¹¹Federal State Educational Budget Institution of Higher Professional Education «The Ulianov Chuvash State University», Cheboksary, Russian Federation

Abstract

In the paper, the problem of shaping a high-quality cutting tool is identified, equipped with a hard alloy. Considered ways to solve the problem described. The method of modernization of the existing equipment for the processes of combined electro-diamond processing is given. By the example of the 3E624 machine, its modernization is described in some detail. For the choice of rational processing modes, in order to obtain minimal damage on the cutting edge, a simulation technique for diamond grinding of hard metal is given, which is based on the Johnson-Cook fracture model. The proposed modeling technique will reduce the time spent on research aimed at choosing rational modes of sharpening for specific tool materials from the point of view of the occurrence of damage along the cutting edge. The conclusions of the study are formulated.

Keywords: grinding, modernization, prediction, cutting tools, carbide, quality, destruction.

Высокопрочные и наноструктурированные конструкционные и инструментальные материалы в машиностроении находят все большее распространение, к подобным материалам относят твердые сплавы, минералокерамика, эльбор, диборид циркония и т.д. Например, в инструментальной промышленности широкое использование для оснащения металлорежущего, горного инструмента, также из него изготавливаются штампы, волокна и быстроизнашиваемых деталей машин получили металлокерамиче-

ские твердые сплавы. Столь широкое применение такие материалы получили благодаря уникальному сочетанию высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик, таких как, твердость, износостойкость, прочность, жаропрочность, жаростойкость, тугоплавкость, но применение таких материалов ограничивается в силу многих причин. Наличие таких недостатков у материала обуславливает некоторые трудности обеспечения требуемого качества изготавливаемых изделий из твердого спла-

ва. Существует несколько вариантов технологий обработки таких материалов, но наибольшее распространение получили методы обработки резанием и комбинированные методы обработки.

В металлообработке все чаще используется режущий инструмент, оснащенный твердым сплавом, постепенно вытесняя из применения другие инструментальные материалы [1]. Рассмотрим проблему обеспечения качества на примере такого инструмента.

Для обработки таких материалов зачастую используют операции черновой и чистовой абразивной обработки. Черновая обработка выполняется, в основном, шлифовальными кругами из карбида кремния на керамической связке. Но процесс характеризуется высокой энергоемкостью, интенсивно протекающими тепловыми явлениями, большими нагрузками, в результате чего на обработанной поверхности, еще на стадии черновой обработки, закладываются дефекты в виде прижогов, структурных межфазных превращений, трещин, глубоких единичных рисков от абразивных и обрабатываемых частиц. Чистовое или получистовое шлифование с длительным выхаживанием обрабатываемой поверхности осуществляется, как правило, алмазными кругами на керамической или бакелитовой связке. Такая технология, к сожалению, экономически малоэффективна, т.к. сопровождается повышенным расходом дорогостоящего алмазного инструмента. Из этого можно сделать вывод, что традиционная технология обеспечения требуемого качества заточенного твердосплавного инструмента - процесс достаточно долгий, трудоемкий и малоэффективный.

Следовательно, требуется повышение эффективности существующих методов обработки и создание новых, также необходимо использовать данные методы с научно обоснованными режимами резания для достижения требуемого качества заточенных режущих элементов [2,3].

Безусловно, на данный момент различными станкостроительными фирмами, заводами выпускаются современные оборудо-

вание, которое позволяет добиться требуемого качества финишной обработки, но стоимость данного оборудования достаточно высокая и достигает десятков миллионов рублей, что резко сокращает экономическую эффективность применения данных станков на предприятиях.

Другой путь решения проблемы обеспечения требуемого качества формообразования режущих элементов из твердого сплава является модернизация существующего оборудования для реализации процессов комбинированной обработки и применения обоснованных режимов обработки [4-7].

Для обработки твердого сплава на финишных операциях рекомендовано использовать алмазные шлифовальные круги [8,9]. Алмазные круги изготавливаются на органической, керамической и металлической связках. Шлифовальные круги на органической и керамической связках имеют ряд недостатков, которые существенно ограничивают область их применение для обработки твердого сплава на финишных операциях. Алмазные круги на металлической связке лишены этих недостатков, но область применения подобных кругов ограничивается из-за высокой склонности к засаливанию, которое происходит в первые минуты работы круга [9-12].

Комбинированные методы обработки позволяют раскрыть весь потенциал алмазных шлифовальных кругов на металлической связке, к ним относятся: электрохимическое шлифование, алмазное шлифование с электрохимической правкой круга и комбинированное электроалмазное шлифование [9].

Комбинированное электроалмазное шлифование представляет собой объединение двух упомянутых способов: электрохимическое шлифование и алмазное шлифование с электрохимической правкой круга [13-15]. То есть одновременно работают две электрические цепи: первая обеспечивает правку круга от засаженного слоя, вторая разупрочняет поверхность затачиваемой поверхности.

С целью реализации указанной техно-

логии комбинированной обработки в качестве примера проведем модернизацию алмазно-заточного полуавтомата модели 3Е624. Станок предназначен для чистового затачивания режущего инструмента может использоваться фирмами, специализирующихся на выпуске металлорежущего инструмента, или может быть применен в инструментальных цехах машиностроительных предприятий при централизованной заточке режущего инструмента [16]. Модернизацию оборудования возможно осуществлять с помощью двух способов:

1. Производится изоляция шпиндельного узла от корпуса станка. Цепь правки реализуется следующим образом: отрицательный полюс подключается к специальному катоду, а положительный полюс - к корпусу станка. Цепь травления - к алмазному кругу на металлической связке через шпиндель и токосъемник подключаются положительный полюс цепи, а отрицательный – к затачиваемому инструменту [17,18].

2. В отличие от первого способа здесь, изолируется стол станка либо приспособление. Подключение электрических цепей аналогично первому варианту. Второй вариант, на наш взгляд, предпочтительнее и менее трудоемок [19-21].

Модернизация станка по второму способу заключается в изоляции алмазного круга на металлической связке от шпинделя вставками из диэлектрика (текстолит). Подача напряжения на круг осуществляется от источника технологического тока через токосъемники. Для предотвращения короткого замыкания токосъемник изолируется от корпуса станка и устанавливается в защитном кожухе. Приспособление, в котором устанавливается обрабатываемая деталь, также изолируется от стола. Таким образом формируется цепь травления, где алмазный круг является катодом, а обрабатываемое изделие анодом, тем самым в процессе затачивания происходит растворение поверхностного слоя твердосплавной пластины.

На защитном кожухе шлифовального круга устанавливается катод, который предназначен для осуществления непрерывного восстановления режущей способ-

ности круга. В результате чего образуется вторая цепь травления, которая препятствует засаливанию алмазного круга на металлической связке. Система подачи электролита в зону правки и травления осуществляет одновременно.

Эффективное использование указанного метода комбинированной обработки возможно только в совокупности с обоснованными режимам обработки [22]. Для выбора рациональных режимов резания необходимо провести исследования с большим количеством натурных экспериментов для создания рекомендаций по выбору рациональных режимов резания, это достаточно длительный и трудоемкий процесс. Существенно могут облегчить задачу применение методов моделирования [23-25]. С целью предварительной качественной оценки методов затачивания инструмента, оснащенного твердосплавными режущими элементами, проведем моделирование процесса затачивания для сокращения объема исследований, экономии материальных ресурсов.

Для начала зададимся граничными условиями процесса формообразования твердосплавной пластины из материала ВК6, которая будет обрабатываться чашечным шлифовальным алмазным АС6 кругом на металлической связке М1, зернистостью F100 (160/125) [26,27]. Скорость резания $V_{кр}=15...45$ м/с, глубина резания $t=0,01...0,03$ мм, продольная подача $S_{пр}=2...6$ м/мин. Предположим, что припуск снимается за один ход (прямой), на обратном ходе съема материала не происходит.

Сделаем некоторые допущения:

- ✓ материал пластины однородный, сплошной, изотропный;
- ✓ начальный радиус скругления режущей кромки равен нулю, пластина абсолютно острая;
- ✓ скорость резания постоянная, с течением времени не меняется;
- ✓ технологическая система абсолютно жесткая;
- ✓ абразивные зерна имеют одинаковую геометрию, ориентированы определен-

ным образом в пространстве и выступают на одинаковую величину из связки с учетом зернистости круга;

- ✓ при обработке не учтено воздействие смазочно-охлаждающих технологических средств;
- ✓ связка шлифовального круга не взаимодействует с обрабатываемым материалом.

Для описания поврежденности воспользуемся уравнением модели разрушения Джонсона-Кука [28]:

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f} \sum_i \Delta \varepsilon_p^i,$$

где $\Delta \varepsilon_p^i$ - приращение эффективной пластической деформации в конечном элементе на i -м шаге интегрирования по времени. Величина ε_f вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_p^f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{\sigma_{ef}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right] \left[1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right],$$

где $D_1...D_5, \varepsilon_0$ – параметры материала; σ_{ef} – эффективное напряжение; p – давление; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; ε_p – эффективная пластическая деформация.

Тогда уравнение определяющее предел текучести будет иметь вид:

$$\sigma_y = \left(A + B \varepsilon_p^n \right) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p^n}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right),$$

где A, B, c, n, m – параметры материала.

Для описания состояния конденсированной фазы материала необходимо использовать уравнение Ми-Грюнайзена в полиномиальной форме:

$$P = A1 + A2 + A3 + (B0 + B1)$$

$$\text{при } \xi = [(p / \rho_0) - 1] > 0 \text{ (сжатие),}$$

$$P = T1 + T2 + B0 \rho_0 E T,$$

$$\text{при } \xi < 0 \text{ (растяжение),}$$

где P – давление; $A1, A2, A3, B0, B1, T1, T2$ – постоянные материала; ρ, ρ_0 – текущая и начальная массовая плотность соответственно; ET – тепловая составляющая удельной внутренней энергии.

Для реализации данной методики можно применять программные продукты, использующие метод конечных элементов. Чтобы результат моделирования был адекватным необходимо выбрать оптимальный размер элемента и определить расчетную область. Они должны быть такими, чтобы процесс моделирования не требовал огромных вычислительных мощностей и результат вычислений был достоверен.

В явной динамике расчет шага по времени, определяется исходя из критерия Куранта-Фридрихса-Леви, который определяет потребность в вычислительных мощностях и продолжительность расчета по времени.

Для получения достоверного результата моделирования необходимо выбрать размер элемента таким, чтобы он был меньше реальных разрушений. При традиционном алмазном затачивании разрушения лежат в диапазоне 0,02...0,1 мм, следовательно, максимальный размер элемента можно условно принять 0,02 мм.

Для снижения требований к вычислительным мощностям необходимо уменьшить расчетную область без снижения точности моделирования, это сократит объем конечно-элементной сетки. Из ранее проведенных исследований [29-33] можно заметить, что разрушения образуются вдоль режущей кромки исходя из этого можно определить расчетную область. геометрические характеристики расчетной области определим из следующих соображений она должна быть такой чтобы на ней могли отразиться краевые и серединные дефекты затачивания без влияния друг на друга, т.е она должна быть в 5...10 раз больше этих разрушений. Исходя из приведенных доводов возьмем расчетную область со следующими геометрическими параметрами длина 3 мм, ширина 1 мм, высота 1 мм.

Итак, использование в совокупности предложенных методик модернизации оборудования и моделирования разрушения твердосплавных режущих пластин позволит:

1. Повысить качество затачиваемого режущего элемента.
2. Снизить затраты на эмпирические

исследования, путем предварительного сужения диапазона варьирования переменных.

3. Повысить экономическую эффективность используемого оборудования на предприятии.

4. Дать качественную оценку методам комбинированной алмазной обработки режущего элемента с заданными геометрическими характеристиками и свойствами материалов.

Список литературы

1. Применение сверхтвердых материалов в промышленности / Гартфельдер В.А., Янюшкин А.С., Гартфельдер В.А., Васильев И.А. // В книге: Проблемы совершенствования подготовки инженерных кадров и научно-технического сотрудничества вузов и предприятий ЧАССР Тезисы докладов научно-практической конференции. 1981. С. 46-47.
2. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Ковалевский С.В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента / Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1 (1). С. 95-98.
3. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Н.П. Петров, Д.А. Рычков // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 146-149.
4. Владецкая Е.А., Братан С.М. Повышение качества шлифовальной обработки в условиях плавающей мастерской / Перспективы науки. 2016. Т. III. С. 247.
5. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Кузнецов А.М. Качественные показатели поверхностей и состояние режущей кромки твердосплавного дереворежущего инструмента, заточенного различными методами электроалмазной обработки / Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2005. Т. 2. С. 153-156.
6. Повышение динамического качества шлифовального станка на основе оптимизации виброизолирующих устройств / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // В сборнике: Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении материалы международной научно-технической конференции. 2015. С. 139-148.
7. Владимирова Ю.О. Технология получения биметаллических разверток для изготовления вкладышей тяжело нагруженных подшипников скольжения / В книге: Юность большой Волги сборник статей лауреатов XVIII межрегиональной конференции-фестиваля научного творчества учащейся молодежи. 2016. С. 51-55.
8. Рычков Д.А., Янюшкин А.С. Технология механической обработки композиционных материалов: монография // Старый Оскол: ТНТ, 2017.- 119 с.
9. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: монография // Старый Оскол: ТНТ, 2012. - 296 с.
10. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Т.788. - С. 17-21.
11. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Poterya rezhushchei sposobnosti almaznykh krugov na metallicheskoj svyazke pri shlifovanii kompozitsionnykh materialov // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva. - 2013. - №1 (47). - С.178-183.
12. Салов П.М., Шалунов Е.П., Матросов А.Л. Состав и выбор связок для алмазных брусков / В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии материалы II-ой Республиканской научно-практической конференции. Министерство образования и науки РФ; ФГБОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова". 2016. С. 126-131.
13. Борисов М.А., Дементьев Д.А., Мишин В.А. Способ электроабразивной обработки труднодоступных поверхностей / Journal of Advanced Research in Technical Science. 2017. № 4. С. 15-16
14. Борисов М.А., Мишин В.А., Дементьев Д.А. Разработка программируемого устройства для управления параметрами тока при электрохимической обработке / В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение Материалы III-ей Всероссийской научно-практической конференции. Ответственный редактор И.Е. Илларионов. 2017. С. 188-192.
15. Борисов М.А., Мишин В.А. Аспекты применения электрохимического шлифования зубопротезных металлических изделий / В сборнике: Новые технологии науки, техники, педагогики высшей школы материалы Международной научно-практической конференции. 2017. С. 157-159.
16. Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С. Технический аудит металлорежущего оборудования / Вестник Чувашского университета. 2004. № 2. С. 103-108.
17. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Янюшкин Р.А. Элементы модернизации станков шлифовальной группы под процессы электроалмазной обработки / Труды Братского государственного

- университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2000. Т. 1. С. 189-190
18. Наладка заточного станка 3б667 при работе методом двойного травления / Гартфельдер В.А., Медведев Б.П., Купцов М.В., Салов П.М. // В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение Материалы III-ей Всероссийской научно-практической конференции. Ответственный редактор И.Е. Илларионов. 2017. С. 268-272.
19. Архипов П.В., Сурьев А.А., Янюшкин А.С. Модернизация плоскошлифовального станка 3е711в под электрофизическое шлифование / Механики XXI веку. 2006. № 5. С. 204-205.
20. Реченко Д.С., Попов А.Ю. Компоновка высокоскоростного оборудования / Омский научный вестник. 2010. № 3 (93). С. 113-115
21. К вопросу о совершенствовании и модернизации / Архипов П.В., Сурьев А.А., Янюшкин А.С., Кулехова Г.М. // Механики XXI веку. 2007. № 6. С. 269-270.
22. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Пути решения проблем формообразования режущего инструмента для обработки неметаллических композитов / Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20. № 3. С. 36-46.
23. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Мулюхин Н.В. Этапы моделирования алмазного затачивания твердосплавного инструмента для обработки композитов / Вестник современных технологий. 2018. № 1 (9). С. 47-52.
24. Определение относительной абразивной способности кругов при безалмазной непрерывной правке / П.М. Салов, В.Н. Цай, С.С. Сайкин, Ю.И. Воронцов, Н.В. Мулюхин // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 4. С. 57-59.
25. Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Методика прогнозирования поврежденности твердого сплава при затачивании инструмента для обработки неметаллических композитов / Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5. № 1-2. С. 78-84.
26. Расчет деформаций при шлифовании чашечными кругами / П.М. Салов, Т.Г. Виноградова, С.С. Сайкин, Н.В. Мулюхин, Р.В. Журавлев, А.В. Лукьянова, М.Е. Назаров // В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве материалы II-ой международной научно-практической конференции. 2016. С. 265-268.
27. Мулюхин Н.В. Расчет точности обработки при шлифовании / В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение Материалы III-ей Всероссийской научно-практической конференции. Ответственный редактор И.Е. Илларионов. 2017. С. 249-252.
28. T. J. Holmquist, G. R. Johnson, W. A. Gooch Modeling the 14.5 mm BS41 projectile for ballistic impact computations // WIT Transactions on Modelling and Simulation, - 2005 - Vol 40, pp. 61-75.
29. Братан С.М., Новоселов Ю.К., Минаев Н.А. Моделирование съема припуска на операциях комбинированного шлифования в пассивирующих средах // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Серия: Машиностроение. - 2009. - №56. - С.244-257.
30. Братан С.М., Сидоров Д.Е., Ревенко Д.В. Моделирование съема материала при шлифовании поверхностей с введением в зону обработки дополнительной электрической энергии. // Вісник СевНТУ. - 2011. - №118. - С.6-14.
31. Formation of wear-resistant structures on solid alloy for superfinish processing / D.S. Rechenko, A.Y. Popov, B.P. Gritsenko, A.R. Sungatulin, Y.V. Titov, V.P. Sergeev, A.V. Voronov, K.A. Deev, V.A. Pupchin // ASEE Annual Conference Proceedings. - 2016. - T.1783. - C.020191.
32. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - T.788. - C. 17-21.
33. Новоселов Ю.К., Братан С.М. Моделирование процессов взаимодействия шлифовального круга и заготовки при чистовом шлифовании // ВісникСевНТУ. - 2011. - №118. - С.92-106.

References

1. Primenenie sverkhтвердых materia-lov v promyshlennosti / Gartfel'der V.A., Yanoshkin A.S., Gartfel'der V.A., Vasil'ev I.A. // V knige: Problemy sovershenstvova-niya podgotovki inzhenernykh kadrov i nauch-no-tekhnicheskogo sotrudnichestva vuzov i predpriyatii ChASSR Tezisy dokladov nauch-no-prakticheskoi konferentsii. 1981. S. 46-47.
2. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Kova-levskii S.V. Povyshenie kachestva podgotovki tverdosplavnogo intrumenta / Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2009. № 1 (1). S. 95-98.
3. Povyshenie effektivnosti obrabotki vysokoprochnykh kompozitsionnykh mate-rialov / A.S. Yanyushkin, V.Yu. Popov, N.P. Petrov, D.A. Rychkov // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki. 2013. T. 1. S. 146-149.
4. Vladetskaya E.A., Bratan S.M. Povyshenie kachestva shlifoval'noi obrabotki v usloviyakh plavuchei masterskoi / Perspekti-vy nauki. 2016. T. III. S. 247.
5. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Kuzne-tsov A.M. Kachestvennye pokazateli poverkh-nostei i sostoyanie rezhushchei kromki tverdo-splavnogo derevorezhushchego instrumenta, za-tochennogo razlichnymi metodami elektroal-maznoi obrabotki /

- Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki. 2005. T. 2. S. 153-156.
6. Povyshenie dinamicheskogo kachestva shlifoval'nogo stanka na osnove optimiza-tsii vibroizoliruyushchikh ustroystv / E.A. Vladetskaya, S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, D.O. Vladetskii // V sbornike: Sovremennye na-pravleniya i perspektivy razvitiya tekhnolo-gii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. 2015. S. 139-148.
 7. Vladimirova Yu.O. Tekhnologiya polu-cheniya bimetallicheskih razvertok dlya izgo-tovleniya vkladyshei tyazhelonagruzhennykh podshipnikov skol'zheniya / V knige: Yunost' bol'shoi Volgi sbornik statei laureatov XVIII mezhregional'noi konferentsii-festivala nauchnogo tvorchestva uchashcheisya molodezhi. 2016. S. 51-55.
 8. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S. Tekhno-logiya mekhanicheskoi obrabotki kompozitsionnykh materialov: monografiya // Staryi Oskol: TNT, 2017. - 119 s.
 9. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Tekhno-logiya instrumental'nogo obespecheniya proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh neme-tallicheskih materialov: monografiya // Sta-ryi Oskol: TNT, 2012. - 296 s.
 10. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - T.788. - S. 17-21.
 11. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Poterya rezhushchei sposobnosti almaznykh krugov na metallicheskoj svyazke pri shlifovanii kompozitsionnykh materialov // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva. - 2013. - №1 (47). - S.178-183.
 12. Salov P.M., Shalunov E.P., Matro-sov A.L. Sostav i vybor svyazok dlya almaz-nykh bruskov / V sbornike: Proektirovanie i perspektivnye tekhnologii v mashinostroe-nii i metallurgii materi-aly II-oi Respub-likanskoi nauchno-prakticheskoi konferen-tsii. Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF; FGBOU VPO "Chuvashskii gosudarstvennyi universitet im. I.N. Ul'yanova". 2016. S. 126-131.
 13. Borisov M.A., Dement'ev D.A., Mi-shin V.A. Sposob elektroabrazivnoi obra-botki trud-nodostupnykh poverkhnostei / Jour-nal of Ad-vanced Research in Technical Science. 2017. № 4. S. 15-16
 14. Borisov M.A., Mishin V.A., Demen-t'ev D.A. Razrabotka programmiruemogo ust-roistva dlya upravleniya parametrami toka pri elektrokhimicheskoi obrabotke / V sbor-nike: Proektirovanie i perspektivnye tekhnologii v mashinostroenii, metallurgii i ikh kadrovoe obespechenie Materialy III-ei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konfe-rentsii. Otvetstvennyi
 - redaktor I.E. Illa-rionov. 2017. S. 188-192.
 15. Borisov M.A., Mishin V.A. Aspekty primeneniya elektrokhimicheskogo shlifova-niya zuboproteznykh metallicheskih izdelii / V sbornike: Novye tekhnologii nauki, tekhniki, pedagogiki vysshei shkoly materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi kon-ferentsii. 2017. S. 157-159.
 16. Gartfel'der V.A., Sekletina L.S. Tekhnicheskii audit metallorazhushchego oborudovaniya / Vestnik Chuvashskogo universiteta. 2004. № 2. S. 103-108.
 17. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Yanyush-kin R.A. Elementy modernizatsii stankov shlifoval'noi gruppy pod protsessy elek-troalmaznoi obrabotki / Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Es-testvennye i inzhenernye nauki. 2000. T. 1. S. 189-190
 18. Naladka zatochnogo stanka 3b667 pri rabote metodom dvojnogo travleniya / Gartfel'der V.A., Medvedev B.P., Kuptsov M.V., Salov P.M. // V sbornike: Proektiro-vanie i perspektivnye tekhnologii v mashi-nostroenii, metallurgii i ikh kadrovoe obespechenie Materialy III-ei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Otvetstvennyi redaktor I.E. Illarionov. 2017. S. 268-272.
 19. Arkhipov P.V., Sur'ev A.A., Yanyush-kin A.S. Modernizatsiya ploskoshlifoval'-nogo stanka 3e711v pod elektrofizicheskoe shlifovanie / Mekhaniki XXI veku. 2006. № 5. S. 204-205.
 20. Rechenko D.S., Popov A.Yu. Kompo-novka vysokoskorostnogo oborudovaniya / Omskii nauchnyi vestnik. 2010. № 3 (93). S. 113-115
 21. K voprosu o sovershenstvovanii i modernizatsii / Arkhipov P.V., Sur'ev A.A., Yanyushkin A.S., Kulekhova G.M. // Mekhaniki XXI veku. 2007. № 6. S. 269-270.
 22. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Mu-lyukhin N.V. Puti resheniya problem formo-obrazovaniya rezhushchego instrumenta dlya ob-rabotki nemetallicheskih kompozitov / Ob-rabotka metallov (tekhnologiya, oborudova-nie, instrumenty). 2018. T. 20. № 3. S. 36-46.
 23. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Mu-lyukhin N.V. Etapy modelirovaniya almaznogo zatachivaniya tverdosplavnogo instrumenta dlya obrabotki kompozitov / Vestnik sovremennykh tekhnologii. 2018. № 1 (9). S. 47-52.
 24. Opredelenie odnositel'noi abra-zivnoi sposobnosti krugov pri bezalmaznoi nepreryvnoi pravke / P.M. Salov, V.N. Tsai, S.S. Saikin, Yu.I. Vorontsov, N.V. Muliukhin // Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya. 2016. № 4. S. 57-59.
 25. Lobanov D.V., Muliukhin N.V. Meto-dika prognozirovaniya povrezhdennosti tverdogo splava pri zatachivanii instrumenta dlya obrabotki nemetallicheskih kompozitov / Aktual'nye problemy v mashinostroenii. 2018. T. 5. № 1-2. S. 78-84.
 26. Raschet deformatsii pri shlifova-nii chashechnymi

- krugami / P.M. Salov, T.G. Vinogradova, S.S. Saikin, N.V. Muliukhin, R.V. Zhuravlev, A.V. Luk'yanova, M.E. Naza-rov // V sbornike: Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii i liteinom proizvodstve materialy II-oi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 2016. S. 265-268.
27. Muliukhin N.V. Raschet tochnosti ob-rabotki pri shlifovanii / V sborni-ke: Proektirovanie i perspektivnye tekhnologii v mashinostroenii, metallurgii i ikh kadrovoe obespechenie Materialy III-ei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Otvetstvennyi redaktor I.E. Illarionov. 2017. S. 249-252.
 28. T. J. Holmquist, G. R. Johnson, W. A. Gooch Modeling the 14.5 mm BS41 projectile for ballistic impact computations // WIT Transactions on Modeling and Simulation, - 2005 - Vol 40, pp. 61-75.
 29. Bratan S.M., Novoselov Yu.K., Mi-naev N.A. Modelirovanie s"ema pripuska na operatsiyakh kombinirovannogo shli-fovaniya v passiviruyushchikh sredakh //Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy "Kievskii politekhnicheskii institut". Seriya: Mashinostroenie. - 2009. - №56. - S.244-257.
 30. Bratan S.M., Sidorov D.E., Revenko D.V Modelirovanie s"ema materiala pri shlifovanii poverkhnostei s vvedeniem v zo-nu obrabotki dopolnitel'noi elektricheskoi energii. // Visnik SevNTU. - 2011. - №118. - S.6-14.
 31. Formation of wear-resistant structures on solid alloy for superfinish processing / D.S. Rechenko, A.Y. Popov, B.P. Gritsenko, A.R. Sungatulin, Y.V. Titov, V.P. Sergeev, A.V. Voronov, K.A. Deev, V.A. Pupchin // ASEE Annual Conference Proceedings . - 2016. - T.1783. - S.020191.
 32. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - T.788. - S. 17-21.
 33. Novoselov Yu.K., Bratan S.M. Mode-lirovanie protsessov vzaimodeistviya shli-foval'nogo kruga i zagotovki pri chistovom shlifovanii // VisnikSevNTU. - 2011. - №118. - S.92-106.

