

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«Брестский государственный технический университет»

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

**Сборник статей
международной научно-технической конференции, посвященной
55-летию Брестского государственного технического университета**

(Брест, 29–30 сентября 2021 года)

Брест 2021

УДК 681.5; 539.3; 658.51; 621
Н72

Рецензенты:

заведующий лабораторией физики металлов Института технической акустики
НАН Беларуси, доктор технических наук, член- корреспондент НАН Беларуси
Рубаник В. В.

декан механико-технологического факультета Полоцкого государственного
университета, кандидат технических наук, доцент *Дудан А. В.*

Редакционная коллегия:

Онысько С. Р. – декан машиностроительного факультета БрГТУ, к.т.н., доцент.

Прокопеня О. Н. – заведующий кафедрой АТПиП БрГТУ, к.т.н., доцент.

Парфиевич А. Н. – ответственный за ведение научной работы
на машиностроительном факультете БрГТУ;

Монтик С. В. – заведующий кафедрой МЭА БрГТУ, к.т.н., доцент;

Игнатюк В. И. – заведующий кафедрой ПМ БрГТУ, к.т.н., доцент;

Голуб В. М. – заведующий кафедрой машиноведения БрГТУ, к.т.н., доцент.

Н72 Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сборник статей / Брестский государственный технический университет – Брест : Издательство БрГТУ, 2021. – 236 с.

ISBN 978-985-493-530-0

В статьях конференции в обобщенном виде приведены результаты исследований в области диагностики и эксплуатации машин и станочного оборудования, конструирования, производства, автоматизации производственных процессов, современных технологий обработки материалов. Значительная часть материалов посвящена методам и результатам исследований физических процессов в материалах при их обработке.

Статьи представлены по тематике докладов Международной научно технической конференции «Новые технологии и материалы, автоматизация производства», 29–30 сентября 2021 г.

Сборник предназначен для специалистов, работающих в сфере машиностроения, автосервиса, управления технологическими процессами и автоматизации. Он также представляет интерес для научных сотрудников, аспирантов, магистрантов и студентов соответствующих специальностей.

УДК 681.5; 539.3; 658.51; 621

ISBN 978-985-493-530-0

© Издательство БрГТУ, 2021

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ
СИСТЕМАМИ, АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА, ПРОМЫШЛЕННАЯ
РОБОТОТЕХНИКА**

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУШИТЕЛЕЙ ШУМА ВЫХЛОПА СИСТЕМ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ

Заика А. В., Иголкин А. А., Илюхин В. Н.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» (Самарский университет), г. Самара, РФ

В век стремительного развития технологий прогресс направлен на непрерывное увеличение мощности технологического оборудования. Последствиями улучшений технических характеристик является уровень шума, выходящий за пределы санитарных норм. Регулярное нахождение работников в подобных условиях влечёт за собой ряд заболеваний, в частности нервной системы. Чтобы избежать подобных негативных последствий, на предприятиях принимаются меры по защите персонала от повышенного звукового давления. Для снижения шума выхлопа используют специальные глушители, которые устанавливаются в выхлопные отверстия распределителей.

Испытание различных глушителей. Выбор того или иного типа глушителей определяется необходимым уровнем снижения шума, его спектром и другими условиями.

В данном эксперименте рассматривались серийные глушители Camozzi (рис.1):

- из пористого полиэтилена – Серия 2838;
- из спечённой бронзы - Серия 2931 и 2921;
- с сетчатой структурой - Серия 2901-17, 2901-22.



Рисунок 1– Внешний вид глушителей

Результаты измерений уровней звукового давления (УЗД), дБ, для различных глушителей Camozzi в диапазоне октавных полос частот от 31,5 Гц до 16 кГц, а также соответствующих уровней звука (УЗ), дБА приведены на рис. 1.

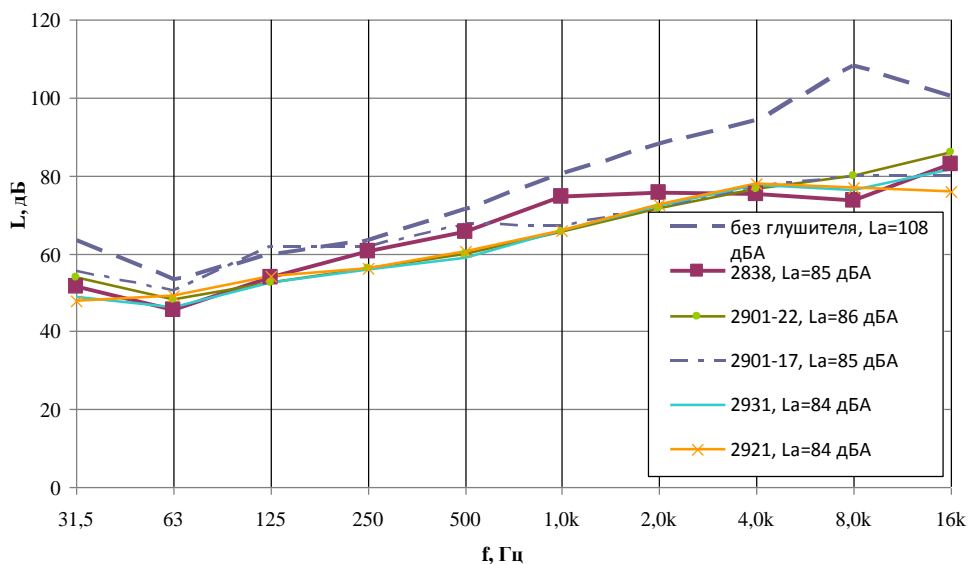


Рисунок 2 – Спектры шума выхлопа из распределителя

Из анализа зависимостей, представленных на рисунке? видно, что все глушители обладают хорошей акустической эффективностью. Эффективность с учётом частотной коррекцией А – более 20 дБА у всех образцов.

При этом человеческое ухо наиболее чувствительно к звукам в частотном диапазоне от 1000 до 8000 Гц. Именно поэтому ГОСТ 25144 – 82 «Пневмоглушители. Технические условия» требует измерения октавных уровней звукового давления в этом диапазоне частот. Таким образом, при анализе изменения октавных уровней звукового давления, из всего перечня явно выделяется полиэтиленовый глушитель Samozzi модель 2838, у которого эффективность на частотах 1000 и 2000 Гц немного хуже остальных. При этом на частотах 4000 и 8000 Гц он показывает более низкий уровень шума.

Исследование на быстродействие системы. Далее исследуем влияние установки глушителя шума на быстродействие пневмосистемы. Для соответствия пневмоглушителя ГОСТ 25144 – 82 требуется, чтобы время падения давления в пневмоёмкости с глушителем удовлетворяло условию:

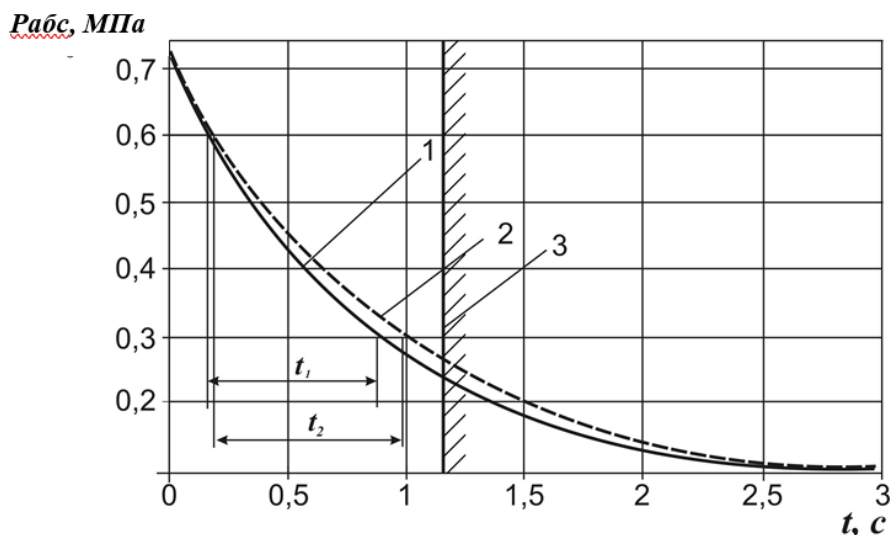
$$t_2 \leq 1,4 t_1, \quad (1)$$

где t_2 – время падения давления при выхлопе с глушителем, с;

t_1 – время падения давления при выхлопе без глушителя, с.