УДК 629. 923. 1

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Я.И. Солер¹, Д.Ю. Казимиров¹, И.А. Метляев¹¹ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены особенности интерметаллидного сплава никелида титана (нитинола) и проблемы его обработки, который обладает уникальными свойствами. Материал плохо поддается лезвийной обработке и хорошо – абразивной, но требуется оценить формирование опорной способности поверхности высокопористыми характеристиками шлифовальных кругов. Проведено статистическое исследование плоского шлифования контактных поверхностей деталей из никелида титана по показателю относительной опорной части плоскости. Показано наличие связи статистических величин по результатам его оценки с характеристикой исследуемых абразивных кругов. Установлено, что нитинол в состоянии аустенита дает показатель опорной способности выше, чем в состоянии мартенсита. Высокопористая характеристика круга оказывает заметное, но не однозначное влияние на опорную способность поверхности. Следы движения круга формируют псевдорегулярный рельеф.

Ключевые слова: поверхность, показатель качества, шлифование.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF GRINDING PARTS FROM MATERIALS WITH SHAPE MEMORY EFFECT

Ya.I. Soler¹, D.Yu. Kazimirov¹, I.A. Metlyaev¹¹FGBOU VO «Irkutsk National Research Technical University», Irkutsk, Russian Federation

Abstract

The features of the intermetallic alloy of nitinol and the problems of its processing, which has unique properties, are considered. The material is poorly amenable to blade processing and well-abrasive, but it is required to evaluate the formation of the bearing capacity of the surface by highly porous characteristics of grinding wheels. A statistical study of the flat grinding of the contact surfaces of nitinol parts in terms of the relative reference part of the plane was carried out. The presence of a relationship between statistical values according to the results of its assessment with the characteristics of the abrasive wheels under study is shown. It has been established that nitinol in the austenite state gives a significant bearing capacity higher than in the state of martensite. The highly porous characteristic of the wheel has a noticeable, but not favorable, effect on the supporting capacity of the surface. Traces of movement of a wheel form a pseudo-regular relief.

Keywords: surface, quality assessment, grinding.

Введение

Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) имеют распространение в авиационно-космической, нефтегазовой, медицинской и других отраслях промышленности [1]. Сплав марки ТН-1 (другие названия: никелид титана, нитинол) является лидером среди материалов с ЭПФ по применению и изученности. В РФ наблюдается отставание от передовых стран Запада и Востока в освоении технологий и выпуске сплавов с памятью формы на несколько лет, несмотря

на объективную потребность широкого применения их в перечисленных отраслях. Выпуск нитинола в РФ не превышает 1 и 15 % от выпуска его в США и КНР соответственно. В настоящее время активизируются работы по получению и применению сплавов с ЭПФ [2].

Нитинол и двойные сплавы TiNi на его основе, обладают ценными механическими и физико-химическими свойствами, например, термическая память формы, сверхэластичность, биосовместимость, кавитационная стойкость, способность демпфировать

колебания в области звуковых частот, поэтому используется в качестве функциональных и конструкционных материалов [3,8]. Исследования [4,5,6] подтвердили его аномально высокую износостойкость (абразивные и адгезионные составляющие), а также хорошую коррозионную стойкость [7], особенно в агрессивных средах.

В крупнозернистом состоянии нитинол обладает пределом прочности $\sigma_B \approx 800$ МПа, а при термоциклировании за счет фазового наклепа увеличивается до 900 МПа. В отличие от других титановых сплавов его упругие постоянные сложным образом зависят от температуры. Так, при охлаждении ТН-1 от 1400 °С до 300 °С модуль Юнга падает в 6 раз (от 60 до 10 ГПа), а при соответствующем нагреве возрастает в 2,5 раза [9]. Изменение состава в пределах 1,5 мас.% титана или никеля меняет температуру начала и конца восстановления формы в интервале от +110 до -70 °С. Сплав марки ТН-1 может находиться в двух структурных состояниях: низкотемпературном, именуемое «мартенсит», и высокотемпературном - «аустенит». Мартенсит сплавов с ЭПФ резко отличается от мартенсита сталей, в которых он имеет высокую твердость и хрупкость. Напротив, мартенсит этого материала характеризуется высокой пластичностью и хорошо деформируется, а аустенит в сплавах ЭПФ более жесткий и прочный.

Известно, что нитинол плохо поддается лезвийной обработке [10], поэтому ее ведут в таких технологических процессах, как шлифование, выравнивание, полирование, притирка и доводка, электроэрозионные методы, где никелид титана обладает повышенной обрабатываемостью по сравнению с обычными материалами. Причиной успешного применения шлифования является свойство поверхности подавлять образование канавок при микрорезании, т.к. данный материал способен к аккомодации пластической деформации. Движение абразивного зерна даже может не сопровождаться образованием концентраторов напряжений и зарождением трещин [4]. Однако шлифование неоднозначно сказывается на коррозионной стойкости, которую по-

вышают последующим электрополированием [7]. Так же можно использовать сплав ЭПФ с крупнозернистой структурой TiNi-Fe, т.к. после шлифования он более устойчив к коррозии, чем TiNi с аналогичной структурой. Тем не менее, дополнительное упрочнение никелида титана легированием приводит к увеличению сопротивления деформации, а также к повышению риска разрушения заготовок при деформации в результате увеличения объемной доли хрупкого интерметаллида Ti₂Ni [2]. Получение мелкозернистой структуры в ТН-1 повышает обрабатываемость при механообработке, предел прочности и микротвердость поверхности H_{μ} до 3800 МПа [11].

Процесс резания сплавов на основе интерметаллидов или упрочненных ими при абразивно-алмазной обработке сопровождается определенными трудностями [12,13,14,15], что связано с высокими силами резания, повышенным износом инструмента и заполнением пор круга хрупкими, но прочными соединениями. Авторами [16], установлено, что нитинол хорошо шлифуется кругами 62С25СМ1К по ГОСТ 424-83 при продольной подаче 10 м/мин и глубине, не превышающей 0,05 мм, т.к. при меньших продольных скоростях в 1,5 раза уменьшается удельная производительность, а при повышенных глубинах более, чем в 3 раза, возрастает сила резания, достигающая 150Н. Однако до сих пор отсутствуют количественные оценки о качестве поверхности деталей, полученных современным инструментом. В связи с изложенным повышение эффективности шлифования сплава TiNi является актуальной задачей. К резервам повышения эффективности шлифования следует отнести: использование инертных, износостойких абразивных зерен и высокопористых кругов (ВПК), создание в зоне резания реакционной среды и др. Из-за малой доли нитинола среди обрабатываемых деталей наиболее перспективными направлениями по улучшению процесса шлифования следует рассматривать первые два, указанных выше.

Экспериментальное исследование

Объект исследования – образцы из сплава ТН-1 следующего эквимольного состава: $Ti_{45,04}Ni_{54,96}$ и $Ti_{44,31}Ni_{55,69}$ (at. %), российского производства (ООО «МАТЭК-СПФ», г. Москва), в состоянии поставки и подвергнутые закалке при $400^{\circ}C$ в воде (ТО), что дало характеристические температуры «срабатывания» (обратного мартенситного перехода) $A_k = +78$ и $+25^{\circ}C$ соответственно. Цилиндрические образцы с размерами $D \times H = 40 \times 35$ мм, обрабатываемые на станке модели 3Г71 по торцу; СОЖ – 5%-ная эмульсия Аквол – 6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7–10 л/мин. Количество параллельных наблюдений – $n = 10$. Форма и характеристики альтернативных кругов, а также режимы шлифования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Абразивный инструмент и режимы шлифования образцов из ТН-1

Форма и характеристика круга	Технологические параметры				
	V_k , м/с	$S_{пр}$, м/мин	t , мм	Z , мм	S_n , мм/д в.ход
Norton 01 250x20x76 39C 46 K8 VK ($i=1$)	35	6	0,01	0,10	4
Molemab 01 250x25x76 08C 070 I12 V01 P1 ($i=2$)					
Molemab 01 250x25x76 08C 046 I12 V01 P2 ($i=3$)					

Примечание к таблице 1: v_k – скорость резания, $s_{пр}$ – продольная подача, t – глубина резания, z – операционный припуск, s_n – поперечная подача.

Круги 39С и 08С изготовлены из карбида кремния зеленого, поставляемого производителями Norton и Molemab. В них варьировалась зернистость от 46 до 70 и структура с пористостью от средней 8 до открытой высокопористой 12 Р1.

Для оценки качества поверхностей деталей используются параметры шероховатости поверхности. В рамках исследования дополнительно проведено современное диагностирование поверхности – цифровое топографирование, поскольку стандартных параметров шероховатости и точности формы недостаточно для характеристики контактной пары деталей и оценки режущих способностей кругов [17]. Для это-

го использован метод красок, который удобен для индикации впадин макронеровностей. Индикатором-наполнителем являлся «Краплак красный» с размерами помола крупниц породы до 2 мкм. Эталонном плоскостности выбрана линейка поверочная ШП–2–400 (класс точности 2). Далее метод включает в себя три этапа: макросъемку исходной поверхности в отраженных лучах света; ее оцифровку в программе Adobe Photoshop CS6 13.1.2 и конвертирование в виде растровых цветных изображений с возможными оттенками не более 16. Численное описание несущей поверхности оценено инновационным показателем – относительной опорной частью плоскости:

$$t_{PM} = 1 - \frac{F_{ВП}}{F_{\Sigma}} \times 100, \quad (1)$$

где F_{Σ} – суммарная площадь проекции; $F_{ВП}$ – площадь проекции впадин.

Возрастание (1) ведет к снижению отклонений от плоскостности сопрягаемых поверхностей и повышает надежность соединений деталей.

Переменные условия шлифования отражены кодом « ij » в выходном параметре процесса – y_{ij} , который обладает большой информативностью при краткой записи. Индексом i закодированы характеристики кругов (таблица 1), индексом j – состояние сплава ТН-1: $j=1$ – без дополнительной ТО, $j=2$ – после закалки. Учитывая неустойчивость и стохастическую природу процесса шлифования, интерпретацию наблюдений, являющихся случайными величинами (СВ), ведем с привлечением статистических подходов. Теоретическая статистика включает два направления: параметрическое и непараметрическое (в частности, ранговое). Характеристиками одномерного распределения для СВ служат: средние $\bar{y}_{ij}$, стандарты отклонений SD_{ij} , размахи R_{ij} – для параметрической статистики; медианы $\tilde{y}_{ij}$, квартильные широты $KIII_{ij} = |y_{0,75} - y_{0,25}|$ – для ранговой статистики. Среднее и медиана характеризуют меру положения СВ, остальные – меры рассеяния (прецизионности) [18].

Оценку эффективности шлифования относительно инструмента $i=1$ ведем для обеих характеристик одномерного распределения $j=1;2$ по оцениваемому показателю (1):

$$\hat{K}_j = (\tilde{t}_{PM(i)} / \tilde{t}_{PM(1)})_j,$$

$$K_j = (\bar{t}_{fM(i)} / \bar{t}_{fM(1)})_j,$$

$$K_{CT1j} = SD_{(1)j} / SD_{(i)j},$$

$$K_{CT2j} = R_{(1)j} / R_{(i)j},$$

$$K_{CT3j} = KШ_{(1)j} / KШ_{(i)j}.$$

На (рис. 1, 2) представлены фотофайлы шлифованной поверхности, на которых выделены две зоны: 1 – впадины макронеровностей, 2 – более ровная зона, формирующая опорную часть поверхности. Качественный анализ конвертированных цветных изображений, показал, что топограмма характеризуется псевдерегулярным макрорельефом с чередующимися выступами и впадинами, направленными по вектору s_{np} . Шаг расположения впадин идентичен подаче s_n . Кинематика процесса шлифования, так же как и для титановых сплавов ВТ-20, ВТ-22 [17], предопределяет формирование систематических погрешностей формы, а поверхность несет на себе вид «слепок» режущей поверхности абразивного круга.

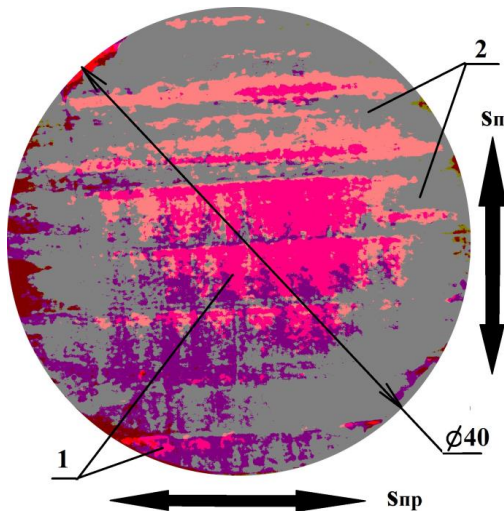


Рис. 1. Фотофайлы поверхности образца марки ТН-1 ($j=2$), прошлифованной кругом 08С 070 I12 V01 P1.

Как видно из (рис. 2), положительно изменилось соотношение между выступами и впадинами поверхности в пользу первых с уменьшением интенсивности окраски, что говорит об уменьшении глубины следа. Псевдерегулярный характер выражен менее ярко для зерен 39С, особенно у сплава с термообработкой $j=2$. Отмечено наличие завалов по краям образца, выделенных цветом #800000 magoon, в основном с одной половины по вектору s_{np} являющийся характерным следом врезания круга в деталь.

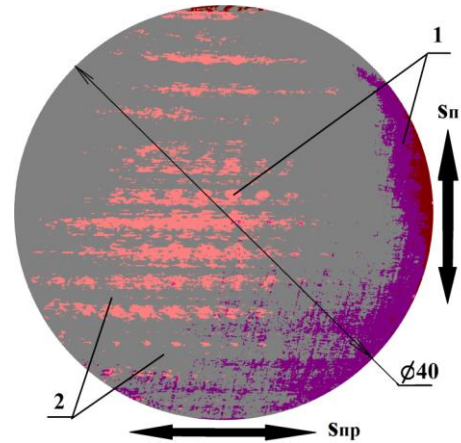


Рис. 2. Фотофайлы поверхности образца марки ТН-1 ($j=2$), прошлифованной кругом 39С 46 К8 VK.

В таблице 2 приведены опытные и ожидаемые меры положения для показателя t_{fMij} и коэффициенты при шлифовании сплава с ЭПФ двух температурных свойств.

Таблица 2. Влияние характеристик кругов на меры положения опорной поверхности и коэффициенты

j	Круг i	Статистические величины t_{fMij} , %				
		$\bar{y}_{ij}$	$\tilde{y}_{ij}$	SD_{ij}	R_{ij}	$KШ_{ij}$
1	1	47,92	47,71	10,32	33,81	12,75
	2	59,77	59,74	15,66	49,64	22,47
	3	64,39	63,31	13,13	39,77	21,46
2	1	79,82	81,94	9,21	31,30	7,07
	2	60,11	58,88	10,25	33,65	15,31
	3	65,04	64,29	10,31	30,51	14,86
j	Круг $i \text{ и } l$	Статистические величины t_{fMij} , %				
		K_j	$\hat{K}_j$	K_{CT1j}	K_{CT2j}	K_{CT3j}
1	2	1,252	1,247	0,659	0,681	0,567
	3	1,3415	1,3437	0,7862	0,8501	0,594
2	2	0,719	0,753	0,898	0,930	0,462
	3	0,7846	0,8148	0,8933	1,026	0,475

Результаты и их обсуждение

Как видно из таблицы 2, характеристики круга оказывают неоднозначное влияние на опорную способность деталей из нитинола с различной температурой обратного мартенситного превращения. Наибольшая величина средней t_{fMij} получена кругом Norton 01 39С 46 К8 VK ($i=1$) при обработке сплава ТН-1 с ТО ($j=2$), равная 79,82%. При этом следует отметить, что другая превалирующая мера положения

($\tilde{y}_{21}=81,94\%$) получена так же для этих переменных и она больше, чем прогнозируемая $\tilde{y}_{22}$ для $i=2$ на 23%, а ее превышение над средней арифметической t_{PM} на 2% указывает на асимметрию распределения. Значения опорной способности поверхности, обработанной данным абразивным инструментом ($i=1$), различается на 32-34% при переходе с $j=1$ на 2, что требует дальнейшего детального анализа (рис. 3 и 4). Для сплава ТН-1 в состоянии поставки ($j=1$) большее значение t_{PM} наблюдается для поверхностей шлифованных кругом Molemab 01 08C 046 I12 V01 P1 ($i=3$), что по K_j и $\hat{K}_j$ в 1,34 раза лучше, чем для конкурирующей характеристики $i=1$, а сами меры положения случайным образом отличаются от полученных $\bar{y}_{21}$ и $\tilde{y}_{21}$ при термообработке ($j=2$). Следовательно, пористая структура круга в сочетании с мелкозернистостью не оказывают существенного изменения на результат t_{PM} при смене материала изделия. Обычная же структура круга $i=1$ в совокупности со средним зерном вероятно создает более сильные эффекты в генезисе макронеровностей на поверхности и требует установления точных границ применимости.



Рис. 3. Поверхность образца марки ТН-1 ($j=1$), прошлифованной кругом $i=1$, $t_{\text{PM}}=35,97\%$.



Рис. 4. Поверхность образца марки ТН-1 ($j=2$), прошлифованной кругом $i=1$, $t_{\text{PM}}=77,34\%$.

Таким образом, установлен факт неудовлетворительной обрабатываемости шлифованием мартенситной фазы никелида титана сравнительно с аустенитной.

При обработке операционной партии заготовок немаловажную роль играет стабильность процесса шлифования, которая регулируется мерами рассеяния. Выявлено, что повышенная стабильность предсказана для круга Norton ($i=1$), т.к. применение высокопористого круга Molemab ($i=2$) ведет к снижению коэффициентов $K_{\text{CT1j}} - K_{\text{CT3j}}$ до 0,567 для сплава ТН-1 при $j=1$ (таблица 2), т.е. к повышенному рассеянию параметра t_{PM} . Менее заметное изменение стабильности получено для сплава ТН-1 при $j=2$. Так параметрические коэффициенты K_{CT1j} , $K_{\text{CT2j}} \approx 0,9$. Хотя непараметрический коэффициент K_{CT3j} не позволяет быть столь оптимистичным в выводах о стабильности. Вероятно, высокопористая структура абразивного инструмента в сочетании с модификацией керамической связки более требовательна к правке круга, а также приводит к неоднородности по износу в течение цикла шлифования.

Соответствующие результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки Российской Федерации по №9.6484.2017/8.9.

Список литературы

1. Ооцука, К. Сплавы с эффектом памяти формы: пер. с японск. / К. Ооцука, К. Симидзу, Ю. Судзуки [и др.]; под ред. Х. Фунакубо. – М.: Металлургия, 1990.
2. Бледнова Ж.М. Роль сплавов с эффектом памяти формы в современном машиностроении/ Ж.М. Бледнова, М.А. Степаненко. Научно-образовательный курс. – Краснодар, 2012. – 69 с.
3. Корнилов, И.И. Никелид титана и другие сплавы с эффектом памяти / И.И. Корнилов, О.К. Белоусов, Е.В. Качур. – М.: Наука, 1977.
4. Потекаев, А.И. Природа и механизмы абразивного изнашивания материалов с памятью формы на примере никелида титана / А.И. Потекаев, В.А. Хохлов, С.В. Галсанов. Известия Томского политехнического университета, 2012. Т. 321. № 2. – С.107-111.
5. Чертовских, С.В. Влияние размера зерен и температуры контакта на триботехнические характеристики сплава Ti_{49,3} Ni_{50,7} / С. В. Чертовских, Л. Ш. Шустер, А. А. Мисоченко, В. В. Столяров. Воронежский научно-технический вестник, 2015. № 4(14). – С.22-26.
6. Чертовских, С.В. Исследование триботехнических свойств нитинола, полученного интенсивной пластической деформацией / С.В. Чертовских, Л.Ш. Шустер, В.В. Столяров. Вестник научно-технического развития, 2016. №11(111). – С.32-36.
7. Абрамова, П.В. Влияние структуры никелида титана на особенности процесса окисления при нагревании и на коррозионную стойкость в хлоридсодержащих растворах / П.В. Абрамова и др. Известия Томского политехнического университета, 2013. Т. 323. № 3. – С.88-95.
8. Шумилов, И.С. Термомеханические соединения трубопроводов авиационных систем управления. Перспективы. / И.С. Шумилов, Д.Б. Чернов, С.Д. Чернова Гидравлика, 2018. № 1(5). – С.175-193.
9. Тарсин, А. В. Изучение зависимости модуля Юнга никелида титана от температуры. / А. В. Тарсин. Сборник научных трудов [Текст]: материалы научно-технической конференции: в 3 ч.; ч. II / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2012. С. 35-38.
10. Киричек, А.В. Механическая обработка сплавов на основе Ti-Ni / А.В. Киричек, У. Хасьянов, А.Ю. Албагачиев, Д.У. Хасьянова. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2013. № 1 (297). С. 72–82.
11. Чуракова, А.А. Механические свойства сплава TiNi, полученного интенсивной пластической деформацией и последующей термоциклической обработкой. / А.А. Чуракова, Д.В. Гундеров. Вектор науки ТГУ, 2013. № 3. – С.288-291.

12. Xi, X. Grinding of Ti2AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasive wheels: Tool surface topology effect on grinding force and ground surface quality /, Ding, W., Fu, Y. et al. Precision Engineering, 2018 v.53, p.134-145.
13. Xi, X. Grindability evaluation and tool wear during grinding of Ti2AlNb intermetallics / Xi, X., Yu, T., Ding, W., et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, v. 94: p. 1441.
14. Lin, H.C. Study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys / Lin, H.C., Lin, K.M., Chen, Y.C. Journal of Materials Processing Technology. Volume 105, Issue 3, p. 327-332.
15. Попов, В.Ю. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов / В.Ю. Попов, А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, В.Ю. Скиба. Системы. Методы. Технологии, 2014. № 3 (23). С. 68-74.
16. Попов, М.А. Шлифование никель-титановых сплавов / М.А. Попов. СТИН, 1981. №3. – С. 20-21.
17. Солер, Я.И. Подходы к оценке опорной части поверхности шлифованных плоскостей титановых деталей абразивными кругами Norton / Я.И. Солер, Д.Ю. Казимиров. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2014. № 5 (307). С. 142–150.
18. Солер, Я.И. Выбор абразивных кругов при маятниковом шлифовании деталей из титанового сплава BT-22 по высотным параметрам шероховатости / Я.И. Солер, Май Динь Ши. Обработка металлов, 2015. №4(69). – С. 18-27.

References

1. Ootsuka. K. Splavy s efektom pamyati formy: per. s yaponsk. / K. Ootsuka. K. Simidzu. Yu. Sudzuki [i dr.]; pod red. Kh. Funakubo. – M.: Metallurgiya. 1990.
2. Blednova Zh.M. Rol splavov s efektom pamyati formy v sovremennom mashinostroyenii/ Zh.M. Blednova. M.A. Stepanenko. Nauchno-obrazovatelnyy kurs. – Krasnodar. 2012. – 69 p.
3. Kornilov. I.I. Nikelid titana i drugiye splavy s efektom pamyati / I.I. Kornilov. O.K. Belousov. E.V. Kachur. – M.: Nauka. 1977.
4. Potekayev. A.I. Priroda i mekhanizmy abrazivnogo iznashivaniya materialov s pamyatyu formy na primere nikelida titana / A.I. Potekayev. V.A. Khokhlov. S.V. Galsanov. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2012. V. 321. № 2. – pp.107-111.
5. Chertovskikh. S.V. Vliyaniye razmera zeren i temperatury kontakta na tribotekhnicheskiye kharakteristiki splava Ti49.3 Ni50.7 / S. V. Chertovskikh. L. Sh. Shuster. A. A. Misochenko. V. V. Stolyarov. Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik. 2015. № 4(14). – pp.22-26.

6. Chertovskikh. S.V. Issledovaniye tribotekhnicheskikh svoystv nitinola. poluchennogo intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey / S.V. Chertovskikh. L.Sh. Shuster. V.V. Stolyarov. Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya. 2016. №11(111). – pp.32-36.
7. Abramova. P.V. Vliyaniye struktury nikelida titana na osobennosti protsessa okisleniya pri nagrevanii i na korrozionnyuyu stoykost v khloridsoderzhashchikh rastvorakh / P.V. Abramova i dr. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2013. V. 323. № 3. – pp.88-95.
8. Shumilov. I.S. Termomekhanicheskiye soyedineniya truboprovodov aviatsionnykh sistem upravleniya. Perspektivy. / I.S. Shumilov. D.B. Chernov. S.D. Chernova Gidravlika. 2018. № 1(5). – pp.175-193.
9. Tarsin. A. V. Izucheniye zavisimosti modulya Yunga nikelida titana ot temperatury. / A. V. Tarsin. Sbornik nauchnykh trudov [Tekst]: materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: v 3 ch.; ch. II / pod red. N. D. Tskhadaya. – Ukhta: UGTU. 2012. pp. 35-38.
10. Kirichuk. A.V. Mekhanicheskaya obrabotka splavov na osnove Ti-Ni / A.V. Kirichuk. U. Khasianov. A.Yu. Albagachiyev. D.U. Khasianova. Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2013. № 1 (297). pp. 72–82.
11. Churakova. A.A. Mekhanicheskiye svoystva splava TiNi. poluchennogo intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey i posleduyushchey termotsiklicheskoy obrabotkoy. / A.A. Churakova. D.V. Gunderov. Vektor nauki TGU. 2013. № 3. – pp.288-291.
12. Xi, X. Grinding of Ti2AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasive wheels: Tool surface topology effect on grinding force and ground surface quality /, Ding, W., Fu, Y. et al. Precision Engineering, 2018 v.53, p.134-145.
13. Xi, X. Grindability evaluation and tool wear during grinding of Ti2AlNb intermetallics / Xi, X., Yu, T., Ding, W., et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, v. 94: p. 1441.
14. Lin, H.C. Study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys / Lin, H.C., Lin, K.M., Chen, Y.C. Journal of Materials Processing Technology. Volume 105, Issue 3, p. 327-332.
15. Popov. V.Yu. Kontaknyye protsessy pri almaznoy obrabotke instrumentalnykh materialov / V.Yu. Popov. A.S. Yanyushkin. O.I. Medvedeva. V.Yu. Skiba. Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2014. № 3 (23). pp. 68-74.
16. Popov. M.A. Shlifovaniye nikel-titanovykh splavov / M.A. Popov. STIN. 1981. №3. - pp. 20-21.
17. Soler. Ya.I. Podkhody k otsenke opornoy chasti poverkhnosti shlifovannykh ploskostey titanovykh detaley abrazivnymi krugami Norton / Ya.I. Soler. D.Yu. Kazimirov. Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2014. № 5 (307). pp. 142–150.
18. Soler. Ya.I. Vybor abrazivnykh krugov pri mayatnikovom shlifovanii detaley iz titanovogo splava VT 22 po vysotnym parametram sherokhovatosti / Ya.I. Soler. May Din Shi. Obrabotka metallov. 2015. №4(69). – pp. 18-27.

УДК 669.056

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОПОРШКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

С.Е. Крылова², В.А. Завьялов¹, С.П. Оплеснин¹¹ ООО «Технология» Оренбург² Оренбургский государственный университет, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты разработанной промышленной технологии восстановления поверхностикоррозионностойких сталей методом лазерной наплавки. Приведен сравнительный анализ микроструктуры наплавленного износостойкого слоя, зоны сплавления с материалом основы и диффузионной зоны при разных технологических режимах наплавки. Исследовано влияние морфологии частиц присадочного порошка на пара-метрические характеристики валика, полученного лазерной газопорошковой наплавкой. Установлены оптималь-ные режимы наплавки на подложку из стали 12X18H10T. Выполнены испытания на стойкость против межкри-сталлитной коррозии наплавленных порошковых композиций методом АМ. Представлена металлографическая оценка коррозионной стойкости.

Ключевые слова: лазерная наплавка, переходной диффузионный слой, карбидное упрочнение поверхностного слоя, многокомпонентные порошковые композиции, износостойкость, коррозионностойкие стали.

ENSURING OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THE EQUIPMENT OF THE OIL AND GAS EXTRACTION INDUSTRY ON THE BASIS OF IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF GAS POWDER LASER BUILDING UP

S.E. Krylova², V.A. Zavyalov¹, S.P. Oplesnin¹¹ ООО «Technology», Orenburg, Russian Federation² Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

Abstract

Results of the developed industrial technology of restoration of a surface corrosion-resistant staly are presented by method of laser building up. The comparative analysis of a microstructure of the built-up wearproof layer, an alloyage zone with material of a basis and diffusive zone at the different technological modes of building up is given. Influence of morphology of particles of additive powder on parametrical characteristics of the roller received by laser gas powder building up is investigated. The optimum modes of building up on a substrate from steel 12X18H10T are set. Tests for firmness against intercrystalline corrosion of the built-up powder compositions are executed by the AM method. Metal-graphic assessment of corrosion resistance is presented.

Keywords: laser building up, transitional the diffusive layer, carbide hardening of a blanket, multicomponent powder compositions, wear resistance, corrosion-resistant became.

Для защиты металлов и сплавов от различных видов внешних воздействий – износа, коррозии, высоких температур, статических и динамических нагрузжений используются лазерные, плазменные, электронно-лучевые, электродуговые и др. методы нанесения покрытий. Большую практическую значимость имеют покрытия, сочетающие в себе ряд свойств, например, износостой-

кость, кавитационную и коррозионную стойкость, что актуально при эксплуатации таких деталей, как ротора турбин, электродвигателей; корпуса и штоки тяжелонагруженных насосов и компрессоров. Чаще всего потребность в восстановлении и упрочнении подобного рода деталей испытывают предприятия энергетической и нефтегазодобывающей отрасли Оренбуржья такие как:

ООО «Газпром добыча Оренбург», ООО «Центр горизонтального бурения», ООО «Оренбургская Буровая Компания» и др. Как правило, указанные изделия – это детали оборудования сложной геометрии, выполняемый из дорогих сложнолегированных сталей, чаще в импортном исполнении, для которых лазерная наплавка является экономически выгодным процессом с точки зрения материальных затрат и времени на восстановление.

Целью настоящего исследования является повышение эксплуатационной стойкости деталей энергетической и нефтегазодобывающей отрасли за счет разработки и внедрения оптимальной технологии лазерной обработки, обеспечивающей максимальное сочетание механических и эксплуатационных свойств. [10]

Метод лазерной наплавки порошковыми материалами в среде защитных газов применим при восстановлении изношенных или поврежденных поверхностей деталей энергетической и нефтегазодобывающей отрасли в условиях предприятия ООО «Технология» г. Оренбург, которое специализируется на ремонте сложного технологического оборудования.

Отработка технологии восстановления и упрочнения поверхностного слоя изделий методом порошковой наплавки осуществлялась на роботизированном лазерном комплексе, (рис. 1), (таблица 1), включающем:

шестиосевой робот-манипулятор ABB IRB 4600 (Швейцария);

вращатель с регулируемой частотой вращения для точного позиционирования детали;

порошковый дозатор, регулирующий скорость подачи наплавочной смеси в область лазерного излучения;

непрерывный иттербиевый волоконный лазер ЛС-2(ООО «НТО «ИРЭ-Полус», Россия) [6];

программное обеспечение, позволяющее синхронизировать все элементы комплекса и работать в автоматическом режиме.

Оборудование позволяет производить объемное и локальное восстановление и упрочнение изделий различной геометрии

реализуя, как однослойную, так и многослойную порошковую наплавку, получая износостойкий слой заданной толщины, структуры и твердости на изделиях различной номенклатуры. Процесс обеспечивает симметричность относительно направления наплавки, высокую производительность, равномерность формирования валиков, высокий коэффициент использования присадочного материала. Регулируя составы композиций возможно получать наплавленные слои с твердостью от 22 до 50 HRC. [5]



Рис. 1. Внешний вид комплекса лазерной наплавки

Таблица 1 – Параметры лазерной установки ЛС-2

Тип	Длина волны, нм	Мощность, Вт	Режим генерации лазера	Класс опасности
Иттербиевый волоконный лазер	1070	2000	непрерывный (НГ)	IV

Для получения таких параметров, как: мелкозернистая структура; высокая адгезионная стойкость: качественный наплавленный слой с высокими технологическими свойствами, были проведены исследования, направленные на выбор оптимальной фракции наплавляемого металлургического порошка [1].

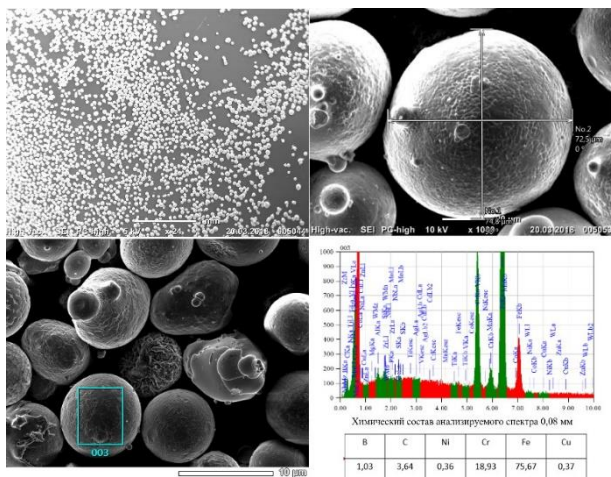
Учитывая состав и свойства основного материала, для восстановления изношенного поверхностного слоя была выбрана следующая наплавочная композиция ПР-20Х13Н2:ПР-НХ15СР2 в соотношении 3:1, представляющая собой самофлюсующую

порошковую смесь с размером фракции 40-100 мкм.

Известно, что качество покрытия существенно зависит от свойств присадочного материала. [1,2] Поэтому оценка влияния размеров части присадочного порошка на формирование и геометрические параметры валика, образующегося в процессе наплавки, представляют определенный практический интерес.

Порошковые композиции перед наплавкой смешивали с помощью смесителя Kewei Mechanical Manufacturing серии SYN в течении одного часа, разделение на фракции производили при помощи набора аналитических сит номиналом 0,125; 0,1; 0,08; 0,063 мкм.

Исследовали микроструктуру частиц порошка с помощью настольного растрового электронного микроскопа JEOL РЭМ NeoScope JCM-6000. [7]



Химический состав анализируемого спектра 0,08 мм

Рис. 2. Параметрический анализ порошка ПР-20X13Н2:ПР-НХ15СР2 с размером фракции 0,08

Из анализа (рис. 2) видно, что большинство частиц металлического порошка имеют правильную сферическую форму, что хорошо видно на их электронно-микроскопическом изображении во вторично рассеянных электронах.

При проведении серии тестовых экспериментов по определению оптимальной фракции металлургического порошка для лазерной наплавки, суть которых заключает-

ся в установлении зависимости формы наплавляемого валика от гранулометрического состава порошка. Также была получена серия единичных валиков и проанализирована их форма. [8]

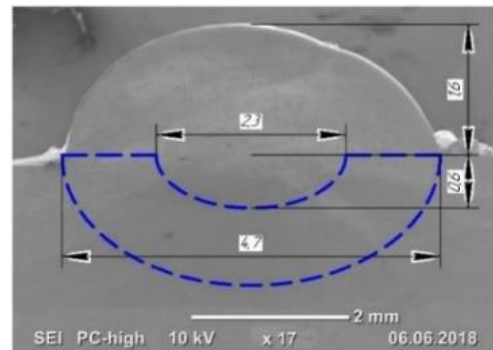


Рис. 3. Принципиальная схема раскроя поперечного сечения наплавленного валика

При анализе формы наплавленных валиков определили их высоту H , ширину L , глубину проплавления основы h , площадь наплавленного слоя S_c и площадь переплавленного основного металла S_m . [2] Коэффициент перемешивания K и формы валика D оценивали следующим образом:

$$K = H / L; \quad D = S_m / (S_m + S_c)$$

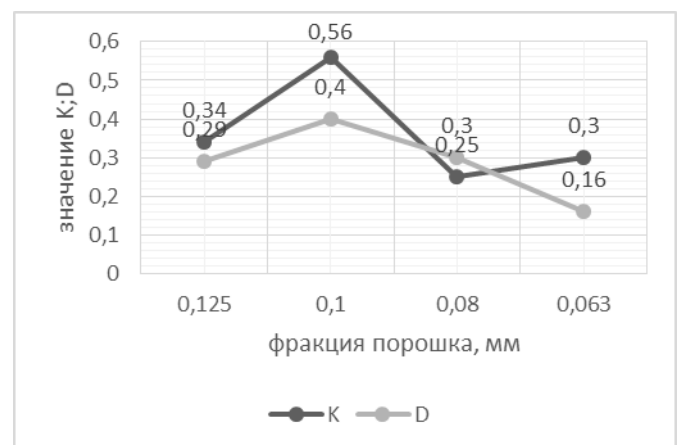


Рис. 4. Результаты анализа формы наплавленных валиков

Анализ графических зависимостей показал, что оптимальной фракцией металлургического порошка ПР-20X13Н2:ПР-НХ15СР2 для наплавки является порошковая компо-

зияция с фракцией, средний диаметр которой в пределах 0,1 мм.

Следует отметить, что в работе не проводили исследования влияния расхода порошка на форму валиков. Во всех экспериментах расход порошка составлял $F = 20$ г/мин. Такая величина была установлена экспериментально, как оптимальная.

Исследование влияния фракционного состава порошка на форму валиков показало, что размер частиц порошка на прямую влияет на шероховатость поверхности полученных изделий. Таким образом, для получения поверхности с минимальной шероховатостью оптимально использовать мелкозернистый порошок. Однако, с использованием фракции 0,08 – 0,06 мм, не наблюдается сплавления присадочного материала с основным металлом в следствие выгорания порошка до момента его попадания на подложку [4].

В работе проведен анализ структуры наплавляемого слоя, зоны сплавления и основного металла посредством растровой электронной микроскопии (рис. 5).

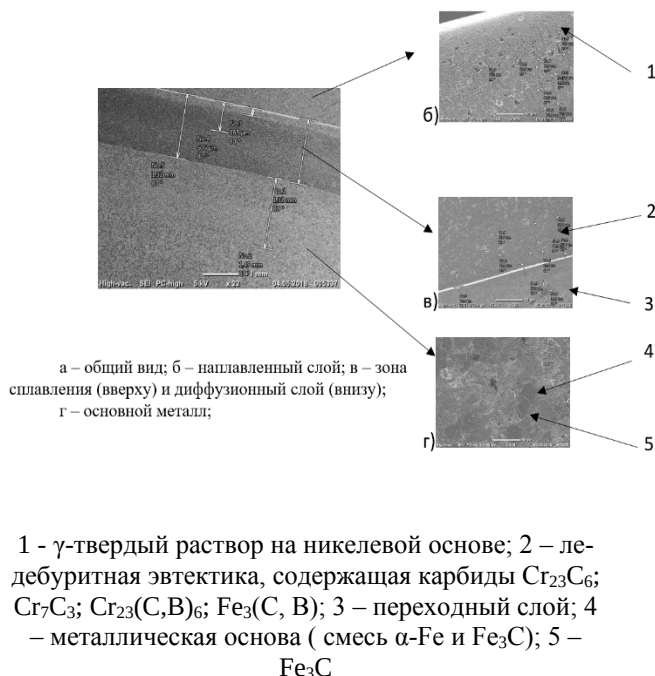


Рис. 5. Панорамное изображение структуры стали 12X18H10T после лазерной наплавки порошком ПР-20X13H2: ПР-NX15CP2 с фракцией 0,125 мм.

Формирование микроструктуры в процессе наплавки существенно зависит от тер-

мического воздействия на затвердевающий металл. Лазерная наплавка характеризуется чрезвычайно высокими скоростями охлаждения, превосходящими на порядок скорости, достигаемые при традиционных методах нанесения покрытий, при этом на поверхности достигается температура кипения, достаточная для расплавления самых тугоплавких компонентов. Скорости охлаждения составляют порядка $10^3 - 10^4$ °C/с, что приводит к измельчению первичной структуры.

Основной структурной составляющей наплавленного слоя является γ -твердый перенасыщенный раствор на основе никеля и упрочняющей фазы: бориды хрома и никеля переменного состава, карбиды хрома типа Cr_{23}C_6 и карбобориды хрома. Дополнительно присутствуют частицы более прочного карбида Cr_7C_3 . Бор и кремний образуют с никелем легкоплавкие эвтектики с температурой плавления от 980 °C до 1080 °C, а также восстанавливают оксидные пленки на поверхности подложки с образованием боросиликатных шлаков [3].

Данный фазовый состав наплавленного поверхностного слоя характеризуется отсутствием фазовых превращений при осаждении в диапазоне температур от 960 °C до 20 °C. Микроанализ структуры данной наплавки показал наличие переходной диффузионной зоны, имеющей более сложное кристаллическое строение, а, следовательно, повышенную твердость и адгезионное сродство с основным металлом [9].

Ближе к центру наплавки, на стыке наплавленных слоев остается небольшая зона дендритного строения толщиной от 50 до 60 мкм, тогда как в диффузионном слое, прилегающем к основному металлу, структура выравнивается и приобретает однородное мелкозернистое строение.

Распределение значений микротвердости по наплавленному слою и зоне термического влияния, показало прирост поверхностной твердости на 20-30% за счет достаточного времени при медленном охлаждении для формирования более сложных соединений карбидных фаз. Неразрушающий контроль методами ультразвуковой и цветной дефектоскопии, ВИК и измерение твер-

дости показали формирование бездефектного высоколегированного покрытия с твердостью 40...42 HRC.

Для успешной длительной эксплуатации изделий нефтегазодобывающей отрасли, восстановленных методом непрерывной наплавки в условиях сероводородных сред, необходимо определение склонности металла с наплавкой к коррозионному растрескиванию.

Склонность металла с наплавкой к межкристаллитной коррозии, определяли методом АМ. Для сравнения, испытания на МКК проводили на стандартных образцах, наплавленных составами, указанными в таблице 2, на коррозионностойкую сталь 12Х18Н9Т.

Таблица 2 – Состав и характеристики наплавленных порошковых композиций

№	Состав, концентрация	Наплавленный слой, мм	Поверхностная твердость, HRC	Склонность к МКК
1	ПР-20Х13Н2:ПР-НХ16СР4М ДЗ (3:1)	2	25-30	-
2	ПР-30Х13:ПР-НХ16СР4М ДЗ (3:1)		40-45	-
3	ПР-30Х13:ПР-Х4ГСР (3:1)		≈60	+

После испытаний на МКК проводились металлографические исследования образцов с применением сканирующей электронной микроскопии при увеличении в 300 раз. Для выявления МКК металлографическим методом из участка образца, прошедшего испытания, вырезали шлиф таким образом, чтобы плоскость реза была перпендикулярно к контролируемой поверхности образца. Длина шлифа по контролируемой поверхности составляла не менее 15-20 мм. Определяли максимальную глубину разрушения, выявленную в шести полях зрения. Признаком стойкости к МКК при металлографическом контроле считали разрушение границ зерен на максимальную глубину до 30 мкм.

Структуры образцов, после металлографических исследований представлены на рис. 6.

Состав №1 Состав №2 Состав №3



Рис. 6. Микроструктура поверхности опытных образцов до и после испытаний на МКК

Металлографические исследования стандартных образцов после испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии металлопродукции в виде наплавленных порошковых композиций на коррозионностойкую сталь 12Х18Н9Т показали, что порошковые смеси на никелевой основе обладают абсолютной устойчивостью против данного вида коррозии в условиях ускоренных электрохимических испытаний в кипящем водном растворе сернокислой меди и серной кислоты. Следов коррозии в виде зернограничного разрушения и наличия трещин не выявлено на всех трех опытных составах, однако, порошковая композиция ПР-30Х13:ПР-Х4ГСР (3:1) (Состав №3) на основе железа после испытаний в указанных условиях обладает более рыхлой и растравленной по границам зерен структурой на контролируемой поверхности, что позволяет судить о некоторой склонности к коррозии такой наплавки в следствие неблагоприятного влияния более крупных дендритных колоний, нежелательным повышенным содержанием углерода, связывающим хром в отдельные карбиды, понижающие концентрацию хрома как твердом растворе, так и в зернограничной области, что соответствует теории локального обеднения границ зёрен хромом вследствие образования на границах богатых хромом карбидов. В результате со-

держание хрома в приграничных участках зёрен становится менее 12,5 %, что недостаточно для обеспечения коррозионной стойкости.

Выводы

1 На основе оптимизации технологии лазерной обработки, возможна разработка технологических процессов восстановления и упрочнения тяжело нагруженных деталей, обеспечивающий требуемое сочетание механических и эксплуатационных свойств.

2 Металлографические и структурные исследования наплавленных порошковых композиций позволили прояснить природу фазовых превращений при лазерном воздействии и определить механизм карбидного упрочнения поверхности многокомпонентными соединениями сложного состава.

3 Определено влияние фракционного состава порошковых композиций на структурообразование поверхностного слоя при наплавке.

4 Произведена оценка склонности наплавленного металла к межкристаллитной коррозии, позволившая прогнозировать удовлетворительную работу восстановленных лазерной наплавкой ответственных деталей НКО в условиях агрессивных сред.

Работа выполнена в рамках проекта, финансируемого Фондом содействия «УМНИК-2018») на тему «Разработка технологии восстановления и упрочнения деталей энергетической и нефтегазодобывающей отрасли методом лазерного воздействия».

Список литературы

1. Носков А.И., Янбаев Р.М., Шахсрахманов Т.М. Влияние фракционного состава присадочного порошка и параметров лазерной коаксальной наплавки на формирование валиков // *Металловедение и термическая обработка металлов*. №7 (745) 2017г. С 70-73
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.
3. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н., Шибаев В.В. // *Порошковая металлургия*. 1984. №9. С.39.
4. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Третьяков Р.С. Анализ влияния параметров коаксальной ла-

зерной наплавки на формирование валиков // *Технология машиностроения* 2011. №11. С. 19-21

5. Kong C.Y., Carroll P.A., Brown P., Scudamore R.J., the effect of average powder particle size on deposition efficiency, deposit height and surface roughness in the direct metal laser deposition process // *Paper presented at 14th International Conference on Joining of Material*, 29 April 2007 – 2 May 2017, Helsingor, Denmark
6. Крылова С.Е., Влияние технологических параметров лазерной наплавки на структурные характеристики восстановленного поверхностного слоя / Я. С. Семка, С. Е. Крылова // *Уральская школа молодых металлургов: сборник материалов и докладов XVII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых*. – Екатеринбург, 2016. – С. 50-54.
7. С.Е. Крылова, С.П. Оплеснин, А.С. Ясаков, А.О. Стрижов. Технология лазерной наплавки порошковыми материалами в среде защитных газов деталей насосного и компрессорного оборудования // *Лазерные технологические комплексы и технологии для обработки промышленных материалов* / Бюллетень ЛАС №25. – 2017 г.
8. Тарасова Т.В., Гусаров А.В., Протасов К.Э. Влияние тепловых полей на структуру коррозионно-стойких сталей при различных схемах лазерной обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов* №7 (745). 2017 г. С 37-44
9. Крылова С.Е., Оплеснин С.П., Стрижов А.О. Влияние технологических параметров газопорошковой лазерной наплавки на структурные характеристики восстановленного поверхностного слоя коррозионно-стойких сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов* №10 (748). 2017 г. С 35-40
10. Завьялов В.А., Крылова С.Е., Оплеснин С.П., Курносин И.А. Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов материалы XXIV Уральской школы металлургов-термистов. ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». 2018. С. 55-57.

References

1. Noskov A.I., Yanbaev R.M., Shahsrahmanov T.M. Vliyanie frakcionnogo sostava prisadochnogo poroshka i parametrov lazernoj koaksal'noj naplavki na formirovanie valikov // *Metallorvedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. №7 (745) 2017g. S 70-73
2. Grigor'yanc A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Tekhnologicheskie processy lazernoj obrabotki / A.G. Grigor'yanc i dr. – M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2008. – 664 s.
3. Grigor'yanc A.G., Safonov A.N., Shibaev V.V. // *Poroshkovaya metallurgiya*. 1984. №9. S.39.

4. Grigor'yanc A.G., Misyurov A.I., Tret'yakov R.S. Analiz vliyaniya parametrov koaksial'noj la-zernoj naplavki na formirovanie valikov // Tekhnologiya mashinostroeniya 2011. №11. S. 19-21
5. Kong C.Y., Carroll P.A., Brown P., Scudamore R.J., the effect of average powder particle size on deposition efficiency, deposit height and surface roughness in the direct metal laser deposition process // Paper presented at 14th International Conference on Joining of Material, 29 April 2007 – 2 May 2017, Helsingor, Denmark
6. Krylova S.E., Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov lazernoj naplavki na strukturnye harakteristiki vosstanovlennogo poverhnostnogo sloya / Ya. S. Semka, S. E. Krylova // Ural'skaya shkola molodyh metallovedov: sbornik materi-alov i dokladov XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy Ural'skoj shkoly-seminara metal-lovedov – molodyh uchenyh. – Ekaterinburg, 2016. – S. 50-54.
7. S.E. Krylova, S.P. Oplesnin, A.S. Yasakov, A.O. Strizhov. Tekhnologiya lazernoj naplavki poroshkovymi materialami v srede zashchitnyh gazov detalей nasosnogo i kompressornogo oboru-dovaniya // Lazernye tekhnologicheskie komplekсы i tekhnologii dlya obrabotki promyshlennyyh materialov / Byulleten' LAS №25. – 2017 g.
8. Tarasova T.V., Gusarov A.V., Protasov K.E. Vliyanie teplovyh polej na strukturu korrozionno-stojkih stalej pri razlichnyh skhemah lazernoj obrabotki // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov №7 (745). 2017 g. S 37-44
9. Krylova S.E., Oplesnin S.P., Strizhov A.O. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov gazopo-roshkovoj lazernoj naplavki na strukturnye harakteristiki voss-tanovlennogo poverhnost-nogo sloya korrozionno-stojkih stalej // Me-tallovedenie i termicheskaya obrabotka metal-lov» №10 (748). 2017 g. S 35-40
10. Zav'yalov V.A., Krylova S.E., Oplesnin S.P., Kurnoskin I.A. Aktual'nye problemy fiziche-skogo metallovedeniya stalej i spla-vov materialy XXIV Ural'skoj shkoly metal-lovedov-termistov. FGBOU VO «Magnitogor-skij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. G.I. Nosova». 2018. S. 55-57.

УДК 621.914.02

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРАЦИЙ

Е.А. Левченко¹, Н.И. Покинтелица¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты теоретических исследований по изучению контроля динамики движения детали при обработке деталей с вибрациями, основанный на применении группы магнитомодуляционных датчиков, позволяющий измерить характер изменения и перемещение детали, а также измерить амплитуду, частоту и ускорение движения во время обработки.

Ключевые слова: динамика процесса резания, датчик, амплитуда, ускорение, перемещение.