На стадии проектирования пневмоглушителя важно расчётными методами определить основные геометрические размеры таким образом, чтобы выполнялось условие (1). На рисунке 3 представлен пример переходного процесса изменения давления в пневмоёмкости (ресивере) при выхлопе. Установка глушителя шума приведет к увеличению времени падения давления. Однако, процесс не должен выходить за установленные ограничения (линия 3).

Пропускная способность K_v проверялась методом измерения времени Δt падения давления (абсолютного) в пневмоёмкости от $p_1 = 0,6$ МПа до $p_2 = 0,3$ МПа. Начальное абсолютное давление в ресивере равнялось 0,73 МПа.



1 - без глушителя; 2 - с глушителем; 3 - линия ограничения
 Рисунок 3 – Пример переходного процесса в пневмосистеме при выхлопе через отверстие пневмораспределителя:

Для дальнейших испытаний был выбран глушитель Samozzi модель 2838. Испытания проводились на экспериментальном стенде, соответствующем ГОСТ 25144 – 82 Пневмоглушители. На рисунке 4 показаны примеры переходных процессов изменения давления в ресивере при выхлопе сжатого воздуха из него с начальным абсолютным давлением 0,73 МПа (без трубопровода).

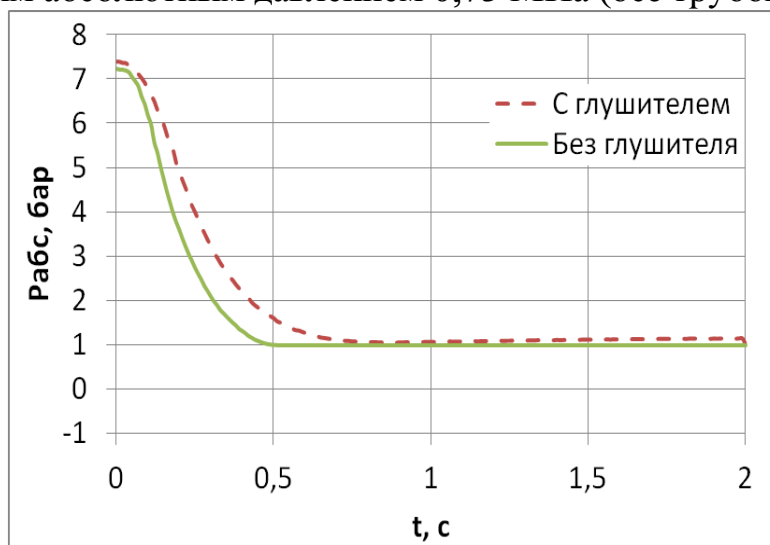


Рисунок 4 – Падение давления в ресивере

Из анализа графиков на рисунке 4 видно, что установка выбранного глушителя приводит к снижению пропускной способности пневмосистемы. Однако, применительно к пневмоприводу, установка глушителей шума на выхлопе распределителя редко снижает производительность пневмоцилиндра, т. к. сопротивление, создаваемое дросселем на выхлопе, обычно существенно выше сопротивления глушителя и именно является доминирующим в настройке скорости цилиндра. Но в высокопроизводительных машинах с пневмоприводом, где дроссели отсутствуют, при выборе глушителей шума необходимо учитывать не только снижение уровня шума до принятых норм, но и пропускную способность последнего.

В таблице 1 представлены усредненные по трём испытаниям уровни звука и время падения давления в ресивере при выхлопе с глушителем и без него.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики

Наименование	L_a , дБА	$P_{вх}$ абс, МПа	Длина трубопровода, м	$\bar{t} = t/t_1$
Без глушителя	108,5	0,73	1	1
С глушителем	85	0,73	1	1,11

Таким образом, экспериментальным путём исследованы акустические характеристики 4-х моделей глушителей шума. Акустическая эффективность глушителей шума с учётом частотной коррекцией A – более 20 дБА у всех образцов, что является хорошим показателем. При анализе октавных уровней звукового давления, из всего перечня образцов явно выделяется полиэтиленовый глушитель Samozzi серия 2838, который на частотах 4000 и 8000 Гц показывает более низкий уровень шума, по сравнению с другими моделями.

Также проанализировано влияние установки глушителя на быстродействие пневмосистемы. Пропускную способность K_v контролировали измерением времени Δt падения давления (абсолютного) в пневмоёмкости от $p_1 = 0,6$ МПа до $p_2 = 0,3$ МПа. Начальное абсолютное давление в ресивере составляло 0,73 МПа.

Установка глушителя шума 2921-1/4 привело к увеличению времени падения давления на 11 %, что не превышает 40 % требуемых ГОСТ 25144 – 82.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сейфетдинов, Р. Б. Влияние установки пневмоглушителя на быстродействие пневмосистемы / Р. Б. Сейфетдинов [и др.] // Гидропневмоавтоматика и гидропривод – 2005: Сборник научных трудов: В 2 т. – Ковров: КГТА, 2006. – Т.2. – С. 20–34.
2. Иголкин, А. А. Выбор параметров пневмоглушителей / А. А. Иголкин [и др.] // Известия СНЦ РАН. Специальный выпуск «ELPIT-2007» – Самара, Издательство СНЦ: РАН, 2007. – Т. 2. – С. 82– 88.
3. Пневмоглушители. Технические условия: ГОСТ 25144 –82.
4. Иголкин, А. А. Математическая модель глушителя шума выхлопа пневмосистем / А. А. Иголкин [и др.] // Известия СНЦ РАН №2, Самара: Издательство СНЦ РАН, 2004. – Т. 6 – С. 364– 368.
5. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий: ГОСТ 23337-2014 ШУМ.

УДК 621.865.8

МЕХАТРОННЫЕ МОДУЛИ И МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Кокудович Д. В.¹, Прокопеня О. Н.¹

1) Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Мехатроника – это область науки, основанная на объединении узлов точной механики с электронными компонентами. Такое объединение позволяет создавать модули и машины с более качественными характеристиками, которые в

дальнейшем ориентированы на автоматизацию сложных технологических процессов и операций. Мехатронные модули находят все большее применение в различных отраслях [1–3].

Стоит отметить, что мехатронные системы построены по методу синергетического объединения, которое предполагает не простое соединение частей посредством интерфейсных блоков, но их конструктивное объединение в одном модуле. Синергетическая интеграция элементов при проектировании мехатронных модулей основана на трех базовых принципах:

- реализация заданных функциональных преобразований минимально возможным числом структурных и конструктивных блоков путем объединения двух и более элементов в единые многофункциональные модули;
- выбор интерфейсов в качестве локальных точек интеграции и исключение избыточных структурных блоков и интерфейсов как сепаратных элементов;
- перераспределение функциональной нагрузки в мехатронной системе от аппаратных блоков к интеллектуальным (электронным и компьютерным) компонентам.

Модуль мехатронной системы выделяется как функциональная часть машины, являясь при этом самостоятельным изделием с точки зрения конструктивного исполнения и оформления. Так, в соответствии с признаком синергетического объединения мехатронные модули можно разделить по уровням.

Мехатронные модули первого уровня представляют собой объединение только двух исходных элементов. Типичным примером модуля первого поколения может служить «мотор-редуктор», где механический редуктор и управляемый двигатель выпускаются как единый функциональный элемент. Мехатронные системы на основе этих модулей нашли широкое применение при создании различных средств комплексной автоматизации производства (конвейеров, транспортеров, поворотных столов, вспомогательных манипуляторов).

В мотор-редукторах в качестве электродвигателей наиболее часто используют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и регулируемым преобразователем частоты вращения вала, однофазные двигатели и двигатели постоянного тока. В качестве преобразователей движения применяются зубчатые цилиндрические и конические, червячные, планетарные, волновые и винтовые передачи. Для защиты от действия внезапных перегрузок устанавливают ограничители вращающего момента.

Наиболее простым в управлении является двигатель постоянного тока, так как при постоянном значении магнитного потока регулирование момента производят только изменением величины тока.

Модуль на основе синхронного двигателя состоит из синхронной электрической машины, датчика положения ротора и электронного устройства управления.