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF THE PROCESS OF TREATING DETAILS USING VIBRATIONS

Е.А. Levchenko¹, N.I. Pokintelitsa¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Presents the results of theoretical studies on the study of the dynamics of the movement of parts when processing parts with vibrations, based on the use of a group of magnetic modulation sensors, which allows to measure the nature of changes and movement of parts, as well as measure the amplitude, frequency and acceleration of movement during processing.

Keywords: dynamics of the cutting process, sensor, amplitude, acceleration, movement.

Введение

О качестве и производительности процесса вибрационной обработки можно судить по съему материала, шероховатости поверхности и достигаемых в результате упрочнения микротвердости, снятии и стабилизации остаточных напряжений. Здесь необходимо внести одно важное уточнение в терминологию. Строго говоря, названные величины характеризуют не производительность, а интенсивность процессов. Производительность является комплексной характеристикой, зависящей от количества загружаемых деталей, необходимой степени снижения шероховатости, длительности загрузки и сепарации деталей [1-6].

В ряде случаев требуется полная выгрузка среды и ее замена на -другую, с меньшей зернистостью, дополнительная промывка среды, закрепление и открепление деталей, уста-

новка в отверстия деталей специальных защитных заглушек и их удаление после обработки и т.д. Под производительностью виброабразивной обработки следует понимать количество удаляемого материала в единицу времени, а при виброупрочняющей – время достижения требуемых физико-механических свойств обработанной поверхности детали.

Обсуждение и результаты

Основой функционирования машин с вибрациями является процесс механических колебаний. Процесс колебаний должен соответствовать требуемым параметрам, т.е. амплитуде, частоте колебаний. Особенностью виброобработки является то, что измерение параметров колебаний рабочей среды внутри станка весьма затруднительно и мониторинг процесса виброобработки в лучшем

случае сводится к измерению параметров колебаний корпуса.

Движение обрабатываемой детали имеет сложный характер, его можно представить зависимостью:

$$f(x, y, z, t) = A_m \sin(\omega t + \psi) + \sum_{n=2}^{\infty} A_m \sin(n\omega t + \psi_n) + R(x, y, z, t), \quad (1)$$

где $A_m \sin(\omega t + \psi)$ – колебания основной частоты вибровозбудителя;

$$\sum_{n=2}^{\infty} A_m \sin(n\omega t + \psi_n) – \text{колебаний, вы-}$$

званные нижней частью системы;

$R(x, y, z, t)$ – поступательное движение детали.

Мониторинг движения вибростанка, рабочей среды и детали преследует две цели: первая – определение параметров режима виброобработки; вторая – контроль технического состояния механизмов. Системы диагностики для контроля механических колебаний можно по степени сложности, аппаратному оснащению и программному обеспечению разделить на четыре группы.

Простая система мониторинга механических колебаний реализуется в виде комбинации несложного малогабаритного виброметра и стробоскопа. Виброметр измеряет общие параметры вибраций: вибросмещения, виброскорости и виброускорения в стандартных частотных диапазонах, а также измеряет параметры вибрации в других частотных диапазонах. Может иметь полосовые нижних и верхних частот.

Стробоскоп используется для определения частоты вращения вала машины и относительного перемещения ее деталей, а также для выявления нестационарности частоты вращения деталей.

Для каждой машины может быть проведено сравнение общих уровней вибраций с установленными стандартами нормами.

Оперативная система мониторинга механических колебаний может быть реализована с помощью переносных портативных анализаторов. Она позволяет проведение анализа спектров вибраций и ее временных реализаций на месте эксплуатации объекта

контроля, проводить сразу оценку технического состояния подшипников и определять их дефекты.

Анализатор имеет возможность просматривать и анализировать спектры вибраций между собой и выявлять их отличия. Для решения задач диагностики необходим контроль фазы колебаний, поэтому анализатор должен иметь датчик оборотов вала. Двухканальный анализатор позволяет использовать для диагностики коррекционный анализ, взаимные спектры и функции по конкретности. Система требует для обслуживания квалифицированного персонала.

Полустационарная система мониторинга и диагностики реализуется на базе компьютера. Осуществляет сбор огромного количества данных, из которых на основе анализа делается вывод о техническом состоянии машины. Используются анализаторы – сборщики данных. Используется для этих целей нормативный анализатор. Рекомендуется проводить анализ изменения спектров вибраций машины через 200-1200 часов работы.

Системы непрерывного мониторинга применяют для наиболее ответственных машин, отказ которых приводит к дорогостоящим ремонтам. В настоящее время на рынке предлагается различное отечественное и зарубежное программное обеспечение.

Программное обеспечение позволяет создавать базы данных результатов виброконтроля машины.

Для обнаружения неисправностей по спектрам вибраций в системе используется набор пороговых уровней в виде «масок» для каждого объекта. Набор «масок» охватывает весь частотный диапазон вибраций машины.

Высшим уровнем мониторинга и диагностики являются экспертные системы. Программное обеспечение таких систем имеет различные уровни, которые зависят от вида мониторинга. Качество мониторинга зависит от характерных технических средств сбора информации, т.е. от датчиков механических величин.

Особенностью мониторинга виброустановок является то, что их рабочий режим

является вибрация и обнаружение нарушений режима, необходимо обнаружить на фоне достаточно интенсивных колебаний. К особенностям контроля следует отнести следующее:

необходимо контролировать динамику движения всего вибростанка, а также рабочей среды;

необходим контроль движения обрабатываемых деталей.

Для этой цели необходима разработка технических средств получения первичной информации (датчиков) специального вида, которые в настоящее время отсутствуют. Вопрос обработки информации менее актуален, так как он является стандартным, теоретически хорошо разработанным и реализован в виде программ.

Поскольку вибростанок имеет два или несколько синхронно работающих вибровозбудителя, при нарушении синхронизации движения контейнера будут неодинаковы по длине контейнера и нарушится процесс виброобработки. Поэтому необходим контроль динамики движения отдельных частей вибростанка по его длине. Кроме того, система контроля должна давать информацию о амплитуде и частоте колебаний контейнера, а также следить за состоянием подшипниковых узлов.

Основой системы контроля является измерительное устройство, которое состоит из группы датчиков и устройство обработки сигналов, поступающих от датчиков. Датчики различаются по виду измеряемой величины, по частотной характеристике, по чувствительности, по удобство монтажа. Удобство установки играет для оценки качества датчиков немаловажную роль. Чем проще установка датчика, тем шире возможности к его применению.

Оптимальным условием измерительного канала является измерение большого числа параметров динамики движения вибростанка минимальным количеством измерительных устройств. Так, например, измерение таких параметров как частота колебаний контейнера, амплитуда колебаний, перемещение, виброускорения возможно при помощи датчиков перемещения вибростанка, установ-

ленных на его стенках. При этом непосредственно измеряется только перемещение, а амплитуда, частота и ускорение получаются после обработки полученной первичной информации.

Пять параметров движения контейнера могут быть измерены с помощью одного вида датчиков, которые функционируют на принципе измерения постоянного магнитного поля преобразователями. В качестве источника постоянного магнитного поля используются постоянстве магниты.

Такой принцип построения датчиков обеспечивает высокую временную и температурную стабильность, надежность, высокую чувствительность, простоту монтажа, устойчивость и сравнительно низкую стоимость.

Основой датчика служит постоянный магнит последнего поколения [5] WdFeB, над которым перемещается датчик магнитного поля.

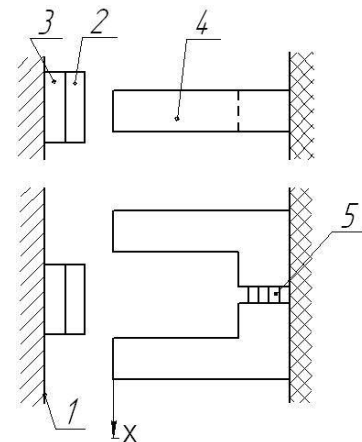


Рис. 1. Конструкция датчика перемещения корпуса контейнера виброустановки: 1 – корпус контейнера; 2 – постоянный магнит; 3 – немагнитная прокладка; 4 – магнитопровод; 5 – модулятор

Конструкция датчика перемещения корпуса контейнера показана на (рис. 1). Источником постоянного магнитного поля является магнит 2 закрепленный на немагнитной прокладке 3. Датчик имеет П-образный магнитопровод 4, который имеет воздушный промежуток, в котором размещен модулятор. При перемещении датчика относительно постоянного магнита в сердечнике изменяется магнитный поток, который измеряется с помощью модулятора. Характер изменения иллюстрируется графиком, приведен-

ным на (рис. 2). Между точками а и в существует линейный участок.

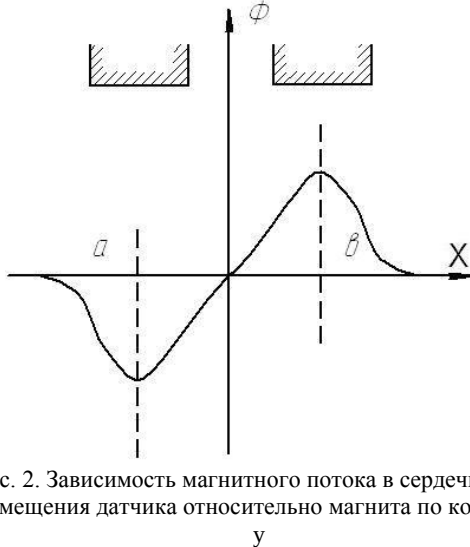


Рис. 2. Зависимость магнитного потока в сердечнике от перемещения датчика относительно магнита по координате y

Магнитный потенциал на одной плоскости постоянного магнита, создаваемый магнитопроводом с расположенной на нем обмоткой с током, создающей MDC – $i\omega$, равен:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{1}{m} \int_S \frac{M'_n dS}{R_1} - \frac{1}{m} \int_S \frac{M'_n dS}{R_2}, \quad (2)$$

где

$$R_1 = \sqrt{(n-t-n')^2 + h^2 + (\omega - \omega')^2},$$

$$R_2 = \sqrt{(n+t-n')^2 + h^2 + (\omega - \omega')^2}.$$

Значение величин, входящих в (2) определяются:

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \frac{M'_n \cdot b}{2\pi} \times \left[\ln \frac{n-t-a + \sqrt{(n-t-a)^2 + h^2 + (w-0,3b)^2}}{n-t+a + \sqrt{(n-t+a)^2 + h^2 + (w-0,3b)^2}} - \ln \frac{n+t-a + \sqrt{(n+t-a)^2 + h^2 + (w-0,3b)^2}}{n+t+a + \sqrt{(n+t+a)^2 + h^2 + (w-0,3b)^2}} \right], \quad (3)$$

Выводы

Для создания адекватной модели рассмотрена схема процесса абразивной разрезки трубных заготовок, в которой учтено, что абразивные зерна не имеют регулярной геометрии, расположены на рабочей поверхности

инструмента на различных уровнях, при работе изнашиваются и разрушаются.

Список литературы

1. Анпилогов В.А. Исследование влияния динамики массы загрузки и других факторов на интенсивность отделочных процессов объемной вибрационной обработки: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / В.А. Анпилогов. – Пермь, 2008. – 131 с.
2. Афанасьев Ю.В. Феррозонды. - М.: Энергия, 1998. - 165 с.
3. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей / А.П. Бабичев. – М.: Машиностроение, 1996. – 134 с.
4. Бабичев А.П. Вибрационные станки для обработки деталей / А.П. Бабичев, В.Б. Трунин, Ю.М. Самодумский, В.П. Устинов. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.
5. Блехман И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
6. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
7. E. Levchenko Theoretical Foundations of Vibration Processing Modeling / E. Levchenko, Yu. Deykun, Yu. Moroz Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2018) 2018. – S. 1519-1526. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_162.
8. E. Levchenko The study of dynamic characteristics during the vibration processing of parts, MATEC Web of Conferences 224, 01131 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401131>.
9. Левченко Е.А. Использование механохимического метода обработки сталей на вибрационных станках / Е.А. Левченко, Ю.В. Дейкун // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2018. – Вып. № 4. – С. 44–48.
10. Дьяченко В.И. Исследование процесса вибрационной обработки / В.И. Дьяченко // Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин: сб. науч. тр. ЦНИИТМ. – Ростов-на-Дону, 1968. – С. 42-48.

References

1. Anpilogov V.A. Issledovanie vliyaniya dinamiki massy zagruzki i drugih faktorov na intensivnost' otdelochnykh processov ob'emnoy vibracionnoy obrabotki: dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.02.08 / V.A. Anpilogov. – Perm', 2008. – 131 s.
2. Afanas'ev Yu.V. Ferrozondy. - M.: Energiya, 1998. - 165 s.
3. Babichev A.P. Vibracionnaya obrabotka detalej / A.P. Babichev. – M.: Mashinostroyeniye, 1996. – 134 s.

-
4. Babichev A.P. Vibracionnye stanki dlya obra-botki detalej / A.P. Babichev, V.B. Trunin, Yu.M. Samodumskij, V.P. Ustinov. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 168 s.
 5. Blekhman I.I. Vibracionnoe peremeshchenie / I.I. Blekhman, G.Yu. Dzhanelidze. – M.: Nauka, 1964. – 488 s.
 6. Vinogradov V.N. Abrzivnoe iznashivanie / Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'nikov M.G. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 224 s.
 7. E. Levchenko Theoretical Foundations of Vibration Processing Modeling / E. Levchenko, Yu. Deykun, Yu. Moroz Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2018) 2018. – S. 1519-1526. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_162.
 8. E. Levchenko The study of dynamic characteristics during the vibration processing of parts, MATEC Web of Conferences 224, 01131 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401131>.
 9. Levchenko E.A. Ispol'zovanie mekhanohimicheskogo metoda obrabotki stalej na vibracionnyh stankah / E.A. Levchenko, Yu.V. Dejgun // Vestnik sovremennyh tekhnologij: sb. nauch. tr. Sevasto-pol'skij gosudarstvennyj universitet. – Seva-stopol': Izd-vo FGAOU VO SevGU, 2018. – Vyp. № 4. – С. 44 – 48.
 10. D'yachenko V.I. Issledovanie processa vibraci-onnoj obrabotki / V.I. D'yachenko // Progressiv-nye metody otdelochnoj obrabotki detalej ma-shin: sb. nauch. tr. CNIITM. – Rostov-na-Donu, 1968. – S. 42-48.
-

УДК 621.85.052

ПРОГРЕССИВНЫЙ СПОСОБ КРЕПЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ВАЛУМ.О. Арбузов¹, А.Я. Некрасов¹, А.Н. Соболев¹¹ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация**Аннотация**

В машиностроении широко используются различные способы крепления ступицы на валу для передачи крутящего момента. Однако применяемые способы не лишены ряда недостатков, присущих в разной степени для каждого из них. Авторами предложено конструктивное решение для надёжного крепления ступицы на валу, обеспечивающего оперативное регулирование осевого и углового положения детали, а также разработано программное приложение, которое позволяет проводить расчёт усилия затяжки в зависимости от параметров соединения.

Ключевые слова: соединение вал-ступица, втулка, коническая поверхность, регулирование положения детали.

A PROGRESSIVE METHOD OF MOUNTING MACHINE PARTS ON THE SHAFTM.O. Arbuzov¹, A.Ya. Nekrasov¹, A.N. Sobolev¹¹Moscow State University then of Technology "STANKIN", Russian Federation**Abstract**

In mechanical engineering, various methods of fastening the hub on the shaft for the transmission of torque are widely used. However, the methods used are not devoid of a number of disadvantages that are inherent in varying degrees for each of them. The authors proposed a constructive solution for reliable mounting of the hub on the shaft, providing prompt control of the axial and angular position of the part, and also developed a software application that allows the calculation of the tightening force depending on the connection parameters.

Keywords: shaft-hub connection, sleeve, conical surface, regulation of the position of the part.

Основной задачей соединений «вал – ступица» (далее СВС) является, как правило, передача крутящего момента, которая может осуществляться двумя способами – жёстким и фрикционным. При первом способе указанная задача решается за счёт использования жёстких элементов, работающих на срез, смятие или изгиб. Этот способ реализован в виде шпоночных, шлицевых, призматических, профильных, штифтовых, фланцевых соединений. При втором (фрикционном) способе, крутящий момент с вала на ступицу (или наоборот) передаётся за счёт сил трения, создаваемых на цилиндрических, конических или торцевых поверхностях вала. Сюда относятся соединения с натягом, конусные, с пружинными затяжными кольцами, клеммовые. Иногда применяется сочетание обоих способов, при котором для жёстких соединений нагрузочная способность

повышается за счёт сил трения, создаваемых путём осевой или радиально-осевой затяжки, а для фрикционных соединений в целях предотвращения относительного проворачивания или фиксации определённого углового положения детали на валу вводят жёсткие элементы (шпонки, штифты и др.) [1-10].

Каждый вид СВС имеет свои особенности и, в сравнении с другим видом, обладает набором определённых достоинств и недостатков. Сравнительная оценка соединений различного вида при выборе одного из них для использования в проектируемом узле или механизме может быть проведена по многим показателям, а именно:

- нагрузочная способность, ограничивающая величину передаваемого крутящего момента;
- надёжность в работе;
- габариты;

- технологичность изготовления;
- стоимость;
- возможность ограничения величины передаваемого максимального крутящего момента и использования соединения, наряду с основным назначением, в качестве предохранительного устройства;
- степень соосности закрепляемой детали с валом;
- фиксация монтируемой детали на валу в осевом направлении;
- возможность, простота и мобильность регулирования осевого и углового положения детали на валу;
- условия работы;
- серийность производства.

Рассматривая конкретный вид СВС по каждому из приведённых показателей, можно определить его место среди прочих по степени удовлетворения определённому требованию или вообще исключить из списка подходящих для проектируемого механизма.

Среди механических передач, имеющих широкое распространение в машиностроении и, в частности, в станкостроении, многие требуют при монтаже достаточно строгого соблюдения осевого, а иногда и углового, положения деталей, составляющих кинематическую пару. В качестве примера могут быть названы ведущая шестерня и ведомое колесо в конической зубчатой передаче, червяк и червячное колесо в червячной передаче, звёздочки цепных и шкивы ременных передач, а также элементы некоторых других механизмов [11-14].

Рассмотрим далее различные виды соединений по критерию возможности регулирования осевого положения детали на валу с оценкой простоты и оперативности данной операции, а также с учётом удовлетворения ими других требований, исходя из списка приведённых выше критериев сравнительной оценки соединений.

С этих позиций применяемые в машиностроении виды СВС можно разделить на следующие группы.

1. Крепление детали на цилиндрическом или коническом участке вала с использованием шпоночного, шлицевого или профиль-

ного соединения для передачи крутящего момента и упором ступицы в бурт на валу. Ступицу при этом поджимают к бурту втулкой, гайкой или шайбой с другого торца [1-10].

Соединения этого вида характеризуют высокая нагрузочная способность и надёжность. Однако регулировка осевого положения детали относительно вала невозможна.

2. Крепление детали на цилиндрическом участке вала с использованием шпоночного, шлицевого или профильного соединения и размещением регулировочного кольца между торцом ступицы и буртом вала, к которому через это кольцо поджимается деталь для предотвращения осевого смещения. При этом осевое положение монтируемой детали определяет толщина регулировочного кольца [15].

Этот вид СВС сохраняет достоинства соединений предыдущей группы и, вместе с тем, позволяет производить регулировку осевого положения детали независимо от вала. Однако эта операция, будучи связана с необходимостью демонтажа самой детали, закреплённой на валу, достаточно длительная и трудоёмкая. Для сокращения времени регулирования кольцо заменяют двумя полукольцами, что исключает необходимость демонтажа детали и требует лишь небольшого осевого смещения её для извлечения полуколец из расточки в ступице.

3. Соединения, в которых регулирование осевого положения детали осуществляют с помощью набора тонких металлических прокладок, установленных между фланцами крышек подшипников и корпусом.

Сюда же, по принципу регулирования осевого положения детали, можно отнести способ крепления шкивов и звездочек на стакане, выполненном совместно с крышкой подшипника [15], с целью разгрузки консоли вала от сил, действующих в ременной или цепной передаче (рис.1).

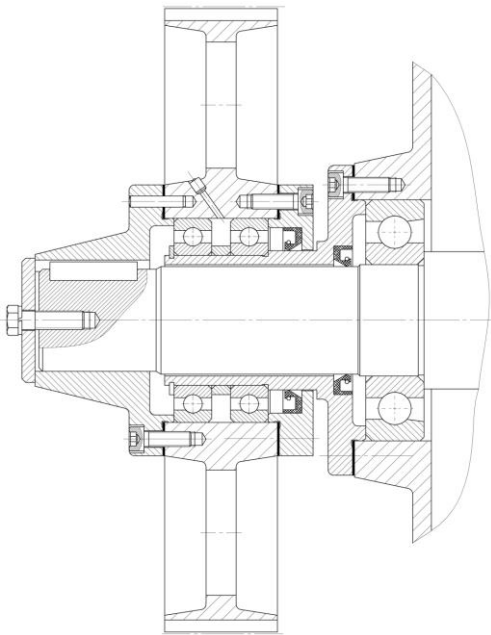


Рис. 1. Крепление шкива на стакане с разгрузкой вала от сил, действующих в ременной передаче

Данный метод регулировки позволяет обеспечить высокую точность положения детали в осевом направлении, а длительность операции может быть уменьшена заменой тонких металлических прокладок комплектом прокладок различной определённой толщины.

СВС в следующих группах (4-7) объединяет использование в их конструкциях двух контактирующих (внутренней и наружной) конических поверхностей, перемещающихся навстречу друг другу.

4. Соединения, в которых используются клиновые шпонки, дающие возможность просто и оперативно менять осевое положение детали независимо от вала, но не обеспечивающие её точного центрирования.

5. Конструктивные решения СВС с использованием пары или набора парных упругих конических колец, сдвигаемых между собой и располагаемых в торцевой расточке или в кольцевом зазоре между ступицей и валом [15].

6. Соединения, в которых для закрепления ступицы на валу используют разрезную упругую втулку с наружной конической и цилиндрической внутренней поверхностью. Данную втулку затягивают в кольцевой зазор между ступицей и валом [15].

7. Соединения, применимые для деталей значительных радиальных размеров, осуществляемые с помощью двух (наружного и внутреннего) биконических разрезных колец, вставленных в торцовые расточки с двух сторон ступицы и разжимаемых путём стягивания между собой двух боковых промежуточных колец, расположенных в кольцевом зазоре между биконическими разрезными кольцами по обеим их сторонам [15].

Все виды СВС, отнесённые к четырём последним группам, позволяют оперативно, путём ослабления взаимного стягивания конических поверхностей, добиваться возможности регулирования положения детали в осевом направлении без её демонтажа. Однако эти способы крепления ступицы на валу не лишены ряда следующих недостатков, присущих в разной степени для каждого из них:

- ограниченная конструктивными размерами детали нагрузочная способность, т.е. величина передаваемого с вала на деталь (или наоборот) крутящего момента;
- высокая стоимость изготовления;
- центрирование ступицы относительно вала по нескольким поверхностям;
- многочисленность деталей в конструкции;
- значительные радиальные или осевые габариты.

Анализ особенностей рассмотренных выше соединений позволил авторам сделать вывод о необходимости разработки надёжной и простой конструкции для закрепления детали на валу, обеспечивающей оперативное регулирование осевого и углового положения детали независимо от вала. Результатом проведённых исследований является предложенный авторами прогрессивный способ крепления детали на валу, на который получены патенты на полезную модель «Соединение вала со ступицей» и «Соединение вал-ступица» [16, 17] (рис. 2). Данный способ заключается в использовании двух одинаковых втулок, цельных или состоящих из двух половин (рис. 3), с конической наружной и цилиндрической внутренней поверхностью, имеющих чередующиеся по направлению торцовые пазы для обеспече-

ния упругости втулок. Втулки стягивают между собой в пространстве между валом и двумя коническими отверстиями в ступице с помощью винтов чётного количества [15]. Для этой цели во втулках, поочерёдно чередуясь, выполнены отверстия двух типов: резьбовые и гладкие – под стержни винтов [15]. Две втулки, путём поворота на некоторый угол вокруг своей оси, размещают при монтаже соединения относительно друг друга таким образом, чтобы резьбовые отверстия в одной из них становились соосными отверстиям под стержни винтов другой. При затруднённом доступе к винтам с двух сторон конструкции втулок могут различаться. В одной втулке могут выполняться только резьбовые отверстия, а в другой – только отверстия под стержни винтов.

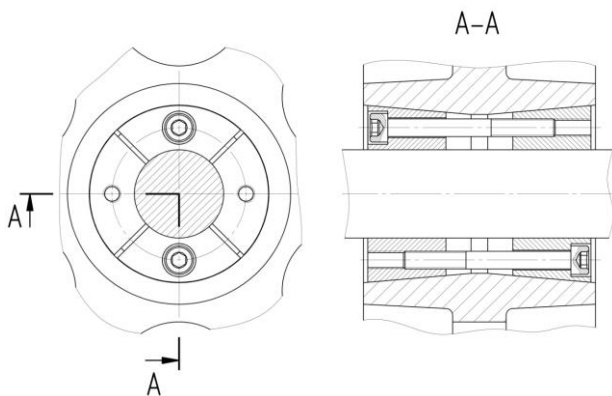


Рис. 2. Конструктивная схема крепления детали на валу с помощью двух втулок с наружной конической поверхностью

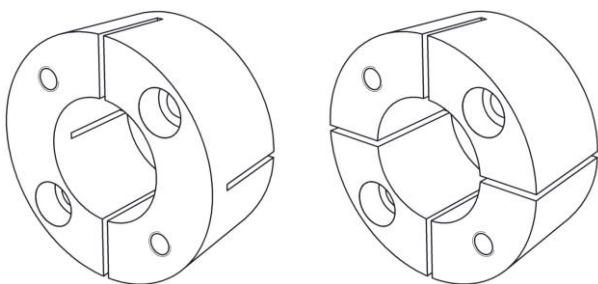


Рис. 3. Конструкции втулок двух типов: цельной и состоящей из двух половин

С целью обеспечения высокой степени соосности двух конических отверстий в ступице между ними предусмотрено растачиваемое одновременно с одним из конических отверстий узкое цилиндрическое отверстие (рис. 2), которое предназначено для выполнения функции базы при обработке второго

конического отверстия с другой стороны ступицы [15].

Фиксация детали на валу после установки её в требуемом осевом и угловом положении осуществляют стягиванием между собой двух втулок путём затягивания всех винтов с силой затяжки, ограниченной прочностью винтов на разрыв. Затяжка необходима для создания на внешних конических и внутренних цилиндрических поверхностях втулок достаточного давления p , обеспечивающего передачу соединением с вала на ступицу (или наоборот) крутящего момента T (Н·м) заданной величины с введением соответствующего назначению механизма коэффициента запаса.

Связь указанных параметров устанавливает следующая зависимость:

$$T = 10^{-3} \pi d_{cp}^2 l_{акт} p f, \quad (1)$$

где $d_{cp} = \frac{d_2 + d_1}{2}$ (мм) – средний диаметр втулок с большим d_2 и меньшим d_1 диаметром; $l_{акт}$ (мм) – активная длина каждой втулки (в расчётах может быть принята равной длине втулки l); p (МПа) – давление на наружных конических поверхностях втулок. Допускаемое значение для стальных деталей $[p] = 200 \dots 250$ МПа; f – коэффициент трения (среднее расчётное значение при стальных деталях $f = 0,1 \dots 0,12$).

Отсюда может быть найдено необходимое для передачи крутящего момента T (Н·м) давление p (МПа) на наружных поверхностях втулок, определяющее несущую способность соединения:

$$p = 10^3 \cdot T / \pi d_{cp} l f. \quad (2)$$

Давление p создаётся за счёт сближения 2-х втулок внутрь ступицы закрепляемой на валу детали силой F_{oc} (Н), действующей на каждую втулку с внешней стороны:

$$F_{oc} = p \pi d_{cp} l \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

где α - половина центрального угла конуса, причём $\alpha = \arctg(0.5K)$, а $K = \frac{d_2 - d_1}{l}$ - конусность наружных поверхностей втулок.

Подставив в выражение (3) значение p из уравнения (1), получим следующую зависимость необходимой осевой силы F_{oc} (Н) от передаваемого крутящего момента T :

$$F_{oc} = \frac{10^3 \cdot T \cdot \tg \alpha}{d_{cp} \cdot f} = \frac{10^3 \cdot T \cdot K}{2 \cdot d_{cp} \cdot f}. \quad (4)$$

Эта сила реализуется при монтаже СВС затягиванием по половине общего числа винтов z в каждой из втулок с обеих сторон ступицы. Обычно для втулок небольших размеров z равно 4 или 6. Предпочтительно производить затягивание всех винтов с одинаковой силой $F_{зам} = \frac{2F_{oc}}{z}$ с помощью дина-

мометрического ключа. Необходимо учитывать, что при затягивании винтов прикладывается несколько большая, чем $F_{зам}$, сила, поскольку, кроме создания необходимого давления на радиальных поверхностях втулок, дополнительно преодолевается трение на внутренних и наружных поверхностях втулок и в самой резьбе. Это обстоятельство вынуждает в расчётах на прочность винтов данной конструкции вводить некоторый коэффициент запаса при выборе допускаемого напряжения растяжения: $[\sigma]_p = \frac{\sigma_T}{k_{зан}}$. Рекомен-

дуемый $k_{зан} = 1,8$.

По рассчитанной в соответствии с формулой (4) силе $F_{зам}$ в проектном расчёте подбирают подходящий диаметр резьбы винтов при их заданном материале, а в проверочном расчёте находят фактическое напряжение растяжения в сечении стержня винта по внутреннему диаметру резьбы.

Авторами с использованием современных информационных технологий разработано программное приложение, на которое получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчёт параметров соединения вал-ступица «Shaft-HubJoining». Приложение предназначено для автоматизации расчёта усилия затяжки в за-

висимости от следующих варьируемых параметров соединения: передаваемого крутящего момента, диаметров и длин втулок, коэффициента трения (при выборе соответствующих конструкционных материалов) (рис. 4).

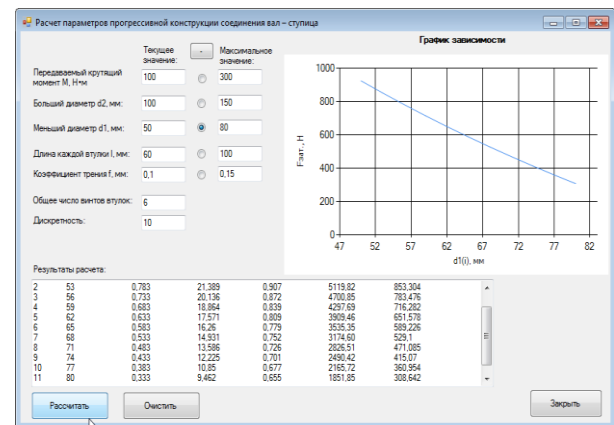


Рис. 4. Электронная форма разработанного программного приложения при выполнении операции Расчет усилия затяжки

При опасности пробуксовки втулок относительно вала по гладкой внутренней цилиндрической поверхности (в случаях, когда крутящий момент с вала на втулки (или наоборот) передаётся за счёт сил трения при упругом сжатии втулок), фрикционное соединение втулки с валом может быть заменено шпоночным, шлицевым или профильным соединением. Такая замена не повлияет на возможность оперативного регулирования осевого и углового положения детали на валу.

Разработанная авторами конструктивная схема крепления деталей на валу обладает целым набором преимуществ по сравнению с другими известными способами, а именно:

- простота конструкции;
- низкая стоимость изготовления;
- высокая нагрузочная способность, ограниченная по существу лишь прочностью резьбы винтов, причём предложенная конструкция позволяет использовать винты значительного диаметра;
- простота и оперативность регулирования осевого и углового положения детали на валу;
- компактность конструкции СВС, не требующей (как правило) увеличения ради-

альных и осевых габаритов закрепляемой на валу детали;

- возможность (при необходимости) использовать данный способ крепления детали на валу в качестве предохранительного устройства, т.к. конструкция позволяет регулировать допускаемую величину передаваемого СВС крутящего момента за счёт изменения силы затяжки винтов с помощью динамометрического ключа и, следовательно, устанавливать максимально допустимый для данного механизма крутящий момент.

Таким образом, предложенный прогрессивный способ крепления деталей на валу, благодаря своим преимуществам, может быть рекомендован к применению в машиностроительных отраслях промышленности и, в частности, в станкостроении.

Список литературы

1. Орлов П.И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 2 / Под ред. П.Н. Учаева. – 3-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.
2. Дунаев П. Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин: учеб. пособие. – 11-е изд. – М.: «Академия», 2008. – 496 с.
3. Курмаз Л.В. Детали машин. Проектирование. Справочное уч.-метод. пособие / Л.В.Курмаз, А.Т.Скойбеда. – М.: Высшая школа, 2004. – 300 с.
4. Гузенков П.Г. Детали машин: Учеб. для вузов / П.Г.Гузенков. – 4-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 1986. – 359 с.
5. Гречишников В. А., Яшков В. А. Создание формальной математической модели качества деталей машин // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов. Сборник научных статей II Международной молодежной научно-технической конференции. 2016. Том 1. С. 119-123.
6. Гречишников В.А., Касьянов С.В., Юрасова О.И., Романов В.Б. Повышение конкурентоспособности предприятия на стадии подготовки производства автокомпонентов // Вестник МГТУ «Станкин». 2016. № 2(37). С. 128-132.
7. Кудрявцев В.Н. Детали машин: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 464 с.
8. Решетов Д.Н. Надёжность машин: учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев; под ред. Д. Н. Решетова. – М.: Высшая школа, 1988. – 238с.

9. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учеб. для вузов. / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
10. Биргер И.А. Расчёт на прочность деталей машин. Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорп, Г.Б. Иосилевич. – 4-е изд. - М.: Машиностроение, 1993. –702 с.
11. A.Ya. Nekrasov, M.O. Arbuzov, and A.N. Sobolev. Automatic Control of the Static Loads in Multicontact Mechanical Systems // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35. No. 6. pp. 442-446.
12. A.N. Sobolev, A.Ya. Nekrasov. CAD/CAE Modeling of Maltese Cross Mechanisms in Machine Tools // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 4. pp. 300-302.
13. Chekanin V.A., Chekanin A.V. Multilevel linked data structure for the multidimensional orthogonal packing problem // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 598. P. 387–391.
14. Brovkina Y.I., Sobolev A.N., Nekrasov A.Y. Research of Characteristics and Parameters of Cycloidal Gear // International Conference of Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2018. – pp. 1169-1179. First Online: 07 December 2018; Publisher Name: Springer, Cham.
15. Арбузов М.О., Некрасов А.Я., Соболев А.Н., Серебряков К.Е. Прогрессивные способы крепления шкивов и звёздочек на валах // Вестник МГТУ «Станкин». 2018. № 2(45). С. 15-20.
16. Арбузов М.О., Некрасов А.Я., Соболев А.Н. Соединение вала со ступицей. Заявка № 2017118183. Приоритет полезной модели 25.05.2017. Патент на полезную модель № 177902. Дата гос. регистрации 15.03.2018. Срок действия до 25.05.2027 г.
17. Арбузов М.О., Некрасов А.Я., Соболев А.Н. Соединение вал-ступица. Заявка № 2017118184. Приоритет полезной модели 25.05.2017. Патент на полезную модель № 183767. Дата гос. регистрации 02.10.2018. Срок действия до 25.05.2027 г.

References

1. Orlov P.I. Basics of construction: a methodical manual. - 3rd ed. - M.: Mashinostroenie, 1988. 560 p.
2. Dunaev P.F., Lelikov O.P. Design of units and parts of machines: studies. allowance. - 11th ed. - M.: "Academy", 2008. 496 p.
3. Kurmaz L.V. Machine parts. Design. Vysshaya shkola, 2004, 300 p.
4. Guzenkov P.G. Machine parts: Training for universities. 4th ed., M.: Vysshaya shkola, 1986, 359 p.
5. Grechishnikov V. A., Yashkov V. A. Creating a formal mathematical model of the quality of machine parts // Metalworking complexes and robotic Systems - promising areas of scientific research activities of young scientists and specialists. Collection of scientific articles of the II International

-
- Youth Scientific and Technical Conference. 2016. Vol. 1. pp. 119-123.
6. Grechishnikov V.A., Kasyanov S.V., Yurasova O.I., Romanov V.B. The competitiveness of enterprises by improving the profitability of the project training production and release autocomponents. *Vestnik MGTU "Stankin"*, 2016, No. 2 (37), pp. 128-132.
 7. Kudryavtsev V.N. Machine parts: a textbook for students of engineering specialties universities. *Mashinostroenie*, 1980, 464 p.
 8. Reshetov D.N. Reliability of machines. *Vyssshaya shkola*, 1988, 238p.
 9. Bazrov B.M. The basics of engineering technology. *Mashinostroenie*, 2005, 736 p.
 10. Birger I.A. Calculation of the strength of machine parts. Handbook, 4th ed., *Mashinostroenie*, 1993, 702 p.
 11. A.Ya. Nekrasov, M.O. Arbuzov, and A.N. Sobolev. Automatic Control of the Static Loads in Multicontact Mechanical Systems. *Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 35. No. 6. pp. 442-446.
 12. A.N. Sobolev, A.Ya. Nekrasov. CAD/CAE Modeling of Maltese Cross Mechanisms in Machine Tools // *Russian Engineering Research*, 2016, Vol. 36, No. 4, pp. 300-302.
 13. Chekanin V.A., Chekanin A.V. Multilevel linked data structure for the multidimensional orthogonal packing problem // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 598. P. 387–391.
 14. Brovkina Y.I., Sobolev A.N., Nekrasov A.Ya. Research of Characteristics and Parameters of Cycloidal Gear. *International Conference of Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2018, pp. 1169-1179.
 15. Arbuzov M.O., Nekrasov A.Y., Sobolev A.N., Serebryakov K.E. Progressive methods of mounting pulleys and sprockets on shafts. *Vestnik MGTU "Stankin"*, 2018, No. 2 (45), pp. 15-20.
 16. Arbuzov M.O., Nekrasov A.Ya., Sobolev A.N. Shaft coupling with hub. Application No. 2017118183. The priority of the utility model 05/25/2017. Patent for utility model number 177902. Date of state. registration 15.03.2018. Valid until May 25, 2027
 17. Arbuzov M.O., Nekrasov A.Ya., Sobolev A.N. Shaft-hub connection. Application No. 2017118184. The priority of the utility model 05/25/2017. Patent for utility model number 183767. Date of state. registration 02.10.2018. Valid until May 25, 2027
-

УДК 539.3

МИКРО- И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ МЕДИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

М. Л. Хазин¹, Р. А. Апакашев¹¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация

В машиностроении широко применяют медные покрытия и пленки для различных целей. Практическое применение пленок определяется их механическими свойствами, которые определяются их структурой. Рассмотрена механические свойства пленок меди с микро- и нанокристаллической структурой, полученных методами химического и электрохимического осаждения. Размеры зерен изменялись в интервале 60–5000 нм. Показана применимость уравнения Холла-Петча. Предложена модель, учитывающая зернограницные эффекты упрочнения и плотность дислокаций. Проведено изучение влияния термообработки в широком интервале температур на механические свойства и структуру пленок меди различной толщины.

Ключевые слова: машиностроение, микро- и нанокристаллические материалы, механические свойства, плотность дислокаций, химическое и электрохимическое осаждение, зернограницное упрочнение.

MICRO AND NANOSTRUCTURED COPPER FILMS IN MECHANICAL ENGINEERING

M.L. Khazin¹, R.A. Apakashev¹¹Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract

Copper coatings and films are widely used for various purposes in engineering. The practical application of films is determined by their mechanical properties, which are determined by their structure. The mechanical properties of copper films with micro- and nanocrystalline structures obtained by chemical and electrochemical deposition are considered. The grain sizes varied in the range of 60–5000 nm. The applicability of the Hall-Petch equation is shown. A model that takes into account the grain boundary effects of hardening and the density of dislocations is proposed. A study was made of the effect of heat treatment in a wide range of temperatures on the mechanical properties and structure of copper films of various thicknesses.

Keywords: mechanical engineering, micro- and nanocrystalline materials, mechanical properties, dislocation density, chemical and electrochemical deposition, grain-boundary hardening.

В машиностроении медные покрытия и пленки применяют для увеличения электропроводности (до 24 мкм), для защитно-декоративных целей при эксплуатации в помещениях, для улучшения пайки по стали (до 3 мкм), для деталей, подвергаемых глубокой вытяжке (до 9 мкм), а также в качестве подслоя под никель, серебро, золото и др. Практическое применение наноматериалов определяется их механическими свойствами: упругостью, пластичностью, прочностью и т. д. Свойства пленок определяются их структурой.

Особенности структуры и свойств наноматериалов существенно зависят от ха-

рактера распределения, размера, формы и химического состава кристаллитов.

Целью статьи является – выяснение закономерностей проявления роли размерных эффектов в формировании свойств наноматериалов. Основными эксплуатационными характеристиками медных пленок являются их механические свойства.

Пленки меди получали химическим и электрохимическим осаждением из водных растворов на металлические (нержавеющая сталь 12X18H9T, никель) и неметаллические (стеклотекстолит, ситалл) подложки. Изучение тонкой структуры меди проводили методом просвечивающей электронной

микроскопии на электронном микроскопе TESLA BS 500. Для этого покрытия утоняли двухсторонним электрохимическим травлением по методу “окна” в 50 % водном растворе ортофосфорной кислоты.

Изучение структуры проводили на дифрактометре ДРОН-3 с использованием отфильтрованного никелем характеристического $K\alpha$ излучения железа. Для вычисления характеристик тонкой структуры использовали семь коэффициентов Фурье ($t = 0,1...6$). Изучение элементный состав пленок определяли атомно-адсорбционным методом на спектрофотометре модели 403 фирмы “Перкин Элмер”. Для исследования механических свойств, медные пленки отделяли от подложек. Механические свойства свободных пленок меди определяли при испытаниях на растяжение на разрывной машине с записью диаграмм деформации. Изучение воздействий температуры на свойства пленок проводили в интервале температур 77-1000 К в гелиевой атмосфере. Длительность теплового воздействия при отжиге варьировали от пяти минут до пяти часов. Результаты измерений усредняли по 10 образцам.

Пленки меди получали химическим и электрохимическим осаждением из водных растворов. Размеры зерен изменялись в интервале 60-5000 нм. Элементный состав пленок меди, определенный атомно-адсорбционным методом, близок к меди марки М2 ($Cu = 99,70 \%$). В тоже время образцы, рассмотренные в работах [1, 2], близки к меди марки М00 ($Cu = 99,99 \%$) [3].

Для поликристаллических металлов изменение напряжения течения (σ_T) от размеров зерен (d) описывается уравнением Холла-Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}, \quad (1)$$

где σ_0 напряжение, характеризующее сопротивление пластической деформации k_y - коэффициент, характеризующий вклад в упрочнение со стороны границ зерен.

Полученные экспериментальные данные по изменению напряжения течения химически и электрохимически осажденной

меди от размера зерна (в зависимости $d^{-1/2}$) описываются линейной зависимостью (рис. 1). Следовательно, уравнением Холла-Петча можно использовать при описании микро- и наноструктур. К аналогичному выводу пришли и при исследовании пленок меди, полученных магнетронным распылением [4]. Экстраполяция зависимости $\sigma_0 = \sigma_0(\varepsilon)$ к $\varepsilon = 0$ позволила оценить величину напряжения трения σ_f . Полученные результаты по-химически и электрохимически осажденной меди согласуются с данными, полученными другими авторами [5] и способами: литья [1, 6, 7], вакуумного напыления [2] (табл. 1).

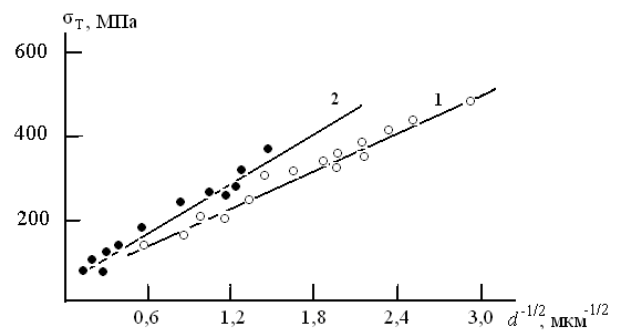


Рис. 1. Зависимость напряжения течения от величины зерна:

- 1 – химически осажденные пленки,
- 2 – электрохимически осажденные пленки

Величина σ_f или σ_0 зависит от наличия препятствий для продвижения дислокаций в плоскостях скольжения (сил трения Пайерлса, леса дислокаций, примесных атомов и других дефектов), а k_y характеризует трудность передачи деформации от зерна к зерну [4].

Увеличение коэффициента σ_f , в случае вакуумных конденсатов, может быть связано с попаданием материала испарителя в конденсат [2], высокой концентрацией точечных дефектов, образующихся при конденсации меди, значительным перепадом температуры то есть обусловлено способом получения. Осаждение медной фольги химическим и электрохимическим способом проводили при температурах 310-320 К, поэтому влияние температуры было незначительно.

Таблица 1. Величины коэффициентов Холла-Петча для меди, полученной разными способами

Способ получения	Интервал размеров зерен, мкм	σ_f , МПа	σ_0 , МПа	k_y , МПа м ^{1/2}
Литая [3]	500-1000	-	26,10	0,11
Литая [1]	0,8-3,4	3,5	-	0,14
Конденсация в вакууме [2]	0,056-8,4	6,4	-	0,15
Электрохимическое осаждение электролит 1 электролит 2	0,5-5	6,2	37,31	0,17
	0,8-8	6,1	32,74	0,15
Химическое осаждение: раствор 1 раствор 2 раствор 3 раствор 4	0,06-2	6,5	27,21	0,16
	0,10-2	6,4	25,16	0,15
	0,06-1,5	6,5	36,23	0,18
	0,04-2	6,7	28,14	0,16
Литая [6]	1-10			0,1-0,13
Литая [6]	0,1			0,06
Литая [6]	0,07			0,05
Литая [7]	50			0,12
Литая деформированная [7]	0,18			0,09

С увеличением температуры отжига прочностные свойства пленок меди, как и для массивного металла, уменьшаются, а пластические возрастают. Временное сопротивление разрыву и предел текучести фольги практически не изменяются до температур 400-440 К, а затем резко уменьшаются, оставаясь, однако выше значений соответствующих массивной отожженной меди. Эти результаты согласуются с данными [8-11], полученными при отжиге меди, полученной как электрохимическим и химическим осаждением, так и металлургическим способом.

Пластичность химически осажденных пленок меди монотонно увеличивается с температурой отжига, а у электрохимически осажденных пленок меди пластичность изменяется по параболической зависимости, достигая максимальных значений при температуре 680 К.

Одновременно с изменениями физико-механических свойств пленок наблюдается существенное изменение структуры металла. С повышением температуры и времени отжига увеличиваются размеры зерен меди (рис. 2), уменьшается плотность дислокаций и дефектов (табл. 2).

Для образцов, химически осажденных пленок величина микродеформаций с увеличением температуры отжига изменяется

от 0,22 до 0,19 (475 К), от 0,16 (675 К) до 0,15 % при 875 К. При этом величина микронапряжений изменяется от 285 до 220 МПа.

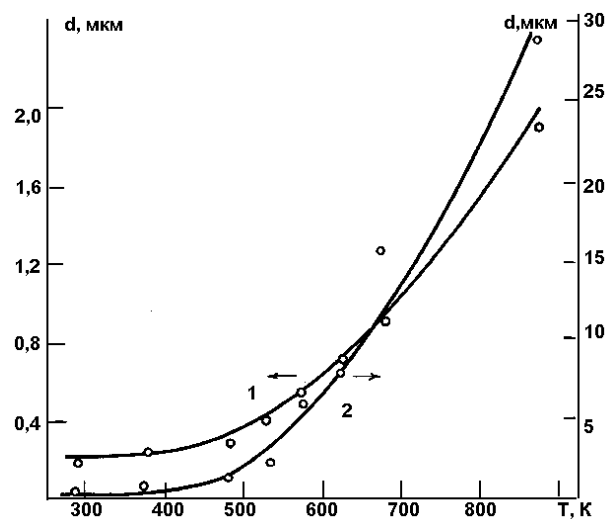


Рис. 2. Изменение величины зерна фольги при отжиге в течение 30 мин.

1 - химически осажденная медь,
2 - электрохимически осажденная медь

Процесс увеличения размеров зерен с повышением температуры отжига более явно выражен у образцов электрохимически осажденной меди. При температурах отжига 650-680 К размеры зерен (d) уже становятся сравнимы с толщиной фольги (h), и величина отношения h/d стремится к единице. Следовательно, при механических ис-

пытаниях будет существенно проявляться

[11] масштабный эффект.

Таблица 2 Влияние термообработки на структуру медной фольги

Температура обработки, К	Средний размер зерна, мкм		Плотность дислокаций, 10^{-12} м^{-2}	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
295	0,42	0,23	283,64	304,3
373	0,71	0,26	182,5	276,2
473	1,12	0,31	80,7	215,6
523	3,26	0,45	40,8	140,5
573	5,84	0,57	24,7	78,6
623	8,06	0,68	11,4	16,2
673	15,78	0,85	7,4	9,7
873	28,45	1,86	0,6	4,2

Примечание - Образцы получены электрохимическим (*A*) и химическим (*B*) осаждением

Именно влиянием масштабного эффекта можно объяснить уменьшение пластичности электрохимически осажденной меди при увеличении температуры воздействия выше 680 К. Этот же эффект обуславливает меньшую надежность изделий электронной техники, изготовленных на основе плат полученных по традиционной субтрактивной технологии, по сравнению с аппаратурой изготовленной на аддитивных платах.

Проведенные исследования субструктуры и механических свойств медной фольги показали, что при толщинах образцов более 3 мкм "эффект толщины" не проявляется, т. е. прочность определяется не толщиной фольги, что подтверждается отсутствием зависимости типа $\sigma_b = \sigma_b(h)$ [13, 14].

Прочностные свойства образцов, после проведения отжига, превышают значения для массивной меди. В связи с этим можно предположить, что уменьшение чистоты меди от 99,99 до 99,95 %, то есть наличие примесей, и обуславливает наблюдаемое повышение значений коэффициентов σ_f и k_y . Это предположение подтверждается данными по электрохимической меди (см. табл. 1). Введение некоторых органических добавок приводило к переходу от равноосной структуры к столбчатой, что проявилось в понижении временного сопротивления разрыву и предела текучести, уменьшению пластичности и повышению удельного электросопротивления.

Оценка плотности дислокаций по экспериментальным значениям напряжения течения, согласуется с данными, полученными из уширения дифракционных максимумов.

Повышение толщины пленок и увеличение размеров зерен меди приводит к уменьшению плотности дислокаций, что проявляется в уменьшении напряжения течения, временного сопротивления разрыву и повышении пластичности.

При проведении химического и электрохимического осаждения возможно включения частиц примесей в растущий кристалл, наличие которых приводит к существенному повышению напряжения течения и деформационного упрочнения. В результате наблюдается подавление I стадии на кривой упрочнения. Кроме прямого взаимодействия дислокаций с частицами в поликристаллах существенную роль играют зернограничные эффекты упрочнения, вследствие наноструктуры. Действуя в качестве барьеров для движения дислокаций, границы зерен создают дополнительное упрочнение [9], которое суммируется с упрочнением по Оровану. При этом косвенное влияние второй фазы, за счет измельчения структуры, может существенно превышать ее прямое упрочняющее действие, то есть основным эффектом, создаваемым второй фазой, является измельчение структуры.

Особенностью низкотемпературной деформации является ослабление температурной зависимости пластичности с увеличением размера зерна от 0,4 до 2,0 мкм для химически осажденной меди и от 0,4 до 20 мкм для электрохимически осажденной меди.

Таким образом, в пленочных дисперсных системах основной эффект упрочнения определяется косвенным действием частиц второй фазы: высокой дисперсностью ча-

стиц и измельчением структуры при малой объемной доле. При низких температурах динамический возврат подавлен, деформация в зоне приграничной аккомодации проходит на II стадии деформации с упрочнением. Изменения свойств и структуры пленок меди согласуются с данными по низкотемпературной деформации проволок меди и сплава медь-цирконий [14].