Управление синхронным двигателем сложнее, поскольку при фиксированном значении магнитного потока, кроме регулирования величины тока, необходимо также регулировать величину пространственного угла, добиваясь получения требуемого значения момента.

Наиболее сложным в управлении является асинхронный двигатель. Управление им требует регулирования тока статора при поддержании постоянства магнитного потока и пространственного угла для получения максимального значения развиваемого момента.

По большинству других характеристик, и прежде всего по массогабаритным показателям, двигатели переменного тока превосходят двигатели постоянного тока.

Мехатронные модули второго уровня появились в связи с развитием новых электронных технологий, которые позволили создать миниатюрные датчики и электронные блоки для обработки их сигналов. Объединение приводных модулей с указанными элементами привело к появлению мехатронных модулей движения, когда достигнута интеграция трех устройств различной физической природы: механических, электротехнических и электронных. На базе мехатронных модулей данного класса созданы управляемые энергетические машины, станки и промышленные роботы с числовым программным управлением.

Преимуществами данных модулей являются: высокая точность реализации исполнительных движений; надежность, долговечность; возможность работы при наличии различных видов возмущений и в широком диапазоне температур окружающей среды; значительно меньшие массогабаритные показатели по сравнению с обычным электроприводом.

Развитие третьего поколения мехатронных систем обусловлено появлением микропроцессоров и контроллеров на их базе и направлено на интеллектуализацию всех процессов, протекающих в мехатронной системе, в первую очередь – процесса управления функциональными движениями машин и агрегатов.

Компьютерное управление оказывается весьма эффективным при построении многокоординатных нелинейных мехатронных систем. В этом случае вычислительная машина анализирует данные о состоянии всех компонентов и внешних воздействиях, производит вычисления и формирует управляющие воздействия на исполнительные компоненты системы с учётом особенностей её математической модели. В результате достигается высокое качество управления согласованным многокоординатным движением, например, рабочего органа мехатронной технологической машины или мобильного робота.

Особую роль в мехатронике играет интеллектуальное управление, которое является более высокой ступенью развития компьютерного управления и реализует различные технологии искусственного интеллекта. Наиболее эффективными технологиями интеллектуального управления в мехатронике являются технологии нечёткой логики, искусственных нейронных сетей и экспертных систем.

Применение интеллектуального управления даёт возможность обеспечить высокую эффективность функционирования мехатронных систем при отсутствии подробной математической модели объекта управления, при действии различных неопределённых факторов и при опасности возникновения непредвиденных ситуаций в работе системы.

Выбор варианта привода (двигателя и преобразователя движения) мехатронного модуля может быть осуществлен неоднозначно, поэтому при его конструировании следует стремиться к оптимальному решению. Необходимо выбрать

критерий оценки качества варианта. Оптимальным считается тот, которому соответствует экстремальное значение критерия.

В инженерной практике в качестве критериев оптимизации применяют различные показатели:

- время перемещения выходного звена на заданное расстояние;
- время согласования скорости выходного звена с заданным значением;
- минимизация массы и габаритов мехатронного модуля;
- энергопотребление мехатронного модуля при выполнении типовых движений.

Выбор кинематической структуры является важнейшей задачей при концептуальном проектировании машин нового поколения. Эффективность её решения во многом определяет главные технические характеристики системы, её динамические, скоростные и точностные параметры.

Развитие концепции мехатронно-модульного построения сложных электро-механических систем различной конструкции и назначения предполагает комплексное решение целого ряда важнейших проблем. К их числу в первую очередь следует отнести разработку быстродействующих алгоритмов управления, обеспечивающих инвариантность к различного рода возмущениям (что особенно важно для прецизионных систем), принципов динамической развязки быстродействующих приводов с учетом компенсации взаимного влияния отдельных степеней подвижности, алгоритмов управления движением, инвариантных к типу кинематической схемы многозвенного мехатронно-модульного механизма, а также универсальных средств программирования, обеспечивающих возможность постановки прикладных задач на уровне описаний конечных технологических целей.

Одновременно идет разработка новых принципов и технологий изготовления высокоточных и компактных механических узлов, а также новых типов электродвигателей (в первую очередь, высокомоментных, бесколлекторных и линейных), датчиков обратной связи и информации. Синтез новых прецизионных, информационных и измерительных технологий дает основу для проектирования и производства интеллектуальных мехатронных модулей и систем.

При создании транспортирующего и накопительного оборудования одной из основных задач является обеспечение заданной точности позиционирования при малой длительности цикла работы механизмов, что может быть обеспечено за счет высоких точностных характеристик и быстродействия приводов. При решении данной задачи посредством мехатронных модулей в качестве критерия оптимизации было выбрано максимальное угловое ускорение ε_{MAX} выходного звена, которое обеспечивается при оптимальном передаточном отношении преобразователя движения:

$$U_{OPT} = \frac{T_H}{\eta \cdot T_{д.МАХ}} + \sqrt{\left(\frac{T_H}{\eta \cdot T_{д.МАХ}}\right)^2 + \frac{J_H}{J_{д.ПД}}}$$

где J_H – момент инерции объекта управления, кг·м²;

$T_{д.МАХ}$ – максимальный момент двигателя (задается в стандартах);

T_H – момент сопротивления на выходном звене;

$J_{д.ПД}$ – момент инерции ротора двигателя и приведенный к валу двигателя момент инерции преобразователя движения;

принимается $J_{д.ПД} \approx (1,1...1,3)J_d$

J_d – момент инерции ротора двигателя.

Требуемый максимальный момент двигателя

$$T_{д.ТР.МАХ} = \frac{2}{\eta} \sqrt{J_{д.ПД} \cdot \varepsilon_{МАХ} (J_H \cdot \varepsilon_{МАХ} + T_H)}$$

Для выбора типа электродвигателя необходимо выполнение условия

$$T_{д.МАХ} \geq T_{д.ТР.МАХ}$$

Если данное условие не выполняется, выбирается двигатель с большим максимальным вращающим моментом.

Для выбранного привода с оптимальным передаточным отношением необходимо выполнение условия

$$\frac{\omega_{НОМ}}{U_{ОПТ}} \geq \omega_{ВЫХ}$$

где $\omega_{НОМ}$ – номинальная скорость вращения вала двигателя.

При невыполнении условия выбирается двигатель с большими скоростными возможностями и проводится перерасчет мехатронного модуля.

В проектируемом оборудовании были применены электроцилиндр компании Festo ESBF-BS-32-300-10P в связке с серводвигателем Festo EMME-AS-40-S-LV-AMB. Данные устройства фактически представляют собой мехатронные модули.



Рисунок 1 – Электро-цилиндр Festo ESBF-BS-32-300-10P



Рисунок 2 – Серводвигатель Festo EMME-AS-40-S-LV-AMB

Приведённый выше цилиндр имеет шарико-винтовую передачу с направляющей на плоских подшипниках и используется в промышленных системах, где требуется большая производительность и высокие значения усилия подачи на небольшом монтажном пространстве.

Синхронный серводвигатель с возбуждением от постоянных магнитов применяется для решения динамических задач позиционирования, в том числе многокоординатного перемещения по сложному контуру.

Данная мехатронная система под управлением контроллера Festo CMMR-AS-C2-3A-M3 хорошо подходит для решения задач высокودинамичного позиционирования. Это оборудование было использовано для реализации накопителей продукта, на установке агрегации, разбиения на потоки и упаковки сыров, выполняя смещение накопителя при поступлении каждой новой единицы продукта, формируя тем самым стопку упаковок и заталкивания, в последующем, этой стопки в короб.