В поликристаллах границы зерен можно рассматривать как аналогию плоских частиц, являющихся практически непроходимыми барьерами для дислокаций. В общем случае полагают, что механизм влияния размера зерен на физико-механические свойства заключается [15] в барьерном воздействии границ зерен при скольжении. В мелкозернистых материалах наиболее вероятным механизмом пластической деформации является скольжение.

Список литературы

1. Wang K. Plastic strain-induced grain refinement at the nanometer scale in copper / K. Wang, N.R. Tao, G. Liu, J. Lu, K. Lu. // *Acta Materialia*. 2006. Т. 54. С. 5281.
2. Смирнов Б.Н. Фольга для печатных плат./ Б.Н. Смирнов, М.Л. Хазин // Екатеринбург: 2003. Изд-во- УрО РАН. 376 с.
3. Осинцев О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки / О.Е. Осинцев, В. Н. Федоров // М.: Машиностроение, 2004. 215 с.
4. Tao S. Tribological, mechanical and electrochemical properties of nanocrystalline copper deposits produced by pulse electrodeposition / S. Tao, D.Y. Li // *Nanotechnology*. – 2005. – Т. 17. – №. 1. – С. 65.
5. Du S. Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Magnetron Sputtered Cu Thin Films / S.Du, Y. Li // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2015. – Т. 2015. doi.org/10.1155/2015/969580
6. Meyers M. A. Mechanical properties of nanocrystalline materials / M.A. Meyers, A. Mishra, D.J. Benson // *Progr. Mat. Sci.* - 2006. - Т. 51. - С. 427-556.
7. Соотношение Холла–Петча в нано-и микрокристаллических металлах, полученных методами интенсивного пластического деформирования / А.В. Нохрин, В.Н. Чувильдеев, В. . Копылов и др. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2010. – № 5(2). – С. 142–146.
8. Cho Y. R. Electroless Plated Copper Thin Film for Metallization on Printed Circuit Board: Neutral Process / Y.R. Cho, Y.S. Lee, S.K. Rha // *Korean Journal of Materials Research*, 2013. Т. 23, – №. 11. – С. 661-665.

9. Jung K. Tensile Behavior of Rolled and Annealed Copper Thin Foils / K. Jung, S.Y. Lee, T.B. Kim, K.H. Kim, H.S. Lee // *Applied Mechanics and Materials*. – Trans Tech Publications, 2012. –Т. 152. –С. 151-155.
10. Zhu J. Mechanical properties of commercial copper current-collector foils / J. Zhu, J. Feng, Z. Guo // *RSC Adv.*, 2014. Т. 4. – №. 101. –С. 57671-57678.
11. Коликов А.П. Теория обработки металлов давлением / А.П. Коликов, Б.А. Романцев // М.: Издатель: НИТУ МИСиС. 2015. 451 с.
12. Murata N. et al. Micro texture dependence of the mechanical and electrical reliability of electroplated copper thin film interconnections // *Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2011 IEEE 61st. – IEEE, 2011. – pp. 2119-2125.
13. Kosarev N. Mechanical Properties of Micro-and Nanostructured Copper Films / N. Kosarev, M. Khazin, R. Apakashev, N. Valiev // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2013. Т. 1. – №. 5. –С. 7-10.
14. Overman N. R. et al. Mechanical property anisotropy in ultra-thick copper electrodeposits // *Applied Physics A*. 2015. Vol. 120, no. 3. pp. 1181-1187.
15. Kauffmann A. Thermal stability of electrical and mechanical properties of cryo-drawn Cu and CuZr wires / A. Kauffmann, D. Geissler, J. Freudenberger // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 651. – pp. 567-573. doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.119.

References

1. Wang K. Plastic strain-induced grain refinement at the nanometer scale in copper / K. Wang, N.R. Tao, G. Liu, J. Lu, K. Lu. // *Acta Materialia*. 2006. Т. 54. С. 5281.
2. Smirnov B.N. Fol'ga dlya pechatnyh plat./ B.N. Smirnov, M.L. Hazin // Екатеринбург: 2003. Izd-vo-UrO RAN. 376 s.
3. Osincev O.E. Med' i mednye splavy. Otechestvennyye i zarubezhnyye marki / O.E. Osincev, V. N. Fedorov // М.: Mashinostroyeniye, 2004. 215 s.
4. Tao S. Tribological, mechanical and electrochemical properties of nanocrystalline copper deposits produced by pulse electrodeposition / S. Tao, D.Y. Li // *Nanotechnology*. – 2005. – Т. 17. – №. 1. – С. 65.
5. Du S. Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Magnetron Sputtered Cu Thin Films / S.Du, Y. Li // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2015. – Т. 2015. doi.org/10.1155/2015/969580
6. Meyers M. A. Mechanical properties of nanocrystalline materials / M.A. Meyers, A. Mishra, D.J. Benson // *Progr. Mat. Sci.* - 2006. - Т. 51. - С. 427-556.
7. Sootnoshenie Holla–Petcha v nano-i mikrokristallicheskih metallah, poluchennyh metodami intensivnogo plasticheskogo deformirovaniya / A.V. Nohrin, V.N. Chuvil'deev, V. . Kopylov i dr. //

- Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N I. Lobachevskogo, 2010. –№ 5(2). – S. 142–146.
8. Cho Y. R. Electroless Plated Copper Thin Film for Metallization on Printed Circuit Board: Neutral Process / Y.R. Cho, Y.S. Lee, S.K. Rha // Korean Journal of Materials Research, 2013. T. 23, –№. 11. – S. 661-665.
 9. Jung K. Tensile Behavior of Rolled and Annealed Copper Thin Foils / K. Jung, S.Y. Lee, T.B. Kim, K.H. Kim, H.S. Lee // Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications, 2012. –T. 152. –S. 151-155.
 10. Zhu J. Mechanical properties of commercial copper current-collector foils / J. Zhu, J. Feng, Z. Guo // RSC Adv., 2014. T. 4. –№. 101. –S. 57671-57678.
 11. Kolikov A.P. Teoriya obrabotki metallov davleniem / A.P. Kolikov, B.A. Romancev // M.: Izdatel': NITU MISiS. 2015. 451 s.
 12. Murata N. et al. Micro texture dependence of the mechanical and electrical reliability of electroplated copper thin film interconnections // Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2011 IEEE 61st. – IEEE, 2011. – rr. 2119-2125.
 13. Kosarev N. Mechanical Properties of Micro-and Nanostructured Copper Films / N. Kosarev, M. Khazin, R. Apakashev, N. Valiev // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2013. T. 1. –№. 5. –S. 7-10.
 14. Overman N. R. et al. Mechanical property anisotropy in ultra-thick copper electrodeposits // Applied Physics A. 2015. Vol. 120, no. 3. rr. 1181-1187.
 15. Kauffmann A. Thermal stability of electrical and mechanical properties of cryo-drawn Cu and CuZr wires / A. Kauffmann, D. Geissler, J. Freudenberger // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 651. – pp. 567-573. doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.119.

УДК 669.295.5.017

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТИТАНА ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

А.Р. Асоян¹, А.С. Горшков², В.О. Ерошенко³

¹ФГБУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
г. Москва, Российская Федерация.

¹ФГБУ ВО «Российский университет дружбы народов» (РУДН) г. Москва, Российская Федерация.

²ФГБУ ВО «Российский университет дружбы народов» (РУДН) г. Москва, Российская Федерация.

³ФГБУ ВО «Российский университет дружбы народов» (РУДН) г. Москва, Российская Федерация.

Аннотация

В работе авторами рассмотрено влияние состояния поверхностного слоя лопаток газотурбинных двигателей на их усталостную прочность. Кроме того, авторами проведен статистический анализ экспериментальных данных. Авторами статьи в своем исследовании установлена зависимость распространения усталостных трещин в титановых сплавах не только от состояния поверхностного слоя, концентраторов напряжений, но и от структуры и состава материала. Также, авторами разработана модель лопатки ГТД и проведен сравнительный анализ несущей способности лопаток изготовленных из сплавов ВТ-3, ВТ-5, ВТ-20 с использованием программного продукта Autodesk Fusion 360. При работе над исследованием использовался метод конечных элементов. Авторами сделаны выводы о запасе прочности применяемого материала лопатки.

Ключевые слова: лопатка газотурбинного двигателя; титановый сплав, Autodesk Fusion 360.

SURFACE HARDENING OF TITANIUM BY PLASTIC DEFORMATION

A.R. Asoyan¹, A.S. Gorshkov², V.O. Eroshenko³

¹ Federal State Budgetary Institution VO "Moscow automobile and road state technical university (Moscow Administrative Road Inspectorate)" Moscow, Russian Federation.

¹ Federal State Budgetary Institution VO "Peoples' Friendship University of Russia" (PFUR) Moskva, Russian Federation.

² Federal State Budgetary Institutions VO "Peoples' Friendship University of Russia" (PFUR) Moskva, Russian Federation.

³ Federal State Budgetary Institutions VO "Peoples' Friendship University of Russia" (PFUR) Moskva, Russian Federation.

Abstract

In work as authors influence of a condition of a blanket of shovels of gas-turbine engines on their fatigue durability is considered. Besides, authors carried out the statistical analysis of experimental data. Authors of article in the research established dependence of distribution of fatigue cracks in titanic alloys not only from a condition of a blanket, concentrators of tension, but also from structure and composition of material. Also, authors developed model of a shovel of GTE and the comparative analysis of bearing capacity of the shovels made of VT-3, VT-5, VT-20 alloy with use of the Autodesk Fusion 360 software product is carried out. During the work on a research the finite element method was used. Authors drew conclusions on the margin of safety of the applied shovel material.

Keywords: Shovel of the gas-turbine engine; titanic alloy, Autodesk Fusion 360.

На протяжении более 50 лет продолжается исследования авиационных газотурбинных двигателей для авиационной техники [1].

Первоначально титановые сплавы составляли 5-10% от общего числа деталей га-

зотурбинного двигателя, а современные двигатели на 40% изготавливаются из титановых сплавов [2].

Актуальность исследования заключается в том, что сейчас происходит конструкторская, технологическая и металловедческая

проблема создания нового двигателя шестого поколения [3].

На сегодняшний день в данной отрасли ведутся работы по созданию опережающего научно-технического задела для изготовления лопаток двигателей нового поколения [4].

Титановые сплавы также широко применяются в морском судостроении и морской авиации, так как высокая коррозионная стойкость делает их незаменимым материалом для обшивки корпусов. Титан, благодаря своим высоким свойствам, находит применение в химической промышленности, приборостроении, медицине [5].

Таким образом, перед специалистами стоит задача по повышению работоспособности материалов в условиях жесткого комплексного воздействия высоких температур, напряжений и агрессивной среды. [3]

Необходимо отметить, что титановые сплавы активно используются при разработке авиационных двигателей в качестве материала для лопаток компрессора. [6].

Поскольку высокая прочность, малая плотность, высокая удельная прочность, широкий температурный интервал применения титановых сплавов позволяют значительно снизить массу конструкций и повысить надежность их работы. [7]

Для изготовления лопаток компрессора газовых турбин применяются титановые сплавы, которые по сравнению с техническим титаном имеют более высокую прочность, в том числе и при высоких температурах, сохраняя при этом высокую пластичность и коррозионную стойкость [8].

Надежность газотурбинных двигателей в значительной степени зависит от надежности работы лопаток компрессора и турбины, так как на них приходится значительная нагрузка. [6]

Лопатки газотурбинных двигателей (далее - ГТД) это - детали сложной геометрии.

Назначение лопатки (ГТД) - передача давления сгораемых газов на вал ротора. [9]

Для того, чтобы получить оптимальные физико-механические и технологические свойства детали из промышленных титановых сплавов необходимо их подвергнуть

различным видам термической обработки. [10]

Для исследования использованы сплавы титана. Главными преимуществами титановых сплавов перед другими конструкционными материалами являются их высокие удельная прочность и жаропрочность в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. [11]

Авторами проведен сравнительный анализ несущей способности лопаток из сплавов ВТ-3 (жаропрочный сплав), ВТ-5 (среднепрочный сплав), ВТ-20 (среднепрочный сплав) на основании следующего:

Сплав ВТ-3 относится к числу наиболее освоенных в производстве сплавов.

Из титанового сплава ВТ-5 получают титановые прутки (круги), проволоку и трубы, а также листы. Сплав куется, прокатывается, штампуется и хорошо сваривается.

Титановый сплав ВТ-20 разрабатывали как более прочный листовой сплав по сравнению с ВТ-5. Упрочнение сплава ВТ-20 обусловлено его легированием, помимо алюминия, цирконием и небольшими количествами молибдена и ванадия [12].

Работоспособность деталей газотурбинных двигателей (ГТД) испытывающих многоцикловые нагрузки зависит от усталостной прочности материала основы и состояния поверхностного слоя (макро и микрогеометрической неровности поверхности, физико-механических свойств и т. д.) [13].

Результаты исследований [13] показывают влияние шероховатости на предел выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ материала, т.е. снижение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ при увеличении шероховатости.

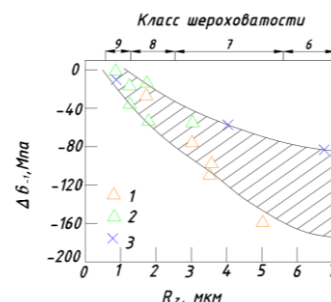


Рис. 1. Снижение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ при увеличении шероховатости поверхности R_z сплавов 1- ВТ9, $t_{исп} = 20^{\circ}\text{C}$; 2- ВТ9, $t_{исп} = 500^{\circ}\text{C}$; 3- ВТ3, $t_{исп} = 20^{\circ}\text{C}$

Упрочнение поверхности с образованием сжимающих остаточных напряжений повышает предел выносливости, устраняет влияние концентраторов напряжений на предел выносливости.

При многоцикловом нагружении, трещины зарождаются в поверхностном слое, состояние которого влияет на уровень предела выносливости. Использование поверхностной пластической деформации в местах концентрации напряжений позволяет повысить усталостную прочность деталей, испытывающих многоцикловые нагружения.

Статистический анализ экспериментальных данных показывает существование логарифмически нормального закона распределения значений долговечности титановых сплавов при заданных циклических напряжениях, составляющих 1,1-1,5 от установленного предела выносливости при $10 \cdot 10^6 - 10 \cdot 10^7$ циклах.

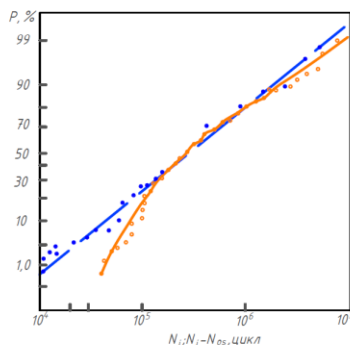


Рис. 2. Распределение циклической долговечности и вероятности разрушения P без учета (кривая 1) и с учетом порога чувствительности N_{0s} (кривая 2)

Распределение циклической долговечности $X = \lg N_i$ (рис. 2) свидетельствует о близком к нормальному распределению $\lg N_i$, и о существовании при малых долговечностях порога чувствительности по циклам N_{0s} титана [13].

На основе изучения кинетики усталостного разрушения установлено, что наибольшее влияние на скорость разрушения оказывают дефекты, возникающие в поверхностном слое детали в процессе изготовления (при горячей объемной деформации и температуры перекрекристаллизации и рекристаллизации, изменение микроструктуры сплава и др.).

Анализ статистических результатов усталостных испытаний сплавов позволяет установить зависимость распространения усталостных трещин в титановых сплавах не только от состояния поверхностного слоя, концентраторов напряжений, но и от структуры и состава материала, в связи, с чем интерес представляет сравнение усталостной прочности титановых сплавов используемых для изготовления лопаток турбин ГТД.

Для решения поставленной задачи использовали 3D численное твердотельное моделирование, с учетом конструктивных особенностей, свойств и параметров рабочего тела, результаты моделирования сил, действующих на лопатку ГТД максимально приближены к реальности.

При определении сил, действующих на поверхность лопатки, использовали численное твердотельное моделирование в программном продукте Autodesk Fusion 360. В качестве анализируемых материалов использовали титановые сплавы марок ВТ-3, ВТ-5, ВТ-20, состав сплавов представлен в табл. 1.

Спектр нагрузок, воспринимающих лопатками турбин, достаточно широк. Действующие многоцикловые нагружения (напряжения растяжения, изгиба) лопаток ГТД приводят к проявлению усталости материала основы.

С целью определения прочности материала лопатки необходимо учитывать суммарные растягивающие напряжения от действия центробежных и газовых сил действующих в наиболее нагруженных точках профиля пера лопатки [14], в общем случае:

$$\sigma_A = \frac{P_u}{F} + \frac{M_{\xi}^2 \cdot \eta_A}{I_{\xi}} - \frac{M_{\eta}^2 \cdot \xi_A}{I_{\eta}} \quad (1)$$

где F – площадь корневого сечения пера лопатки, M_{ξ}^2 , M_{η}^2 – изгибающие моменты от газовых сил; I_{ξ} , I_{η} – моменты инерции сечения относительно главных осей ξ и η .

Таблица 1. Химический состав в % материала
BT3, BT5, BT20 ГОСТ 19807-91

	BT3	BT5	BT20
Fe	0,2-0,7	до 0.3	до 0.25
C	до 0.1	до 0.1	до 0.1
Si	0.15-0.14	до 0.12	до 0.15
Cr	0.8-2	-	-
Mo	2-3	-	0.5-2
N	до 0.05	до 0.05	до 0.05
Ti	85.95-91.05	88.83-93.4	85.15-91.4
Al	5.5-7	4.3-6	5.5-7
Zr	до 0.5	до 0.3	1.5-2.5
O	до 0.15	до 0.15	до 0.15
Sn	-	2-3	-
H	до 0.015	до 0.015	до 0.015
V	-	до 1	0.8-2.5
Примесей	0.3	0.3	0.3

В решении данной задачи ограничимся расчетом запаса прочности и пластическим деформированием пера лопатки (рис.1).

К каждой из моделей были приложены нагрузки:

1. Центробежная сила - 98066.5 Н
2. Осевое усилие - 147 Р
3. Окружное усилие - 392 Н
4. Рабочая температура - 500 °С.

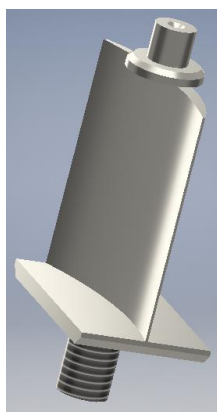


Рис. 3. 3-D модель лопатки газотурбинного двигателя

Затем для каждого вида материала были заданы соответствующие физические и химические свойства (табл. 2).

Таблица 2. Свойства материалов

Свойства		BT-5	BT-3	BT-20
Density	Плотность	4,45E-06 kg/mm ³	4,425E-06 kg/mm ³	4,45E-06 kg/mm ³
Young's Modulus	Модуль Юнга	113763 MPa	110000 MPa	113763 MPa
Poisson's Ratio	Коэффициент Пуассона	0,35	0,35	0,35
Yield Strength	Предел текучести	840 MPa	950 MPa	840 MPa
Ultimate Tensile Strength	Предел прочности на растяжение	1000 MPa	1000 MPa	1000 MPa
Thermal Conductivity	Теплопроводность	0,0067 W/(m C)	0,0067 W/(m C)	0,0067 W/(m C)
Thermal Expansion Coefficient	Коэффициент теплового расширения	9<298 E-06/C	1,465E-05/C	9,298E-06/C
Specific Heat	Удельная теплоемкость	711 J/(kg C)	670 J/(kg C)	711 J/(kg C)

Результаты расчёта запаса прочности и пластического деформирования рабочей поверхности пера лопатки из сплавов BT-3, BT-5, BT-20 в программном продукте Autodesk Fusion 360 представлены на рис. 4, 5.

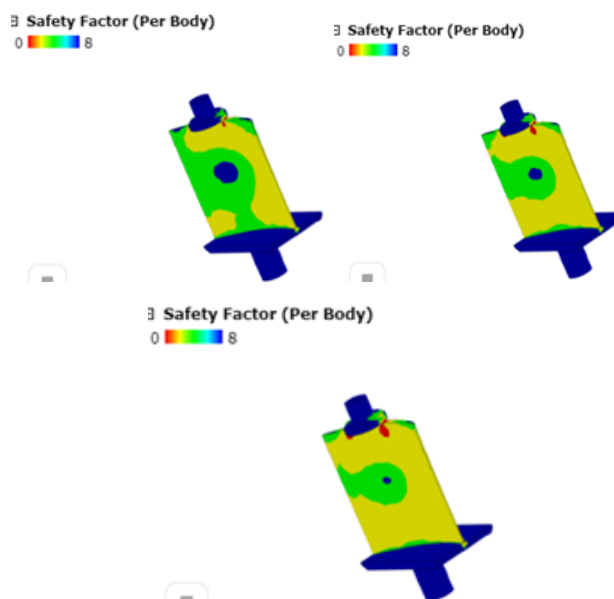
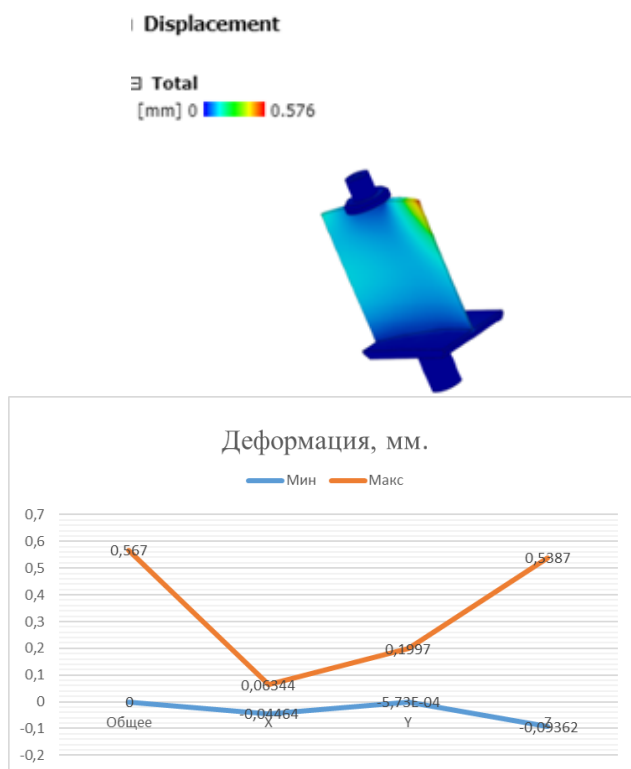
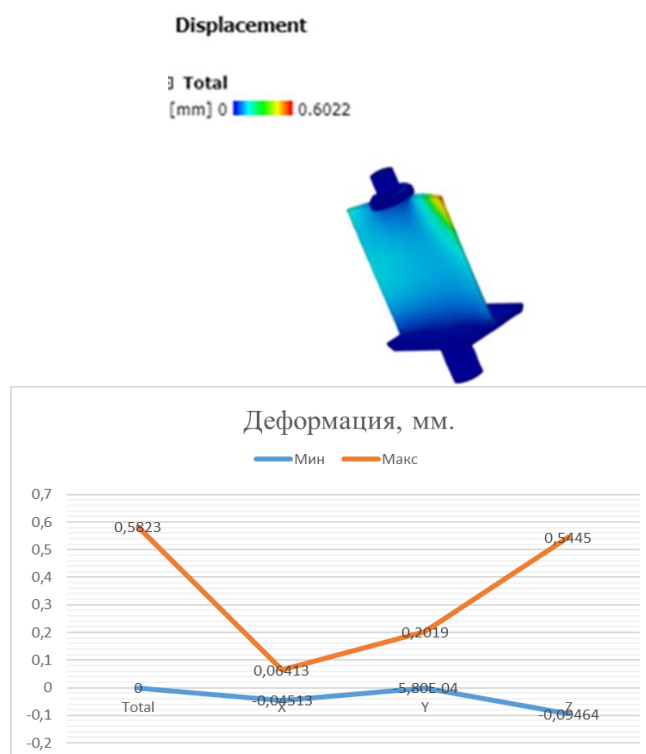


Рис. 4. Распределение напряжений при расчете прочности рабочей поверхности лопатки турбины

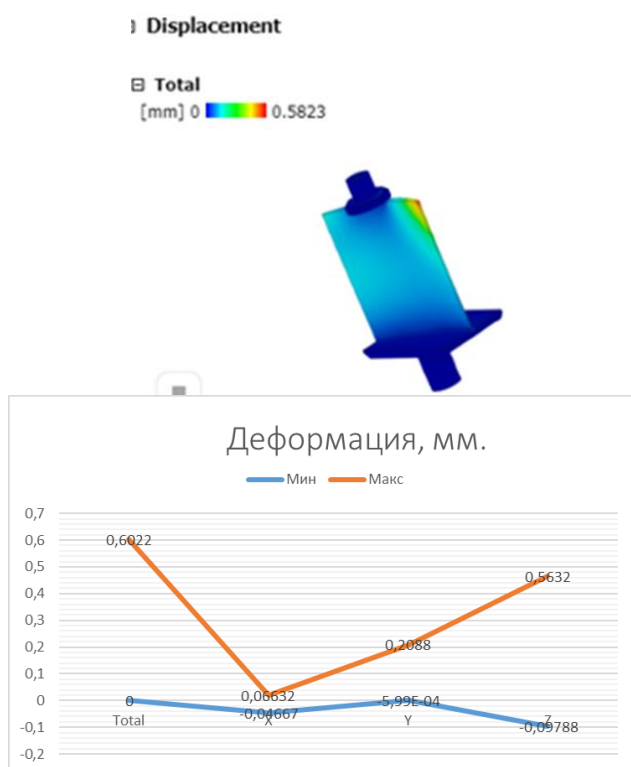


Материал лопатки ВТ-3



Материал лопатки ВТ-20

Рис. 5. Распределение напряжений при расчете пластического деформирования рабочей поверхности лопатки турбины



Материал лопатки ВТ-5

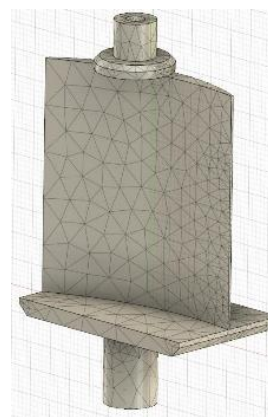


Рис. 6. Моделирование лопатки методом конечных элементов [15- 16]

Выводы

1. Анализ результатов расчетов показывает, что лопатка, изготовленная из сплава ВТ-3, имеет большую несущую способность по сравнению со сплавами ВТ-5 и ВТ-20.

2. Представленный метод позволяет оценить запас прочности применяемого материала лопатки, учесть возможное неблагоприятное сочетание различных факторов для реальной геометрии.

3. Полученные результаты по уровню возникающих напряжений обуславливают необходимость повышения несущей способности лопаток газотурбинных двигателей, путем поверхностного пластического деформирования рабочих поверхностей пера лопатки.

4. Распределение напряжений при расчете прочности рабочей поверхности лопатки турбины (рис.4) указывает на то что, лопатка из сплава ВТ-3 имеет больший запас прочности чем лопатки из сплавов ВТ-5 и ВТ-20 при заданных нагрузках.

5. Распределение напряжений при расчете пластического деформирования рабочей поверхности лопатки турбины (рис.5) показывает то что лопатка из сплава ВТ-3 показывает наименьшую подверженность деформации по краю лопатка чем лопатки из сплавов ВТ-5 и ВТ-20.

Таким образом, исходя из данных полученных в программе Autodesk Fusion 360 можно сделать следующий вывод: лопатка из сплава ВТ-3 будет дольше работать при заданных нагрузках.

Список литературы

1. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Ночовная Н.А. Титановые сплавы для газотурбинных двигателей // Все материалы, Энциклопедический справочник. – 2012. – № 5. – С. 4.
2. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Современные титановые сплавы и проблемы их развития // М.:ВИАМ – 2010. С.43-35.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI в. Перспективы и задачи. Под редакцией чл.-кор. РАН Каблова Е.Н. – 2002. – С. 39.
4. Крымов В. В., Елисеев Ю. С., Зудин К. И. Производство лопаток газотурбинных двигателей / Под ред. В. В. Крымова. // М.: Машиностроение, 2002. – С. 376.
5. Белов С.П., Хорев А.И., Хорев М.А. Металловедение титана и его сплавов // М.:Металлургия. – 1992. – С. 352.
6. Тамеев Д.О. Современный метод изготовления лопаток газотурбинных двигателей. // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2015. – № 11. – С. 131-132.
7. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и

перспективные направления их развития. – 2013.

8. Смыслов А. М., Мингажев А. Д., Смыслова М. К., Селиванов К. С., Мингажева А. А. Наносное покрытие для лопаток турбомашин из титановых сплавов // УГАТУ. – 2011. – Т. 15. – № 1 (41) – С. 109–112.
9. Кротинов Н.Б.. Продление ресурса лопаток газотурбинных двигателей упрочняющей обработкой // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. – Вып. 5 – С. 221
10. Бургонова О.Ю., Пантюхова К.Н., Белозерова Е.П. Определение рационального режима термической обработки сплава вт3-1 для повышения пластичности перед обработкой давлением // Омский научный вестник. – 2017. – № 3 (153). – С.44.
11. Цветные металлы и сплавы. Справочник – 2001. – С. 49.
12. Белов С.П., Брун М.Я., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Metallurgy. 1992. – С. 352.
13. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. – М.: Машиностроение, 1990. – С. 528.
14. Кишалов А. Е., Кудоярова В. М., Маркина К. В., Игнатьев О. И. Анализ нагрузок, действующих на элементы конструкции ГТД // Молодой ученый. – 2012. – №11. – С. 52-60.
15. Трушин С.И., Метод конечных элементов. Теория и задачи.; М., Просвещение. – 2008. – С.53-87.
16. Смирнитский Н.С. // Разработка приложений для продуктов Autodesk., API – 2018.

References

1. Pavlova T.V., Kashapov OS, Nochovnaya N.A. Titanium alloys for gas turbine engines // All materials, Encyclopedic Reference. - 2012. - № 5. - p. 4.
2. Inozemtsev A.A., Bashkatov I.G., Koryakovtsev A.S. Modern titanium alloys and the problems of their development // M.: VIAM - 2010. P.43-35.
3. Kablov E.N. Aviation Materials in the XXI century. Prospects and visions. Edited by Corr. RAS Kablova E.N. - 2002. - p. 39.
4. Krymov V.V., Eliseev Yu.S., Zudin K.I. Production of gas turbine engine blades / Ed. V. V. Krymov. // M.: Mashinostroenie, 2002. - p. 376.
5. Belov S.P., Khorev A.I., Khorev M.A. Metal science of titanium and its alloys // M.: Metallurgy. - 1992. - p. 352.
6. Tameev D.O. Modern method of manufacturing blades for gas turbine engines. // International scientific journal "Innovation Science". - 2015. - № 11. - P. 131-132.
7. Khorev A.I. Fundamental and applied works on structural titanium alloys and promising directions for their development. - 2013.

-
8. Smyslov A.M., Mingazhev A.D., Smyslova M.K., Selivanov K.S., Mingazheva A.A. A coating for turbomachine blades of titanium alloys // USATU. - 2011. - V. 15. - № 1 (41) - P. 109–112.
 9. Krotinov, NB. Extension of the service life of blades for gas turbine engines by strengthening treatment. Izvestia TSU. Technical science. - 2016. - Vol. 5 - с. 221.
 10. Burgonova O.Yu., Pantyukhova KN, Belozerova E.P. Determination of a rational thermal regime machining alloy V3-1 to increase plasticity before pressure treatment // Omsk Scientific Herald. - 2017. - № 3 (153). - p.44.
 11. Non-ferrous metals and alloys. Reference book - 2001. - p. 49.
 12. Belov S.P., Brun M.Ya., Glazunov S.G. Metallurgy of titanium and its alloys. M.: Metallurgy. 1992. - p. 352.
 13. Lakhtin Yu.M., Leontyeva V.P. Materials science: Textbook for higher technical educational institutions. - M.: Mashinostroenie, 1990. - p. 528.
 14. Kisalov A.E., Kudoyarova V.M., Markina K.V., Ignatiev O.I. Analysis of the loads acting on the structural elements of a gas turbine engine // Young Scientist. - 2012. - №11. - pp. 52-60.
 15. Trushin, SI, Finite Element Method. Theory and objectives.; M., Enlightenment. - 2008. - P.53-87.
 16. Smirnitsky N.S. // Development of applications for Autodesk products. API — 2018.

УДК 621.923:621.90.17

РАСШИРЕННАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА ДЛЯ ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ

Е.А. Владецкая¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы построения динамической модели операции шлифования с учетом статистических характеристик возмущений. Отклонения формы шлифовального круга в статическом режиме имеют случайный характер и при анализе процесса обработки могут быть учтены путем введения в состав системы дополнительного звена – соответствующего формирующего фильтра. Такой фильтр может быть построен на основе анализа профиля для любого конкретного шлифовального круга с представлением воздействия на систему в пространстве состояний в виде уравнений состояния и наблюдения. На основе разработанной модели на операциях шлифования в условиях плавучих мастерских обеспечивается возможность применения высокоточных станков с ЧПУ, оснащенных системами адаптивного управления на базе оптимальных систем со стохастическим регулятором процесса.

Ключевые слова: операция шлифования, технологическая система, динамика процесса обработки, формирующий фильтр, фильтр Калмана.

EXTENDED MODEL OBJECT FOR OPERATION GRINDING

Е.А. Vladetskaya¹¹FSFAEI HE «Sevastopol state university», Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article discusses the issues of building a dynamic model of a flat grinding operation, taking into account the statistical characteristics of the disturbances. Deviations of the shape of the grinding wheel in a static mode are random in nature and, when analyzing the processing process, can be taken into account by introducing an additional link into the system - the corresponding shaping filter. Such a filter can be built on the basis of profile analysis for any particular grinding wheel with a representation of the effect on the system in the state space as equations of state and observation. On the basis of the developed model for grinding operations in floating workshops, it is possible to use high-precision CNC machines equipped with adaptive control systems based on optimal systems with a stochastic process controller.

Keywords: grinding operation, technological system, the dynamics of the process, forming the filter, Kalman filter.

Повышение прочности, твердости и износостойкости конструкционных материалов определило общую тенденцию к снижению их обрабатываемости, что приводит к повышенному износу инструмента, увеличению сил резания, деформаций, а, следовательно, к снижению точности обработки и качества обработанных поверхностей. В этих условиях особо актуальной становится задача создания и совершенствования высокоэффективных финишных методов обработки изделий, на которых формируются заданные параметры качества.

Одним из распространенных методов обработки деталей является плоское шлифование. Достижение заданных параметров качества при обработке возможно за счет учета динамики технологической системы.

На основе анализа взаимодействия элементов динамической системы с учетом представления процесса шлифования в форме [1] можно построить описание динамики процесса обработки в виде:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1(x_{10} + x_1) + h_3(\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) + \\ + c_3(x_{10} + x_1 + R + \Delta R) - h_3(\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) - \\ - c_3(x_{20} + x_2 - k - \Delta k) = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2(x_{20} + x_2) + \\ + h_3(\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) + c_3(x_{20} + x_2 - \\ - k - \Delta k) - h_3(\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) - \\ - c_3(x_{10} + x_1 + R + \Delta R) - h_2 \dot{L} - \\ - c_2(L + \Delta L) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где m_1, m_2 – приведенные массы заготовки с приспособлением и круга со шпинделем; h_i – коэффициент сопротивления i -го звена; C_i – коэффициент жесткости i -го звена; x_{10}, x_{20} , x_1, x_2 – координаты центра вращения круга и базовой поверхности детали и их приращенные соответственно; R – радиус круга; k – соответствующий линейный размер детали; $\Delta R, \Delta k$ – вариации радиуса круга и линейного размера заготовки, соответственно; $L, \Delta L$ – расстояние от базовой поверхности детали до центра вращения круга и его изменение по лимбу станка.

С учетом условий силового замыкания технологической системы при номинальных режимах обработки можно построить соотношения, характеризующие динамику процесса в вариациях:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3(\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) + \\ + c_3(x_1 + \Delta R) - h_3(\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) - \\ - c_3(x_2 - \Delta k) = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 + h_3(\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) + \\ + c_3(x_2 - \Delta k) - h_3(\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) - c_3(x_1 + \Delta R) - \\ - h_2 \dot{L} - c_2 \Delta L = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Систему (2) целесообразно представить в форме пространства состояний Фробениуса:

$$\dot{Z}_0 = A_0 Z_0 + B_0 W_0 + C_0 U_0$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\alpha_0}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_1}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_2}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_3}{\alpha_4} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \end{bmatrix} (R_1 + R_2) + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} S \quad (3)$$

где $z_1 = x_1$, $z_2 = z_1 p = \dot{x}_1$, $z_3 = z_2 p = \ddot{x}_1$,

$z_4 = z_3 p = \ddot{x}_2$, $z_5 = z_4 p = \ddot{x}_1$;

$R_1 = \Delta R$; $R_2 = \Delta k$; $\Delta L = S$;

$\lambda_1 = \beta_2$; $\lambda_2 = \beta_1 - \alpha_3 \lambda_1$; $\lambda_3 = \beta_0 - \alpha_3 \lambda_2 - \alpha_2 \lambda_1$;

$\alpha_4 = (m_1 m_2)$; $\alpha_3 = (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1)$;

$\alpha_2 = (h_2 h_3 + h_1 h_3 + h_1 h_2 + c_1 m_2 + c_3 m_1 + c_3 m_2 + c_2 m_1)$;

$\alpha_1 = (c_2 h_3 + c_1 h_2 + c_2 h_1 + c_3 h_2 + c_1 h_3 + c_3 h_1)$; $\alpha_0 = (c_1 c_2 +$

$+ c_2 c_3 + c_1 c_3)$; $\chi_3 = h_3 m_2$; $\chi_2 = (c_3 m_2 + h_2 h_3)$;

$\chi_1 = (c_3 h_2 + c_2 h_3)$; $\chi_0 = c_2 c_3$;

$\beta_2 = h_2 h_3$; $\beta_1 = (h_2 c_3 + h_3 c_2)$; $\beta_0 = c_2 c_3$;

$\lambda_1 = h_2 h_3 = \beta_2$;

$\lambda_2 = (c_3 h_2 + c_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 +$

$+ h_2 m_1 + h_3 m_1) h_2 h_3 = \beta_1 - \alpha_3 \lambda_1$;

$\lambda_3 = c_2 c_3 - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1) h_2 h_3 \times$

$\times [(c_3 h_2 + c_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1) h_2 h_3] =$

$= \beta_0 - \alpha_3 \lambda_2 - \alpha_2 \lambda_1$;

$\gamma_1 = -h_3 m_2 = -\chi_3$;

$\gamma_2 = -(c_3 m_2 + h_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 +$

$+ h_2 m_1 + h_3 m_1) (-h_3 m_2) = -\chi_2 - \alpha_3 \gamma_1$;

$\gamma_3 = -(c_3 h_2 + c_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 +$

$+ h_2 m_1 + h_3 m_1) \times [-(c_3 m_2 + h_2 h_3) -$

$-(h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1) (-h_3 m_2)] =$

$= -\chi_1 - \alpha_3 \gamma_2 - \alpha_2 \gamma_1$;

$$\begin{aligned} \gamma_4 = & -c_2 c_3 - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + \\ & + h_3 m_1) \times (-c_3 h_2 + c_2 h_3) - \\ & - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1) \times \\ & \times [-(c_3 m_2 + h_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1)(-h_3 m_2)] - \\ & - (h_2 h_3 + c_1 m_2 + h_1 h_3 + c_3 m_1 + c_3 m_2 + c_2 m_1 + h_1 h_2) \times \\ & \times (-(c_3 m_2 + h_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + \\ & + h_2 m_1 + h_3 m_1)(-h_3 m_2)) - \\ & - (c_2 h_3 + c_1 h_2 + c_2 h_1 + c_3 h_2 + c_1 h_3 + c_3 h_1)(-h_3 m_2) = \\ & = -\chi_0 - \alpha_3 \gamma_3 - \alpha_2 \gamma_2 - \alpha_1 \gamma_1. \end{aligned}$$

Управляемость по Калману системы (3) может быть проанализирована непосредственно с использованием численных значений вышеуказанных параметров для матриц объекта A_0 и управления C_0 .

Анализ работ области исследования динамики процессов шлифования [2-5], показывает, что наиболее нестабильным звеном рассматриваемой динамической системы является шлифовальный круг. В соответствии с моделью (2) основными параметрами шлифовального круга, оказывающими влияние на динамику процесса обработки, являются статические и динамические вариации его профиля. Под статическими вариациями понимаются отклонения формы круга от идеальной в статическом режиме, а под динамическими – отклонения формы, вызываемые непосредственно процессом обработки. К последним можно отнести и отклонения траектории поверхности круга от заданных траекторий вследствие его дисбаланса. Эти отклонения имеют детерминированный характер и могут быть существенно уменьшены известными технологическими методами, например, предварительной балансировкой круга. Отклонения формы шлифовального круга в статическом режиме имеют случайный характер и при анализе процесса обработки могут быть учтены путем введения в состав системы (3) дополнительного звена – соответствующего формирующего фильтра [6-8]. Такой фильтр может быть построен, например, на основе анализа профиля для любого конкретного шлифовального круга с представлением воздействия на систему (3) в пространстве состояний в виде уравнений состояния (4) и наблюдения (5) [9-11]:

$$\dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1, \quad (4)$$

$$y_1 = D_1 G_1 + E_2 v_2 \quad (5)$$

где

$$G_1 = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} KT_3 \\ -1 - KT_2 T_3 \end{bmatrix}, \quad D_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T, \quad E_2 = \rho,$$

w_1, v_2 – некоррелированные единичные порождающие гауссовские белые шумы,

$$T_1 = \frac{1}{v^2(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad T_2 = \frac{2\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)},$$

$$T_3 = \frac{1}{v(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad K = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}},$$

D – дисперсия высот неровностей рельефа шлифовального круга, v – скорость его движения, α, β – соответствующие коэффициенты корреляции.

С учетом $w_0 = y_1$ при введении формирующего фильтра (4) система (3) приобретает вид:

$$\begin{cases} \dot{z}_o = A_o z_o + B_o y_1 + C_o u_o \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1 \\ y_1 = D_1 G_1 + E_2 v_2 \\ y_o = D_o z_o + E_o v_o \end{cases}, \quad (6)$$

откуда непосредственно следует:

$$\begin{cases} \dot{x}_o = A_o x_o + B_o D_1 G_1 + B_o E_2 v_2 + C_o u_o, \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1 \end{cases},$$

что позволяет представить уравнения состояния процесса шлифования с учетом возмущений, определяемых статистическими характеристиками круга как состояния расширенного объекта в виде:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{z}_o \\ \dot{G}_1 \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} A_o & B_o D_1 \\ 0 & A_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_o \\ G_1 \end{bmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} B_o E_2 & 0 \\ 0 & B_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_2 \\ w_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_o \\ 0 \end{bmatrix} \times u_o \end{aligned}$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_3 & 0 \\ -\frac{\alpha_0}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_1}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_2}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_3}{\alpha_4} & \gamma_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_1^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix} \times \quad (7)$$

Система (7) представляет стандартную форму описания динамической системы в терминах теории пространства состояний, что позволяет ее использовать для исследования характеристик и поведения процесса шлифования, а также для синтеза систем управления этим процессом.

На основе разработанной модели на операциях шлифования в условиях плавучих мастерских обеспечивается возможность применения высокоточных станков с ЧПУ, оснащенных системами адаптивного управления, например, на базе оптимальных систем со стохастическим регулятором процесса.

Для синтеза оптимального детерминированного регулятора воспользуемся методикой синтеза линейного регулятора, которая впервые была предложена Калманом [12]. При этом необходимо наличие критерия оптимальности. Таким критерием для линейных систем с гауссовскими возмущениями типа белого шума может выступать функционал вида [8]:

$$I = M \left[\frac{1}{2} x^T(t) P_1 x(t) + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (x^T Q_1 x + u^T R_1^{-1} u) dt \right],$$

где Q_1, P_1, R_1^{-1} – соответствующие весовые матрицы качества управления.

Так как $w(t)$, $v(t)$ – являются по [8] независимыми белыми шумами с интенсивностями Q_I и R_I соответственно, то управление является несмещенным и оптимальным для стохастической постановки [13], поэтому для алгоритма управления справедлива следующая структура:

$$u^*(t) = -K_{ij}^{\wedge} y(t); \quad (8)$$

$$K_{ij} = R_1^{-1} E_T P_1, \quad (9)$$

а матрица, где P_1 удовлетворяет уравнению:

$$\dot{P}_1 = -P_1 A - A^T P_1 + P_1 B R_1^{-1} B^T P_1 - Q_1, \quad P_1(0) = P_{10}.$$

Система с регулятором приобретает вид:

$$\tilde{\dot{V}} = A \cdot \tilde{V} + \tilde{V} \cdot A^T + E \cdot \Psi_w \cdot E^T - \tilde{V} \cdot C^T \cdot \Psi_v^{-1} \cdot C \cdot \tilde{V}; \quad (10)$$

$$\dot{\hat{y}}(t) = A\hat{y}(t) + Bu'(t) + K_{ij}[z(t) - C\hat{y}(t)], \quad \hat{y}(0) = \bar{y}(0)$$

в силу того, что начальное состояние $z(0)$ некоррелировано с $w(t)$, $v(t)$ и распределено по нормальному закону с математическим ожиданием $M(y_0) = \hat{y}_0$ и ковариацией $M[(y - \hat{y}_0)(y - \hat{y}_0)^T] = P_{20}$.

Для получения оценок $\hat{y}$ построен фильтр Калмана с коэффициентом $K = \tilde{V} \cdot C^T \cdot \Psi_V^{-1}$.

Переобозначим $K_i = P_2 C^T R_2^{-1}$, тогда уравнение Риккати запишется:

$$\dot{P}_2 = AP_2 + P_2A^T - P_2C^TR_2^{-1}CP_2 + Q_2, \quad P_2(0) = P_{20}.$$

На основании (7) замкнутый контур регулирования, состоящий из объекта, фильтра и регулятора, для технологической системы круглого шлифования (рисунок 1) описывается обобщенной системой дифференциальных уравнений [14]:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\hat{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -BK_{ij} \\ K_i C & A - BK_{ij} - K_i C \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} y \\ \hat{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} \times w + \begin{bmatrix} 0 \\ RK_i \end{bmatrix} \times v. \quad (11)$$

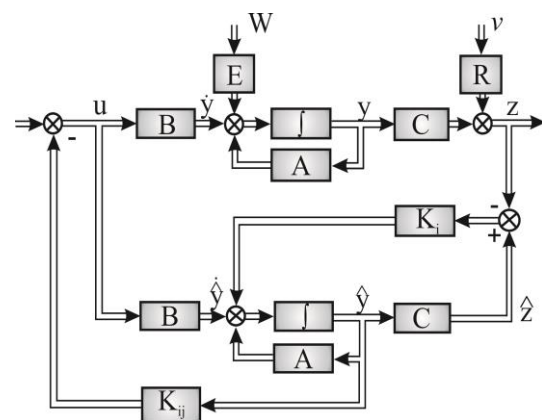


Рис. 1. Структурная схема системы управления процессом шлифования

На основе полученных моделей [15] возможно создание системы автоматического управления технологическими процессами (САУ ТП), применение которой позволит эффективно использовать циклы программного управления без потери стабильности показателей качества изделий при внешних воздействиях на технологическую систему станка.

Список литературы

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1979. – 232 с.
2. Королев В.А. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / В.А. Королев. – Саратов: Изд-во Саратовского университета. 1975. – 192 с.
3. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
4. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Архипов П.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 3-1 (33-1). С. 85-91.
5. Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Методика прогнозирования поврежденности твердого сплава при затачивании инструмента для обработки неметаллических композитов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5. №1-2. С. 78-84.
6. Деруссо П. Пространство состояний в теории управления / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
7. Братан С.М. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник / С.М. Братан, Е.А. Левченко, Н.И. Покинтелица, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 228 с.
8. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских: монография / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 154 с.
9. Братан С.М. Синтез фильтра Калмана-Бьюси для оценивания состояния операции шлифования / С.М. Братан, Д.Е. Сидоров, В.Б. Богущкий // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2015. – с. 87-91.
10. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской/

Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314). – С.88-103.

11. Владецкая Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской / Е.А. Владецкая // Вісник СевНТУ. – Вип.150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – С. 36-40.
12. Брамлер К. Фильтр Калмана-Бьюси. Детерминированные наблюдения и стохастическая фильтрация / К. Брамлер, Г. Зифлинг. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
13. Струтинский В.Б. Тензорные математические модели процессов и систем / В.Б. Струтинский. – Житомир: ЖДТУ, 2005. – 635 с.
14. Bratan S. Modeling of Dynamic Links which Characterize Static Properties of Grinding Wheel and Workpiece during Flat Grinding Process / Sergey Bratan, Ekaterina Vladetskaya // Materials Today: Proceedings 11 (2019) 565–572 Selection and/or Peer-review under responsibility of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2018: Materials Science.
15. Bratan S. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating workshop / Sergey Bratan, Ekaterina Vladetskaya, Aleksander Kharchenko // MATEC Web Conf. Volume 129, 2017. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment.

References

1. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke (Dynamics of the formation of surfaces during abrasive processing) / YU.K. Novoselov. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo universiteta, 1979. – 232 s.
2. Korolev V.A. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke (Study of the processes of formation of the surfaces of the tool and parts during abrasive processing) / V.A. Korolev. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo universiteta. 1975. – 192 s.
3. Korchak S.N. Proizvoditel'nost' protses-sa shlifovaniya stal'nykh detaley (The performance of the process of grinding steel parts) / S.N. Korchak. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 280 s.
4. Lobanov D.V., Ianiushkin A.S., Arkhipov P.V. Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie tverdosplavnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivani / Vektor nauki Tol'iatinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 3-1 (33-1). S. 85-91.
5. Lobanov D.V., Muliukhin N.V. Metodika prognozirovaniia povrezhdennosti tverdogo splava pri zatachivani instrumenta dlia obrabotki nemetallich-

- eskikh kompozitov // Aktual'nye problemy v mashinostroenii. 2018. T. 5. №1-2. S. 78-84.1.
6. Derusso P. Prostranstvo sostoyaniy v teorii upravleniya / P. Derusso, R. Roy, CH. Klouz. – M.: Nauka, 1970. – 620 s.
 7. Bratan S.M. Avtomaticheskoye upravleniye protsessami mekhanicheskoy obrabotki: uchebnik / S.M. Bratan, Ye.A. Levchenko, N.I. Pokintelitsa, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 228 s.
 8. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2018. – 154 s.
 9. Bratan S.M. Sintez fil'tra Kalmana-Byussi dlya otsenivaniya sostoyaniya operatsii shlifovaniya / S.M. Bratan, D.Ye. Sidorov, V.B. Bogutskiy, // Sovremennyye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii.– Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2015. – S. 87-91.
 10. Vladeckaya E.A. Obespecheniye kachestva shlifoval'noj obrabotki putem umen'sheniya vneshnih vozmushhenij v usloviyakh plavuchey masterskoj/ E.A. Vladeckaya, S.M. Bratan, A.O. Harchenko, D.O. Vladeckij // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii.– Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314). – S.88-103.
 11. Vladeckaya E.A. Razrabotka formiruyushchego fil'tra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchey remontnoj masterskoj / E.A. Vladeckaya // Visnik SevNTU. – Vip.150: Mashinopriladobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – S. 36-40.
 12. Bramler K. Fil'tr Kalmana-B'yusi. Determinirovannyye nablyudeniya i stokhasticheskaya fil'tratsiya (Kalman-Bucy Filter. Deterministic observations and stochastic filtration) / K. Bramler, G. Zifling. – M.: Nauka, 1982.– 200 s
 13. Strutinskiy V.B. Tenzornyye matematicheskiye modeli protsessov i system (Tensor mathematical models of processes and systems) / V.B. Strutinskiy. – Zhitomir: ZHDTU, 2005. – 635 s.
 14. Bratan S. Modeling of Dynamic Links which Characterize Static Properties of Grinding Wheel and Workpiece during Flat Grinding Process / Sergey Bratan, Ekaterina Vladetskaya// Materials Today: Proceedings 11 (2019) 565–572 Selection and/or Peer-review under responsibility of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2018: Materials Science.
 15. Bratan S. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating workshop / Sergey Bratan, Ekaterina Vladetskaya, Aleksander Kharchenko // MATEC Web Conf. Vol-ume 129, 2017. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equip-ment.