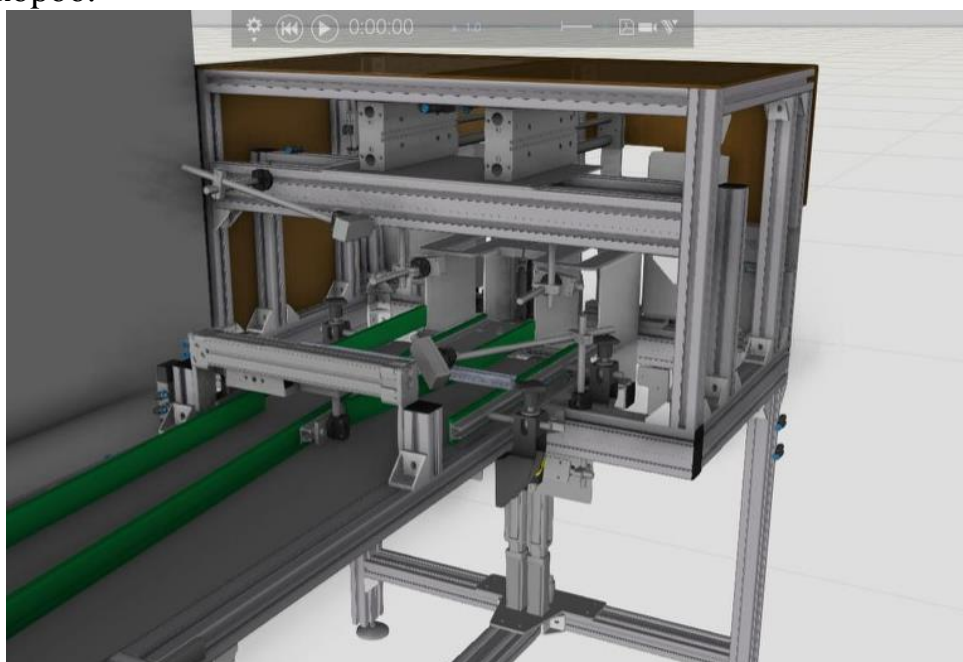


Рисунок 3 – Фрагмент установки

Применение указанных модулей позволило обеспечить заданную точность позиционирования при высокой производительности. Тем самым на практике подтверждена эффективность использования мехатронных модулей при создании указанного класса оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рассудов, Л. Н. Системы на кристалле: Новые возможности управления сервоприводом. / Л. Н. Рассудов, А. П. Балковой // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014, – Саранск, 07–09 октября 2014 г. – Саранск, 2014. – Т.1 стр. 38–43.
2. Мехатроника, автоматизация, управление = Mechatronics, automation, control: первая Всероссий. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Рос. Федерация, г. Владимир, Владим. гос. ун-т, 28–30 июня 2004 г.: труды / В. Ф. Коростелев, Н. Б. Филимонов. – М. : Новые технологии, 2004. – 508 с.
3. Игнатъев, Н. П. Обеспечение точности при проектировании приводов и механизмов: справочно-методическое пособие / Н. П. Игнатъев. – Азов: АзовПечать, 2012. – 110 с.

УДК 543.27.8

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ, НА ОСНОВЕ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Олиферович Н. М., Анкуда М. А., Карпович Д. С.

Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Измерители концентрации, принцип действия которых основан на взаимодействии оксидов металлов с анализируемыми газами, весьма перспективны для анализа количественного и качественного состава газов в различных отраслях промышленности. В данных газоанализаторах используется свойство избирательной чувствительности некоторых оксидов при различных температурах, что, в свою очередь, позволяет осуществлять комплексный анализ многокомпонентных газовых смесей. Однако необходимо учитывать особенности поведения чувствительного элемента, его электрические свойства, которые могут быть задействованы в качестве исходных данных для проведения анализа газовых смесей [1].

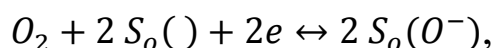
В полупроводниковых газоанализаторах используется эффект изменения электрического сопротивления некоторых полупроводниковых материалов (поверхностей монокристаллов, пленок), возникающего вследствие адсорбции газа. Структурную схему сенсора можно представить на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема полупроводникового сенсора

В основе работы полупроводниковых сенсоров на оксидных пленках лежит изменение проводимости чувствительного слоя полупроводника, которых наносят на какое-либо основание. Известно, что чувствительность датчика к конкретному газу зависит от материалов, легирующих полупроводник, и от его температуры. По этой причине существующие газоанализаторы полупроводникового типа снабжают системой подогрева для повышения их чувствительности к газовому компоненту.

Основной теорией, объясняющей процессы, происходящие на поверхности полупроводника, является теория мономолекулярной адсорбции Ленгмюра. Согласно этой теории в воздушной среде на поверхностных центрах полупроводника может адсорбироваться кислород в молекулярной или атомарной форме как акцептор электронов, из рабочей зоны поверхности полупроводника, в результате чего поверхность приобретает отрицательный заряд. Данное явление можно описать выражением:



где: O_2 – молекула кислорода в воздушной среде; $S_o()$ – свободный поверхностный центр адсорбции кислорода; $S_o(O^-)$ – адсорбированный атом кислорода; e – электрон поверхностного слоя.

В приповерхностном слое концентрация свободных носителей заряда уменьшается.

При появлении исследуемого газа на поверхности сенсора будет происходить процесс его окисления с последующим выделением электронов в обедненный поверхностный слой, что приведет к повышению его проводимости.

Адсорбционные свойства исследуемых газов зависят от температуры поверхностного слоя датчика, которая будет уникальной для различных соединений. В таблице приведен перечень материалов, используемых для анализа различных компонентов детектируемого газа [2].

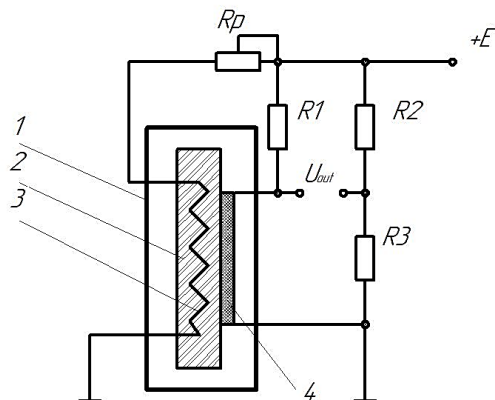
Таблица - Твердотельные датчики газа для обнаружения газов окружающей среды

Детектируемый газ	Тип датчика	Материал сенсора
SO_2	Полупроводниковый	Ceramic SnO_2 , CeO_2 , легированный $-WO_3$
	Твердый электролит	Сульфаты щелочных металлов, $Ag-\beta''$ – оксид алюминия, $Na-\beta$ – оксид алюминия, NASICON ($Na_2Zr_2Si_3PO_{12}$), MgO – стабилизированный, твердые электролиты на основе сульфатов
CO_2	Полупроводниковый	Легированный $-SnO_2$ и In_2O_3
	Твердый электролит	K_2CO_3 , NASICON/ Na_2CO_3 , NASICON/ $Na_2CO_3-BaCO_3$, NASICON/ $Li_2CO_3-CaCO_3$, NASICON/ $NdCoO_3$
	Емкостной	$BaTiO_3-PbO$, $NiO-BaTiO_3$, $PbO-BaTiO_3$, $Y_2O_3-BaTiO_3$, $CuO-BaTiO_3$, как $CeO-BaCO_3/CuO$
CO	Полупроводниковый	Легированный $-In_2O_3$, SnO_2 , и ZnO
NO_2	Полупроводниковый	Легированный (Pd , Au , Cd)- SnO_2 , In_2O_3 , легированный (Pd , Pt , Au)- WO_3 , TiO_2-WO_3 , SiO_2-WO_3 , $Sn-W-O$ system, $Al_2O_3-V_2O_5$, $NiO-CuO$
	Твердый электролит	$Ba(NO_3)_2$, $Na-\beta/\beta''$ - оксид алюминия/ $NaNO_3$, $Na-\beta/\beta''$ - оксид алюминия/ $Ba(NO_3)_2$, NASICON/ $NaNO_2+Li_2CO_3$, $Y_2O_3-ZrO_2/CdCr_2O_4$, NASICON/ оксид пирохлора
	Емкостной	$Ba(NO_3)_2$, $Na-\beta/\beta''$ - оксид алюминия / $NaNO_3$, $Na-\beta/\beta''$ – оксид алюминия/ $Ba(NO_3)_2$, NASICON/ $NaNO_2+Li_2CO_3$, $Y_2O_3-ZrO_2/CdCr_2O_4$, NASICON/ оксид пирохлора
NO	Полупроводниковый	$In_2O_3-SnO_2$, WO_3 , $Bi_2O_3-WO_3$, легированный (Pd , Pt , Au)- WO_3
	Твердый электролит	$Y_2O_3-ZrO_2/CdCr_2O_4$, NASICON/ $NaNO_2$
	Емкостной	$SrSnO_3-WO_3$
O_3	Полупроводниковый	$SiO_2-CeO_2-In_2O_3$, $Fe_2O_3-In_2O_3$, WO_3 , $ZnIn_2O_5-MgIn_2O_4$

Для обнаружения газов наиболее приемлемым из представленных в таблице на сегодняшний день является диоксид олова SnO_2 с различными легирующими добавками. Подбором легирующих добавок и рабочей температуры можно достичь повышения чувствительности сенсора.

Таким образом, полупроводниковый газоанализатор должен содержать поверхностный слой с определенным легированным составом и систему подогрева датчика. В общем случае полупроводниковый газоанализатор можно представить в виде следующей схемы (рисунок 2).

От источника напряжения $+E$ происходит нагрев с помощью спирали 3 керамической подложки 2 и полупроводника 4. Температуру нагрева датчика можно устанавливать с помощью регулируемого резистора R_p . По краям легированного полупроводника, проводимость которого будет меняться под действием исследуемого продуваемого газа, размещают два электрода. В результате между электродами возникает некоторое параметрическое сопротивление R_∂ . Сопротивление R_∂ вместе с R_1, R_2, R_3 образует мостовую схему, которое позволяет переводить изменение сопротивления датчика в электрический сигнал U_{out} .



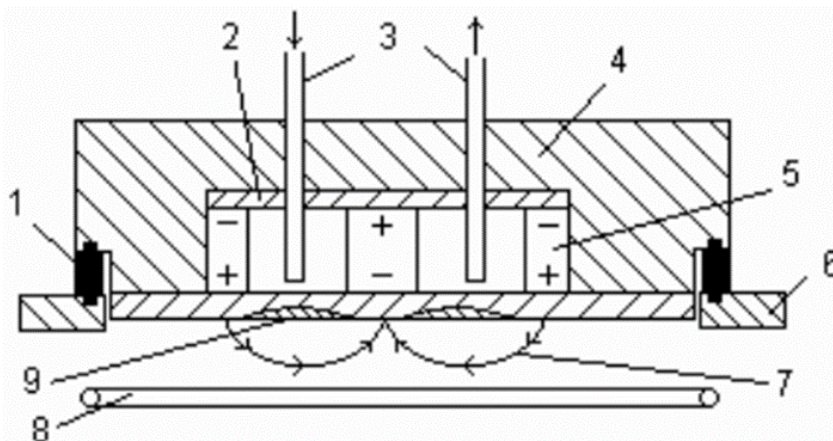
1 – корпус чувствительного элемента; 2 – подложка керамическая;
3 – спираль нагрева; 4 – полупроводник

Рисунок 2 – Электрическая схема газоанализатора полупроводникового типа

Для обнаружения различных газов можно создавать матрицу полупроводниковых ячеек с различным легированием под различные газовые компоненты. Поскольку на чувствительность полупроводниковых поверхностей могут одновременно влиять различные газовые компоненты, то имеет смысл создавать некоторую систему управления выбора ячеек сенсорной матрицы, переключение между элементами которой позволит создавать датчики многокомпонентных газовых смесей.

Для нанесения слоя полупроводника предполагается использовать метод магнетронного распыления [3]. В основе метода лежит катодное распыление мишени в плазме магнетронного разряда. Мишень является источником распыляемого материала и выполняет функцию катода. В результате столкновения электронов с молекулами инертного газа (аргона) в камере над поверхностью катода образуется плазма. Положительные ионы аргона, образующиеся в плазме, ускоряются в направлении катода-мишени и бомбардируют его поверхность, выбивая из неё частицы материала. Выбитые с поверхности мишени частицы осаждаются

на поверхности подложки. Схема установки магнетронного распыления представлена на рисунке 3.



1 – изолятор; 2 – магнитопровод; 3 – система водоохлаждения; 4 – корпус катодного узла; 5 – постоянный магнит; 6 – стенка вакуумной камеры; 7 – силовые линии магнитного поля; 8 – кольцевой водоохлаждаемый анод; 9 – зона эрозии распыляемого катода

Рисунок 3 – Установка магнетронного распыления

К преимуществам магнетронного распыления относят:

- высокая скорость распыления при низких рабочих напряжениях (600-800 В) и при небольших давлениях рабочего газа ($5 \cdot 10^{-1}$ -10 Па);
- отсутствие перегрева подложки;
- малая степень загрязнения пленок;
- возможность получения равномерных по толщине пленок на большей площади подложек.

Таким образом, при создании газоанализаторов первой задачей будет создание полупроводниковых ячеек с различным легированным составом под конкретные газовые составляющие. Второй задачей видится создание системы управления, которая обеспечит необходимый температурный режим для каждой газовой составляющей и переключение между ячейками матрицы полупроводникового сенсора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Михайлов, В. Б. Прогнозирование надежности пленочных газовых сенсоров при работе с превышением ПДК / В. Б. Михайлов [и др.] // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БГТУ, 2018. – С. 19–21.
2. Sensors for chemical and biological applications / ed. by M.K.Ram, V.R.Bhethanabotla. - Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2010. - xi, 378 p.: ill. – Bibliogr. at the end of the chapters. – Ind.: p.371–378. – ISBN 978-0-8493-3366-8.
3. McAleer J.F., Moseley P.T. Tin dioxide gas sensors. // J. Chem. Soc. Faraday Trans. – 1987. – V. 83. – P.1323 – 1346.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ШАГОВОГО КОНВЕЙЕРА

Сааков А. В.¹, Прокопеня О. Н.¹, Вабищевич Л. И.¹

1) Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

В настоящее время шаговые конвейеры широко применяются в автоматических системах на производстве различного рода продуктов. Шаговый конвейер – это транспортирующее устройство, предназначенное для циклического перемещения объектов технологического процесса (продукта) на один шаг через определенные промежутки времени. В зависимости от габаритов и массы перемещаемых объектов и условий эксплуатации, шаговые конвейеры могут быть реализованы на гидромеханическом, пневмомеханическом или электромеханическом приводе. Чаще всего их можно встретить в качестве транспортного и накопительного узла на базе электромеханического привода в высокопроизводительных автоматах. За счет своей циклической работы они позволяют оптимизировать время работы конвейера. Шаговые конвейеры также решают проблему с позиционированием объекта при перемещении его между позициями автоматической линии [1–3].

Специфический цикл работы шагового конвейера предусматривает конструкцию, отличающуюся от конструкции конвейеров непрерывного действия. Рабочую зону разделяют на равные секции, размер которых соответствует шагу конвейера. Для того чтобы объекты в секциях были зафиксированы, между секциями устанавливают специальные ограничители, конструкция которых зависит от особенностей объекта, перемещаемого по шаговому конвейеру. Они не позволяют объекту перемещаться за пределы своей секции.

При проектировании системы управления шаговым конвейером необходимо учитывать особенности его конструкции, которые определяют тип привода. Далее будет рассмотрен наиболее часто применяемый шаговый конвейер, выполненный на базе асинхронного двигателя с использованием частотного преобразователя.

Существует несколько основных проблем, которые возникают при проектировании системы управления шаговым конвейером на базе асинхронного двигателя:

1. Невозможность обеспечить кратность рабочей зоны (ленты) шагу конвейера.
2. Высокие требования к динамическим характеристикам привода.

Невозможность обеспечить кратность рабочей зоны конвейера, при движении конвейера только в одну сторону, приводит к возникновению нарастающего смещения положения секции, что может стать причиной нарушения работы автоматической системы. Это связано с конструктивными особенностями реализации шагового конвейера. При использовании сплошной зубчатой ленты, изготовленной из синтетических материалов, кратность нарушается при растяжении ленты во время её натяжения на барабанах. При использовании модульной

ленты сложно подобрать необходимое количество модулей, для получения длины, которая будет кратна шагу. Даже относительно небольшие отклонения от кратности могут привести к существенному смещению положения секции. Для примера возьмем ленту, отклонение длины которой не превышает 0,1 мм от заданной с длиной секции 80 мм. Если построить график зависимости смещения секции от количества полных оборотов ленты конвейера (рис.1), то можно увидеть, что всего за 800 полных оборотов, смещение секции достигнет 80 мм и будет равно шагу конвейера.