УДК621.771.23.09

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ТЕРМИЧЕСКИ АРМИРОВАННОГО ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА

А.Б. Максимов¹, И.С. Ерохина¹¹ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Аннотация

Разработана схема термического армирования стального толстолистого проката, обеспечивающая уменьшение длины пути магистральной трещины на 60 – 70 %. Это достигается поворотом трещины на угол до 90°, что позволяет сориентировать ее движение по направляющей трубы. Поворот движущейся трещины осуществляется за счет нанесения упрочненных полос на листе. Определены форма и параметры упрочненных полос. Разработан механизм поворота трещины в термически армированном материале. Предложенное термическое армирование способствует повышению трещиностойкости труб. Рекомендуется использовать предложенное термическое армирование листового проката для изготовления труб большого диаметра.

Ключевые слова: термическое армирование, труба, схема напряженно – деформированного состояния, магистральная трещина, параметры упрочненных полос.

FRACTURE TOUGHNESS OF THERMALLY REINFORCED STEEL PLATES

A.B. Maksimov¹, I.S. Erohcina¹¹"Kerch State Maritime Technological University", Kerch, Russian Federation

Abstract

The scheme of thermal reinforcement of steel plate, which provides a reduction in the length of the main crack path by 60-70 %. This is achieved by turning the crack at an angle of up to 90° and direct its movement along the guide cylinder. The shape and parameters of the hardened strips are determined. The mechanism of crack rotation in thermally reinforced material is developed. The proposed thermal reinforcement increases the crack resistance of pipes. It is recommended to use the proposed thermal reinforcement of sheet metal for the manufacture of large diameter pipes.

Keywords: thermal reinforcement, pipe, scheme of stress – strain state, main crack, parameters of reinforcing strips.

Введение

Материал под действием эксплуатационных нагрузок накапливает повреждения и в конечном итоге разрушается. Способность металла сопротивляться разрушению оценивается трещиностойкостью [1]. Процесс разрушения состоит из двух стадий:

Образование и рост зародышевой трещины до критического размера (способного самостоятельно распространять за счет запасенной упругой энергии).

Распространение трещины по материалу конструкции.

Различные способы повышения трещиностойкости стали заключаются в увеличе-

нии критической длины раскрытия трещины (когда трещина начинает распространяться за счет запасенной упругой энергии) и увеличения работы распространения трещины (это приводит к торможению движения трещины) [2].

Поэтому задача повышения трещиностойкости состоит в том, чтобы минимизировать последствия разрушения конструкции. В реальном металле всегда существуют готовые центры для образования зародышевых трещин, которые под действием эксплуатационных нагрузок достигают критического размера, а затем превращаются в магистральную.

В механике разрушения основными критериями оценки трещиностойкости являют-

ся: критическое значение интенсивности напряжения, критическое напряжение раскрытия берегов трещины, работа, затрачиваемая на образование трещины критического размера [2].

Практическим критерием оценки трещиностойкости является длина разрушенной части конструкции [3]. Повышение работы распространения трещины приводит к уменьшению пути ее распространения по конструкции.

Повышение работы зарождения и распространения трещины достигается легированием стали и термической обработкой листового проката. Однако, применение легирования ограничено ухудшением свариваемости, что является одним из показателей для конструкционных свариваемых сталей. Для хорошо свариваемых сталей углеродный эквивалент, определяемый по формуле ГОСТ 27772-88 должен составлять не более 0,35. Кроме того, легирование стали повышает ее стоимость.

Термическая и термомеханическая обработка проката (закалка с отпуском, различные виды высокотемпературной деформационной обработки) также повышают трещиностойкость стали, но повышают затраты на термообработку.

Перечисленные выше способы повышения трещиностойкости металла позволяют только уменьшить длину разрушенной части, например, газо- и нефтепровода до определенного физически возможного уровня (например, вследствие получения минимально возможного размера дисперсности структуры).

Уменьшение длины разрушенной части трубопровода возможно при управляемом изменении траектории движения трещины.

Известно ряд условий торможения распространяющихся трещин [2]:

- создание условий для ветвления магистральной трещины,
- создание упругих полей сжатия,
- создание макробарьеров на пути трещины.

Целью настоящей работы является повышение трещиностойкости термически армированного толстолистового проката.

Материал и методика исследований

Для исследования использовали модель трубы, изготовленной из листа бумаги размером 200×230 мм с плотностью 160 г/м². Имитацию упрочненных полос проводили нанесением пентафталевых лаков на определенные участки бумаги (рис. 1).

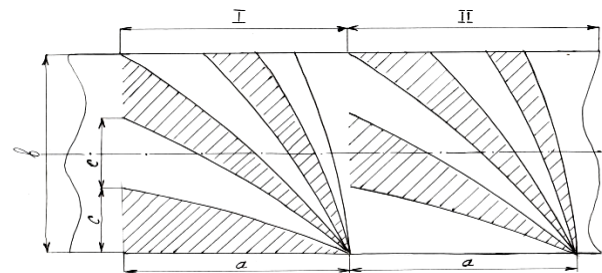


Рис. 1. Схема расположения упрочненных полос на листе: I – первая группа упрочненных полос; II – вторая группа упрочненных полос. Обозначения по тексту.

Это достигается тем, что в отличие от известного технического решения на листовом прокате осуществляют избирательное упрочнение металла в форме полос, ограниченные линиями (рис. 1) в соответствии с уравнением:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{(b - kc)^2} = 1, \quad (1)$$

где b – ширина листа, м; c – ширина упрочненных и неупрочненных полос, м; $k = 1, 2, 3, \dots, N$, где $N = b/c = (6-7)$; a – параметр, определяемый в интервале (0,3 – 0,4) от длины листа, м.

Упрочненные полосы металла чередуются с неупрочненными т. е. с исходной структурой.

Два подготовленных листа бумаги закрепляли в специальных зажимах и между листами вставляли трубу диаметром 120 мм. Захваты закрепляли на разрывной машине FM-500 и прикладывали растягивающую силу. Такая схема обеспечивала в листах бумаги плоское напряженное состояние [6]. Постоянное растягивающее напряжение составляло (0,8 – 0,9) σ_B , где σ_B – предел прочности обработанной лаком бумаги. За-

тем делали надрез вдоль образующей трубы длиной 20 мм с радиусом закругления 0,05 мм. После некоторого времени выдержки (15-20 минут) под постоянной нагрузкой происходило разрушение.

Обсуждение результатов

Суть предлагаемого способа состоит в том, что образовавшаяся магистральная трещина, распространяясь прямолинейно вдоль образующей трубы, попадает, например, в неупрочненную полосу. Впереди движущейся трещины распространяется упругая волна напряжений (акустическая волна). Более прочные микроструктуры имеют наибольшее искаженное кристаллическое строение (больше плотность дислокаций и других несовершенств), чем менее прочные. В более искаженных кристаллических структурах скорость распространения волн напряжений меньше, чем в исходной. Волны, независимо от их природы (акустические, электромагнитные, световые и т. д.) распространяются по направлению наименьшего сопротивления (где их скорость больше) [1].

Вследствие этого большая часть упругой энергии волн напряжений будет распространяться в неупрочненной полосе. При этом трещина, следуя за упругой волной будет отклоняться от своего первоначального направления, при этом траектория ее движения поворачивается на угол α вплоть до 90° (рис. 2).

Если изначально магистральная трещина попадает в упрочненную полосу то, пройдя первую группу полос (без существенного изменения направления, но с меньшей скоростью) она попадает в неупрочненную полосу второй группы полос. Эксперименты показали, что по предложенной схеме термического армирования путь проходимый трещиной составляет 30 – 40 % от длины трещины, в необработанном материале.

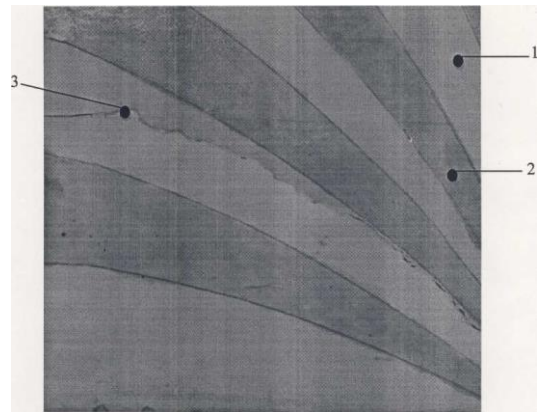


Рис. 2. Фотография фрагмента разрушенной части трубы: 1– неупрочненная полоса, 2– упрочненная полоса, 3– траектория трещины

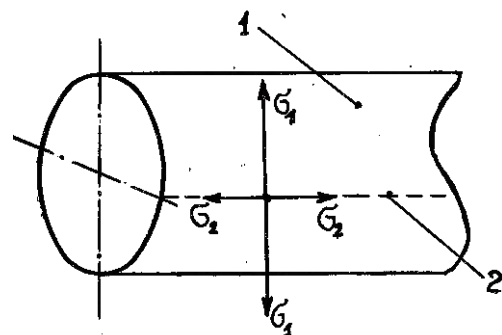


Рис. 3. Схема напряженно – деформированного состояния в стенке трубы: σ_1 – окружное напряжение, σ_2 – продольное напряжение.

Обозначения: 1– фрагмент трубы, 2 – направление образующей трубы.

Трещина всегда раскрывается под действием нормальных напряжений. В стенке тонкой трубы (отношение диаметра трубы к толщине стенки составляет более 20 [5]), находящейся под избыточным внутренним давлением, действует плоское напряженное состояние (рис. 3): σ_1 – окружное напряжение; σ_2 – продольное напряжение, причем $\sigma_1 = 2\sigma_2$.

Так как $\sigma_1 > \sigma_2$, то магистральная трещина будет раскрываться под действием окружных напряжений и в данном случае будет раскрывающим напряжением (σ_p).

Окружное напряжение направлено нормально (перпендикулярно) к образующей трубы, поэтому трещина будет распространяться вдоль образующей трубы

При повороте трещины на произвольный угол α на нее действует в нормальном направлении (n , рис. 4) напряжение раскрытия (σ_p) равное:

$$\sigma_p = \sigma_1 (\cos \alpha + \frac{1}{2} \sin \alpha), \quad (2)$$

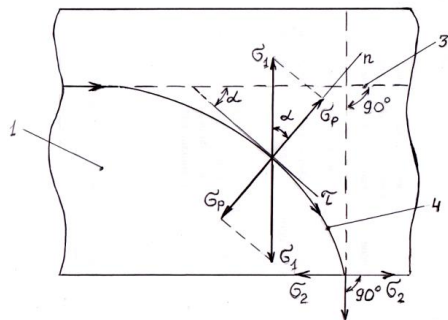


Рис. 4 Схема движения трещины между упрочненными полосами.

Обозначения: 3 – направление траектории трещины без упрочненных полос, 4 – направление траектории трещины между упрочненными полосами. Остальные обозначения на рис. 3 и по тексту.

Анализ уравнения (2) показывает, что величина напряжения раскрытия трещины изменяется от максимального значения равного σ_1 (при $\alpha=0^\circ$) в исходном состоянии до минимального значения равного $0,5 \sigma_1$ при $\alpha=90^\circ$. Т. е. величина напряжения раскрытия трещины изменяется в пределах:

$$0,5 \sigma_1 \leq \sigma_p \leq \sigma_1, \quad (3)$$

или с учетом, что $\sigma_2 = 0,5 \sigma_1$ получим:

$$\sigma_2 \leq \sigma_p \leq \sigma_1, \quad (4)$$

Из опыта эксплуатации труб, находящихся под действием избыточного внутреннего давления известно, что магистральная трещина распространяется вдоль длины трубы, т. е. разрушение идет под действием окружающих напряжений. Поэтому при повороте трещины снижается величина напряжений раскрытия трещины, вследствие чего, трещина затормаживается и останавливается.

Выводы

На основании проведенных исследований предложена форма упрочненных и неупрочненных полос при термическом армировании толстолистового проката для труб большого диаметра. Определены геометрические параметры упрочненных и неупрочненных полос. Такая геометрия полос позволяет изменить движение магистральной трещины на угол до 90° и направить движение трещины по направляющей трубы. Это позволяет уменьшить длину разрушенной части трубы на 60 – 70 %. Предложенное термическое армирование способствует повышению трещиностойкости труб.

Список литературы

1. Лопухин П. И., Физические основы пластической деформации. / П.И. Лопухин, С. С. Горелик. – М: Металлургия, 1982. – 584 с.
2. Финкель В. М. Физика разрушения. / В. М. Финкель. – М.: Металлургия, 1970. – 375 с.
3. Максимов А. Б. Распространение трещин в трубах из неоднородного материала/ А.Б. Максимов А. Б.// Изв. вузов. Черная металлургия. - 2013 №7, - - С. 53 – 56.
4. Максимов А. Б. Способ упрочнения листового проката. Патент на полезную модель Украины № 63929. 2011.Бюл. № 20.
5. Беляев Н.М.Сопrotивление материалов. / Н.М. Беляев. – М.: Изд. Наука, 1976.– 608с.
6. Зорин А.Е., Зорин А.Е. Образец для испытания металла труб при двухосном напряженном состоянии. Патент на полезную модель России №64777. 2007. Бюл. №24.

References

1. Lopuhin P. I., Fizicheskie osnovy plasticheskoy deformacii. / P.I. Lopuhin, S. S. Gorelik. – M: Metallurgiya, 1982. – 584 s.
2. Finkel' V. M. Fizika razrusheniya. / V. M. Fin- kel'. – M.: – :Metallurgiya, 1970. – 375 s.
3. Maksimov A. B. Rasprostranenie treshchin v trubah iz neodnorodnogo materiala/ A.B. Maksimov A. B.// Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. - 2013 №7, - - S. 53 – 56.
4. Maksimov A. B. Sposob uprochneniya listovogo prokata. Patent na poleznuyu model' Ukrainy № 63929. 2011.Byul. № 20.
5. Belyaev N.M.Soprotivlenie materialov. / N.M. Belyaev. – M.: Izd. Nauka, 1976.– 608s.
6. Zorin A.E., Zorin A.E. Obrazec dlya ispytaniya metalla trub pri dvuhosnom napryazhennom sostoyanii. Patent na poleznuyu model' Rossii №64777. 2007. Byul. №24.

УДК 621.791.72

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ТИТАНОВЫХ ШАРОБАЛЛОНОВ

С.В. Ковалев¹, В.И. Кольцов¹, А.И. Портных¹

¹«Воронежский механический завод» – филиал АО «Государственный научно-производственный центр имени М.В. Хруничева», г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Выполнена оценка возможности электронно-лучевой сварки стыковых швов титановых шаробаллонов. Предложена конструкция свариваемых кромок, обеспечивающая рентгенографический контроль соединения. Установлены технологические режимы для формирования плавного обратного валика сварного шва. Получено подтверждение качества соединений механическими испытаниями образцов при температуре 20°C и -196°C. Результаты проведенных работ были использованы при изготовлении титановых шаробаллонов для летательных аппаратов.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, титановые сплавы, свариваемые кромки, рентгенографический контроль.

ELECTRONIC-BEAM WELDING IN THE MANUFACTURE OF SPHERICAL BALLON

S.V. Kovalev¹, V.I. Koltsov¹, A.I. Portnykh¹

¹“Voronezh Mechanichev Plant” – branch of AO “Khrunichev Space Research and Production Space Center”, Voronezh, Russian Federation

Abstract

The grade of possibility of an electron beam welding of butt welds of titanium spherical tanks has been realized. The construction of fusion faces, providing the radiographic analysis of coupling is demonstrated. The technological conditions of the formation of smooth opposite bead of a welded joint have been fixed. The verifying of the quality of coupling of models through the mechanical impacts with the temperature 20°C and -196°C has been gained. The results of performed works were used to make titanium spherical tanks for flying vehicles.

Keywords: electron beam welding, titanium alloys, fusion face, radiographic analysis.

Высокая удельная прочность и коррозионная стойкость титановых сплавов обеспечивает их широкое применение для работы при криогенных температурах в авиационно-космической технике.

При этом имеется и ряд недостатков, присущих титановым сплавам: способность при повышении температуры поглощать газы (O₂, N₂, H₂), рост зерна в металле шва и зоне термического влияния, отрицательное влияние термических циклов на физико-механические характеристики материала.

Наиболее прогрессивным способом соединения материалов, который может нивелировать отрицательные свойства титановых сплавов является электронно-лучевая сварка.

Целью работы является выбор оптимальной конструкции свариваемых кромок

титанового баллона и технологии электронно-лучевой сварки, обеспечивающих заданную конечную геометрию соединения и требуемые механические свойства.

Наиболее традиционным является способ электронно-лучевой сварки в нижнем положении без сквозного проплавления. Для ответственных деталей рекомендуется проводить сварку на подкладном элементе [1, 2].

Сварка выполнялась на установках типа ЭЛУ-8 и ЭЛУ-10 с использованием технологического комплекса ЭЛТА.60.15, оснащенного сварочной пушкой, обеспечивающей ускоряющее напряжение 60 кВ. Установки позволяют выполнять процесс в автоматическом режиме с поддержанием заданных параметров сварки, при возникновении высо-

ковольтного пробоя происходит аварийное закрытие ЭЛП. Остаточное давление в вакуумной камере не выше $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.

Для выполнения кругового сварного шва приварки фланца с полусферой было предложено использовать подкладной элемент в виде кольца с выполненной на наружной поверхности кольцевой канавкой, ограниченной по торцам выступом [3].

Режимы сварки отрабатывались на натуральных образцах со скоростью $7,0 \div 9,0$ мм/сек, с применением круговой развертки электронного луча на частоте 800 Гц и использованием расфокусированного пучка электронов, что должно обеспечить увеличение ширины проплава и компенсировать угловые скорости вращения [4].

По результатам работ оптимальным был выбран режим с расфокусированным лучом, позволивший получить наличие проплава в канавке подкладного элемента, четко определяемого рентгеновским методом. Также наличие канавки позволяет выполнить механическое удаление подкладки без врезания в основной материал (рис. 1).

Выполнение заключительного сварного шва в составе шаробаллона исключает возможность применения подкладного элемента, а требование плотной подгонки стыков (зазор не более 0,1 мм) не позволяет со 100% вероятностью выявлять р/к непровар после сварки.

Принципиальная технология ЭЛС экваториального шва отрабатывалась на плоских образцах сплава ВТ-6С с толщиной от 5,0 мм до 10,0 мм.



Рис. 1. Макрошлиф сварного шва приварки фланца

При подготовке стыкуемых кромок деталей под сварку с наружной стороны выполнен ориентир в виде фаски глубиной

$1,0 \div 1,5$ мм с углом от 10^0 до 12^0 для визуального совмещения электронного луча со свариваемым стыком, а с внутренней стороны каждой детали – уступ, с высотой и шириной равной соответственно $0,1 \div 0,2$ и $0,04 \div 0,08$ от толщин стыка [5].

Сварка выполнялась на скоростях $13 \div 17$ мм/сек расфокусированным лучом, что позволило обеспечить плавное формирование проплава и уменьшить образование сварочных брызг [6].

На полученных образцах выполнен визуальный, ультразвуковой и рентгенографический контроль подтвердивший отсутствие дефектов в сварном соединении. После сварки выполняется термообработка соединений в вакууме (отпуск при температуре 780°C в течение 60 мин.) [7]. Из сварных соединений, прошедших термообработку, были изготовлены образцы и выполнены механические испытания (таблица 1).

Таблица 1. Механические свойства сварного соединения толщиной 5.0 мм из сплава ВТ-6С

Условия испытания	+20°C			-196°C	
Характеристика материала	Предел прочности, σ_b , кгс/см ²	Угол загиба, α , град	Ударная вязкость КУ, кг см/см ²	Предел прочности, σ_b , кгс/см ²	Ударная вязкость КУ, кг см/см ²
Значение по КД	≥ 77	≥ 30	$\geq 3,7$	≥ 115	$\geq 2,5$
Фактические значения	94,5	35	6,8	126	4,3

Положительные результаты проведенных работ были использованы при изготовлении натурального образца шаробаллона.

Дополнительно, перед выполнением заключительного сварного шва, выполнен рентгеноконтроль через 2 стенки прихваченного стыка, показавший четкую черную полосу от индикаторного уступа.

Для подтверждения эффективности индикаторного уступа, сварка одного баллона выполнена с гарантированным смещением электронного луча со стыка на части шва.

Анализ рентгенографических снимков выявил в месте непровара наличие черной полосы от уступа, выполненного с обратной стороны, что однозначно означает наличие непровара. После выполнения сварки титановые шаробаллоны прошли полный объем контроля в соответствии с конструкторской документацией. На окончательном этапе проведено нагружение баллона до разрушения в криогенной среде.

Разрушение баллонов происходит при давлении свыше 500 кг/см², при расчетном 460 кг/см. Сварные соединения были вырезаны для проведения металлографических исследований, показавших отсутствие дефектов в сварных швах и наличие плавного обратного валика в экваториальном шве (рис. 2).



Рис. 2. Макрошлиф экваториальной части сварного шва. Материал ВТ-6С (x5)

Результаты проведенных работ обеспечили получение качественного сварного соединения на титановых сплавах, исключили пропускание непровара при проведении рентгенографического контроля швов и могут быть использованы при изготовлении титановых шаро-баллонов для различных летательных аппаратов.

Список литературы

1. Глазов С.И., Люшинский А.В., Магнитов В.С., Обозков В.В., Чуклинов С.В. Основы технологии электронно-лучевой и диффузионной сварки. // Рыбинск: ОАО «Рыбинский Дом печати», 2001. - 288с.
2. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др.: под редакцией Б.Е. Патона. Электронно-лучевая сварка // Киев: Наукова думка, 1987. - 256с.
3. Алимкина Л.П., Белавин А.И., Кочергин С.А., Кулик В.И. и др. Подкладка для формирования кольцевого сварного шва // Патент на полезную мо-

дель № 157428// Заявка № 2015127447 от 09 июля 2015 г.

4. Шилов Г.А., Акопянц К.С., Касаткин О.Г. Влияние частоты и диаметра круговой развертки электронного луча на проплавление металла при ЭЛС// Автоматическая сварка. 1983, № 8-с.26-28.
5. Портных А.И., Татаринцев А.А., Паничев Е.В., Шуваева Л.П. Способ электронно-лучевой сварки деталей // Патент на изобретение № 2681067// Заявка № 2018101803 от 17.01.18 г.
6. Гребенщиков А.В., Портных А.И., Еремин М.В., Шуваева Л.П. Применение электроннолучевой сварки при изготовлении титановых шаробаллонов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международных научно-технических направлений 22-24 июня 2016 г. – Самара: Самарский университет, 2016 –В24.2.1. – 256с.
7. Коптев И.Т., Омигов Б.И., Портных А.И., Еремин М.В., Шуваева Л.П. Электронно-лучевая сварка стыковых соединений титановых сплавов с обеспечением плавного формирования корневого валика. / Сборник статей VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов центра управления полетами – г. Королев М.О. ЦНИИмаш, 2016 ст. 563-567.

References

1. Glazov S.I., Lushinsky A.V., Magnitov V.S., Obokov V.V., Chuklinov S.V. Osnovy technology electronno-luchevoy i diffusnoy svarki [The basics of technology of electron-beam and diffusive welding.]// Rybinsk OJSC "Rybinsky Dom".
2. Nazarenko O.K., Kaydalov A.A., Kovbasenko S.N. and colleagues.: under the editorship of B.E. Patona. Electronno-luchevaya svarka [Electron-beam welding] // Kyiv:Naukova Dumna, 1987. – 256 p.
3. Alimkina L.P., Belavin A.I., Kochergin S.A., Kulik V.I. and colleagues, Podkladka dlya formirovaniya koltseвого shva [The backing strip for the girth weld formation]// The usefull model patent №157428// The application №2015127447 dd.09.07.15.
4. Shilov G.A., Akop'yanc K.S., Kasatkin O.G. Vliyanie chastity i diametra krugovoy razvertki electronnogo luchya na proplavlenie metalla pri ELS [The impact of frequency and diameter of a circuit sweep of an electron beam on penetration of metal with EBW] Automatic welding. 1983, № 8 -26-28pp.
5. Portnykh A.I., Tatarintsev A.A., Panichev E.V., Shuvaeva L.P., Sposob electronno-luchevoy svarki detaley [The method of an electron-beam welding of details]// The patent of invention № 2681067// Applicaton №2018101803 dd. 17.01.18
6. Grebenschikov A.V., Portnykh A.I., Eremin M.V., Shuvaeva L.P. Primenenie electronnoluchevoy svarki pri izgotovlenii titanovykh sharoballonov

[The appliance of an electron-beam welding during the fabrication of titanium spherical tanks]/Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya: materialy dokladov mezdunarodnykh nauchno-tehnicheskikh napravleniy 22-24 iyunya 2016 [The problems and perspectives of development of engine technology: materials of reports of international scientific and technological courses 22-24 June 2016] – Samara: Samara University, 2016 – B24.2.1. – 256p

7. Koptev I.T., Omigov B.I., Portnykh A.I., Eremin M.V., Shuvaeva L.P. Elektronno-luchevaya svarka stykovykh soedineniy titanovykh splavov s

obespecheniem plavnogo formirovaniya kornevogo valika [The electron-beam welding of coupling joint of titanium alloys with the guarantee of smooth formation of a root bead]/ Sbornik statey VI nucho-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov tsentra upravleniya poletami- g. Korolev M.O. TSNIImash, 2016 563-567 [The collection of articles VI scientific and technological conference of young scientists and specialists of the centre of control of flights – Korolev M.O. Central Research Institute of Machine Building, 2016 563-567 pp].

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №1(13) 2019

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (05.02.07)
- Технология машиностроения (05.02.08)
- Металлургия и материаловедение (05.16.00)

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163

<http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Вестник современных технологий» обязательна.

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.