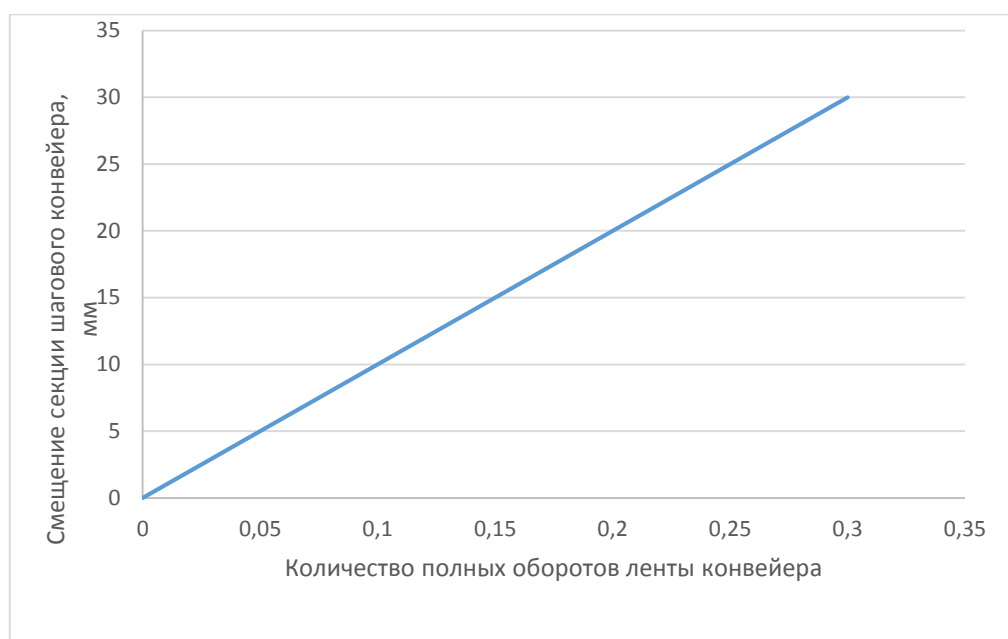


Рисунок 1 – Смещение секции шагового конвейера в зависимости о количества полных оборотов ленты

Всё это исключает возможность использования энкодеров при построении системы управления шаговым конвейером. Для того чтобы система работала надлежащим образом, необходимо точно отслеживать начало и конец секции на конвейере, что реализуется с помощью дискретного датчика положения (индуктивный, диффузного отражения, механический датчик положения и т. д.), который может точно определить границу между секциями. Датчик крепится на неподвижной части конвейера и является ограничителем, разделяющим секции, чтобы вовремя остановить конвейер. Однако это можно обеспечить только при соответствующем быстродействии привода, что, как правило, не позволяет сделать обычный асинхронный двигатель.

С другой стороны, так как шаговый конвейер работает циклично, а величина шага может не привышать нескольких сантиметров, время цикла очень мало и может составлять десятые доли секунды. Однако из-за высокой инерционности асинхронный двигатель, как правило, не успевает достичь установившейся скорости (рис. 2), и? как следствие, обеспечить требуемое перемещение за указанное время. Указанное обстоятельство ограничивает производительность конвейера.

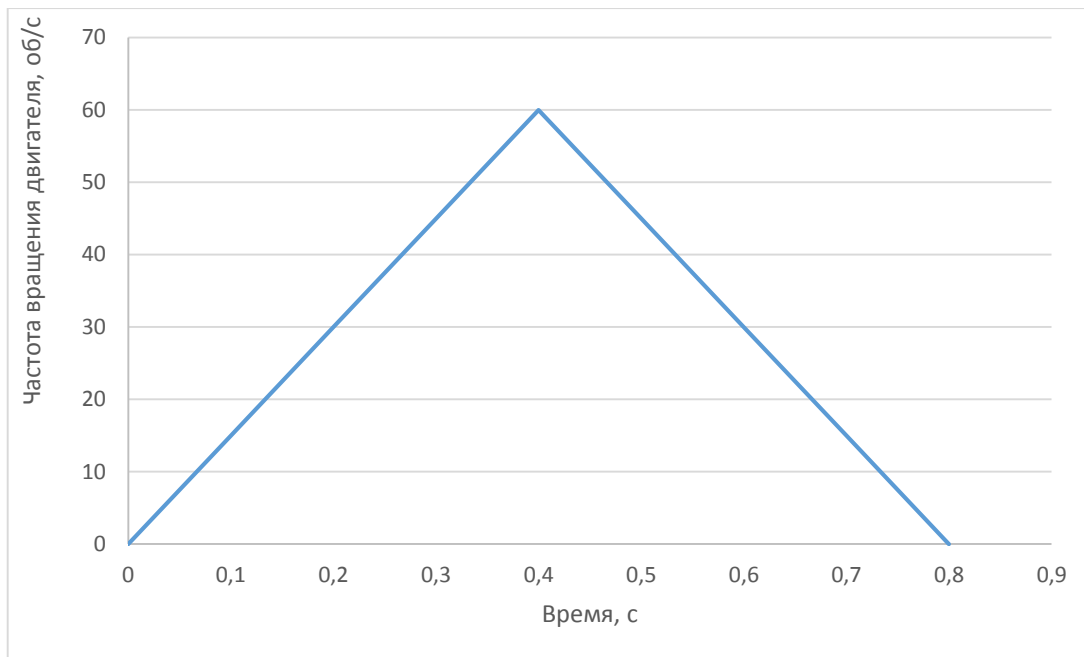


Рисунок 2 – Зависимость частоты вращения двигателя от времени при работе без выхода на установившуюся скорость

Для того чтобы повысить производительность шагового конвейера, вместо асинхронного двигателя применен серводвигатель на базе асинхронного. За счет обратной связи серводвигатели обладают лучшими динамическими характеристиками и могут быстрее выйти на заданную скорость, а также быстрее остановиться (рис. 3). Это позволяет обеспечить более высокую производительность шагового конвейера.

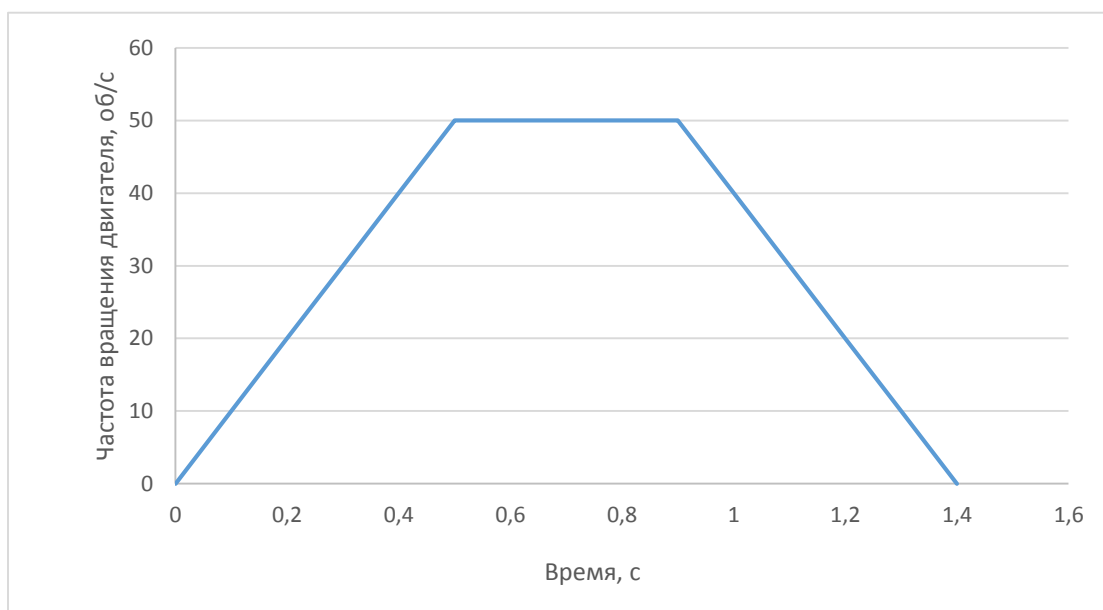


Рисунок 3 – Зависимость частоты вращения двигателя от времени при работе с выходом на установившуюся скорость

Данный подход был применен при проектировании системы управления роботизированной установкой с шаговым конвейером, предназначенной для вторичной упаковки мороженого (рис. 4).



Рисунок 4 – Шаговый конвейер с серводвигателем

Таким образом, на практике подтверждена эффективность применения сервопривода в системах управления шаговыми конвейерами. Следует также отметить хорошую совместимость сервопривода с цифровыми системами управления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рассудов, Л. Н. Системы на кристалле: Новые возможности управления сервоприводом / Л. Н. Рассудов, А. П. Балковой // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск, 07–09 октября 2014 г. Саранск, 2014. – Т.1 – С. 38–43.
2. Проектирование нестандартного оборудования: справочно-методическое пособие / Н. П. Игнатъев. – Азов: АзовПечать, 2013. – 483 с.
3. Обеспечение точности при проектировании приводов и механизмов: справочно-методическое пособие / Н. П. Игнатъев. – Азов: АзовПечать, 2012. – 110 с.

УДК 621.34-52

ОПТИМАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА

Супрунчук П. Д.¹, Прокопеня О. Н.¹, Прожижко О. Г.¹

1) Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Системы оптимального управления находят все большее применение в технике. Данные системы обеспечивают высокое качество регулирования, но достаточно трудоемки в проектировании. Поиск оптимального управления представляет собой сложную математическую задачу [1], решение которой основано на описании системы переменными состояниями [2]. На практике, как правило, используется частный случай ее решения, который именуется аналитическим конструированием регулятора. Под аналитическим конструированием регуляторов

понимают решение задачи оптимального управления для линейного объекта и квадратичного критерия [3]. Решение данной задачи актуально для приводов постоянного тока.

Эффективность решения данной задачи зависит от выбора коэффициентов матриц, входящих в критерий качества регулирования. Однозначных рекомендаций по их выбору нет, корректность выбора зависит от опыта проектировщика. В настоящее время является актуальной проблема экономии электроэнергии. Затраты энергии на регулирование определяются значением матрицы R , входящей в интегральный критерий. В данной работе выполнен количественный анализ влияния матрицы R на затраты энергии на регулирование применительно к конкретному приводу постоянного тока.

Пусть уравнения объекта

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

где $A(t)$ и $B(t)$ – матрицы объекта.

Критерий качества регулирования

$$I = \int_{t_0}^{t_k} (u^T R(t)u + x^T Q(t)x) dt + x^T(t_k) F_k x(t_k), \quad (2)$$

где $Q(t)$ – симметричная, неотрицательно-определенная весовая матрица;
 $R(t)$ – симметричная, положительно-определенная весовая матрица.

Минимальное значение критерия, соответствующее оптимальному управлению, ищется в виде квадратичной формы

$$I^*[x(t), t] = x^T P(t)x, \quad (3)$$

где $P(t)$ – весовая матрица.

Решением задачи нахождения минимума критерия является оптимальное управление

$$U^*(t) = -R^{-1}(t)B^T(t)P(t)x(t). \quad (4)$$

При этом матрица $P(t)$ находится из решения матричного нелинейного дифференциального уравнения Риккати [3]

$$-\dot{P}(t) = PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q. \quad (5)$$

Даже в случае, если объект является стационарным, а матрицы R и Q имеют постоянные коэффициенты, матрица P зависит от времени.

Матрица P может состоять из постоянных коэффициентов только при оптимизации на бесконечном интервале времени. В этом случае коэффициенты матрицы представляют собой установившееся решение уравнения (5), которое является решением алгебраического уравнения

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0. \quad (6)$$

Если обозначить установившееся решение \bar{P} , то при постоянных коэффициентах матриц оптимальное управление

$$U^*(t) = -R^{-1}B^T \bar{P}x(t). \quad (7)$$

Данное выражение можно представить в виде

$$U^*(t) = -Kx(t). \quad (8)$$

где $K = -R^{-1}B^T \bar{P}$.

Из (8) следует, что оптимальная система регулирования будет иметь такую же структуру, как и система, синтезированная методом размещения полюсов (с обратными связями по всем переменным состояниям). Однако коэффициенты в цепях обратной связи (коэффициенты матрицы K) вычисляются согласно (8).

В критерии качества (2) принимаем

$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, а матрицу R будем изменять в процессе анализа.

В качестве объекта регулирования принят двигатель постоянного тока 2ПБ112МУХЛ4, для которого

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 106 \\ -26,6 & -145 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 15 \end{bmatrix};$$

При подстановке значений матриц в (6) получаем

$$\begin{aligned} PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q &= \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 & 106 \\ -26,6 & -145 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -26,6 \\ 106 & -145 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 15 \end{bmatrix} * [R]^{-1} * \begin{bmatrix} 0 & 15 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -53.2p_{12} + 1 - 225p_{12}^2/R & -26.6p_{22} + 106p_{11} - 145p_{12} - 225p_{12}p_{22}/R \\ -26.6p_{22} + 106p_{11} - 145p_{12} - 225p_{12}p_{22}/R & 212p_{12} - 290p_{22} - 225p_{22}^2/R \end{bmatrix} = 0. \end{aligned}$$

Приравниваем к нулю элементы полученной матрицы

$$-53.2p_{12} + 1 - 225p_{12}^2/R = 0$$

$$-26.6p_{22} + 106p_{11} - 145p_{12} - \frac{225p_{12}p_{22}}{R} = 0$$

$$212p_{12} - 290p_{22} - \frac{225p_{22}^2}{R} = 0.$$

Решением данных уравнений при заданном значении матрицы R находятся значения коэффициентов матрицы P и матрицы K , соответствующие оптимальному управлению (8). Результаты вычислений для различных R приведены в таблице 1.

Для оценки качества переходных процессов и энергопотребления привода разработана математическая модель в приложении SIMULINK, которая представлена на рисунке 1.

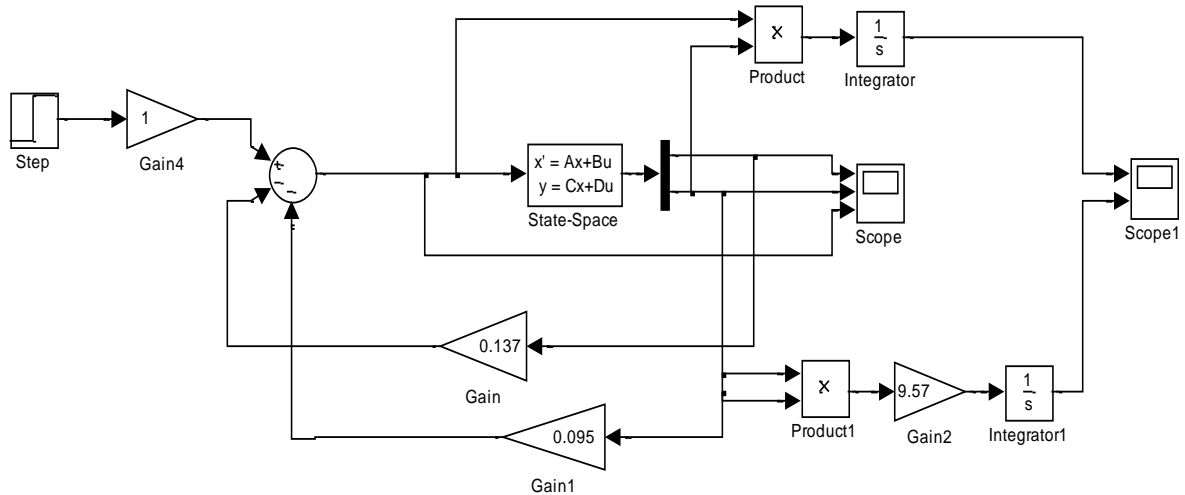


Рисунок 1 – Математическая модель привода в приложении SIMULINK

В модели предусмотрены блоки для вычисления потребляемой энергии и потерь в приводе. Они вычислялись за фиксированный интервал времени после пуска без нагрузки. При этом осуществлялась отработка заданного значения скорости, которое также поддерживалось постоянным. График зависимости потребленной приводом энергии от времени при пуске без нагрузки имеет вид, приведенный на рисунке 2.

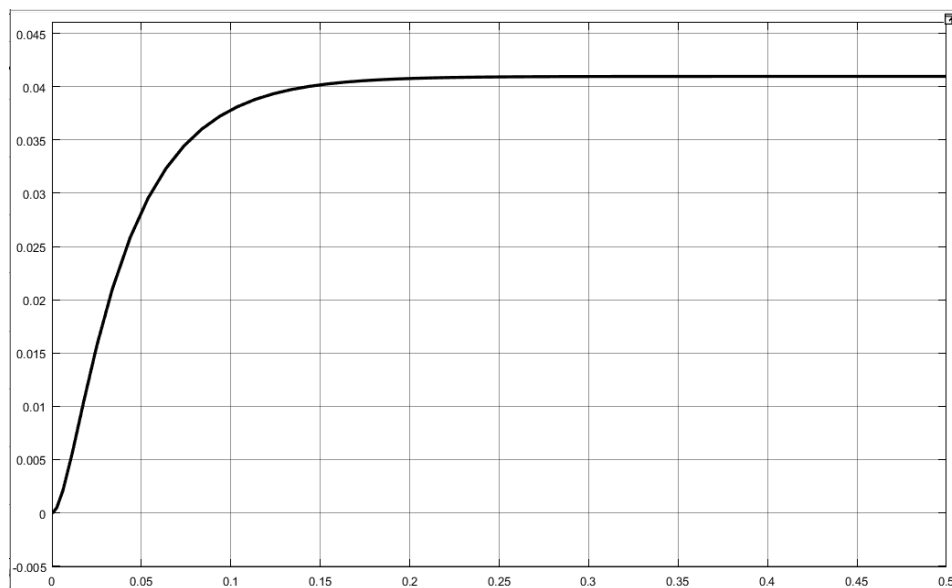


Рисунок 2 – Потребление энергии приводом в процессе разгона

Предполагается, что при достижении установившейся скорости двигатель работает в режиме идеального холостого хода, ток принимает нулевое значение, и потребление энергии прекращается. Установившееся значение на рисунке 2 соответствует энергии, потребленной за время пуска. Результаты расчета для различных значений R приведены в таблице 1.

В таблице 1 приведено также время регулирования при допустимом отклонении 5 %, характеризующее длительность переходного процесса. Во всех случаях обеспечивалось нулевое перерегулирование (монотонный переходной процесс).

Таблица 1 – Результаты вычислений потерь энергии

R	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0	2,0
K_1	1,859	0,776	0,498	0,326	0,265	0,137
K_2	1,273	0,555	0,354	0,239	0,189	0,095
$Q_{\text{ПОТР}}, \text{Дж}$	2,360	1,975	1,860	1,804	1,782	1,730
$Q_{\text{ПОТЕРЬ}}, \text{Дж}$	1,505	1,126	1,017	0,957	0,935	0,883
$t_{\text{рег}}, \text{с}$	0,070	0,089	0,106	0,112	0,118	0,127

Результаты моделирования показывают, что с увеличением значения R снижается энергопотребление привода за счет уменьшения потерь. Разность между количеством потребленной энергии и величиной потерь постоянна и равна кинетической энергии ротора при установившейся скорости. При изменении R от 0,1 до 2,0 потери снижаются в 1,7 раза. Переходный процесс растягивается с 0,071 до 0,127 с (в 1,8 раза). В таблице 1 приведены соответствующие значения коэффициентов в цепях обратной связи K_1 и K_2 .

Таким образом, в ходе исследования установлено, что увеличивая значение матрицы R , можно снижать энергопотребление привода, что сопровождается увеличением длительности переходного процесса. Это дает возможность в каждом конкретном случае обеспечивать минимальное энергопотребление при заданном времени регулирования. Для расчета можно использовать полученные на основе решения уравнения Риккати алгебраические уравнения, а также разработанную в приложении SIMULINK математическую модель.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании оптимальных систем регулирования на основе двигателей постоянного тока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 5 т. / под ред. П. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – 2-е изд. перераб. и доп. Т. 4: теория оптимизации систем автоматического управления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с.
2. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
3. Солодовников, В. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В. В. Солодовников, В. Н. Плотников, А. В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Ярошевич А. В.

Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Статья посвящена построению модели системы компенсации реактивной мощности в структуре адаптивной системы автоматического управления. Для решения задачи синтеза системы выбрана схема компенсатора реактивной мощности с аналоговым вычислением ёмкости конденсаторов. В статье рассмотрены следующие задачи:

- проведён анализ и сформулированы требования к схеме компенсатора;
- разработана графическая информационная модель компенсатора реактивной мощности с аналоговым вычислением ёмкости конденсаторов как системы автоматического управления (САУ);
- разработана структурная схема устройства как САУ;
- предложены пути построения модели компенсатора.

Для обоснования актуальности проблемы важны два вопроса.

Первый вопрос: создаётся ли реактивная мощность в бытовых и офисных нагрузках? Статистика отвечает: около половины потребляемой мощности связано с появлением индуктивной составляющей [1].

Второй вопрос: где лучшее место для устройства компенсации индуктивной нагрузки? Компенсатор должен находиться как можно ближе к индуктивной нагрузке [2]. В нашем случае таким местом может быть распределительный щиток потребителя, где устанавливается сегодня счётчик электроэнергии.

Отсюда требования к такому устройству: невысокая стоимость и небольшие габариты. Что в этой области имеем сегодня. Предприятия энергоснабжения ориентируются на решение проблемы для больших промышленных нагрузок. Отсюда большие габариты и стоимость не для массового применения.

С другой стороны, на рынке появляются небольшие и недорогие коробочки с заявленными функциями экономии электроэнергии при включении их рядом с вентилятором или холодильником. То, что внутри коробочки только конденсатор 5МкФ и светодиод и потребитель никакого эффекта для себя от использования такого устройства не имеет – ясно только для профессионалов.

Вывод: проблема есть и требует решения. Для решения проблемы предложено, используя свойства математических соотношений для расчёта управляющих устройством компенсации сигналов [3], реализовать алгоритм управления компенсатором реактивной мощности (КРМ) на аналоговых элементах электроники.

Построение компенсатора на аналоговых элементах для выполнения основных функций преобразования сигналов позволяет создать модель в понятиях теории автоматического управления (ТАУ). Рассмотрение модели как системы автоматического управления позволяет исследовать параметры компенсатора

методами ТАУ с использованием компьютерных средств моделирования, например MatlabControlSystemToolbox и Simulink.

Анализ многообразия методов управления компенсацией реактивной мощности позволяет сделать следующие выводы:

1. Все методы базируются на косвенной оценке величины реактивной мощности и не обеспечивают требуемое значение $\cos \varphi$ сети.
2. Оценка компенсируемой мощности требует изучения специфических особенностей нагрузки и технологии производственных процессов.
3. Схемы управления компенсацией требуют индивидуального подхода в проектировании и наладке под конкретную ситуацию.
4. Схемы управляющих устройств компенсаторов не отличаются простотой и надёжностью.

На основе этих выводов можно сделать заключение о том, что исключить названные недостатки можно при использовании автоматического управления компенсацией реактивной мощности на основе измерения величины реактивной мощности в нагрузке или электрических параметров нагрузки, по которым можно вычислить величину компенсируемой реактивной мощности.

Исходя из этого, можно сформулировать основные требования к вычислителю компенсатора реактивной мощности для бытовых нагрузок.

1. Для эффективной компенсации реактивной мощности ёмкость конденсаторной батареи должна регулироваться в зависимости от фактического значения реактивной составляющей нагрузки.
2. Использование простых асимптотических формул для расчёта ёмкости позволяет построить простую надёжную схему управления ключами с аналоговым вычислителем для коммутации конденсаторов.
3. Компьютерное моделирование фазового детектора позволило выбрать схему и определить параметры сигнала для управления коммутацией компенсирующих конденсаторов.
4. Использование простой и недорогой схемы в цепях бытовой нагрузки позволит получить существенную экономию за счёт сокращения потерь при передаче электроэнергии.

Для обеспечения экономической целесообразности применения решающим параметром должна быть стоимость устройства. Стоимость определяется построением электрических схем из простых и надёжных элементов, количество которых должно быть невелико. Такой подход позволит обеспечить другое важнейшее требование – небольшие габариты, позволяющие встраивать компенсаторы реактивной мощности в квартирные щиты энергоснабжения.

Способ решения этой задачи и некоторые требования к устройствам предложены в [4] путём применения аналоговой схемы вычислителя для компенсатора реактивной мощности.

При реализации схемы компенсации реактивной мощности необходимо решить следующие проблемы:

- измерение величины реактивных потерь в реальном времени;
- определение ёмкости компенсирующего конденсатора;
- коммутация к сети ёмкости из конденсаторной батареи.

Общая схема предлагаемого устройства для компенсации реактивной мощности бытового потребителя электрической энергии представлена на рис. 1.

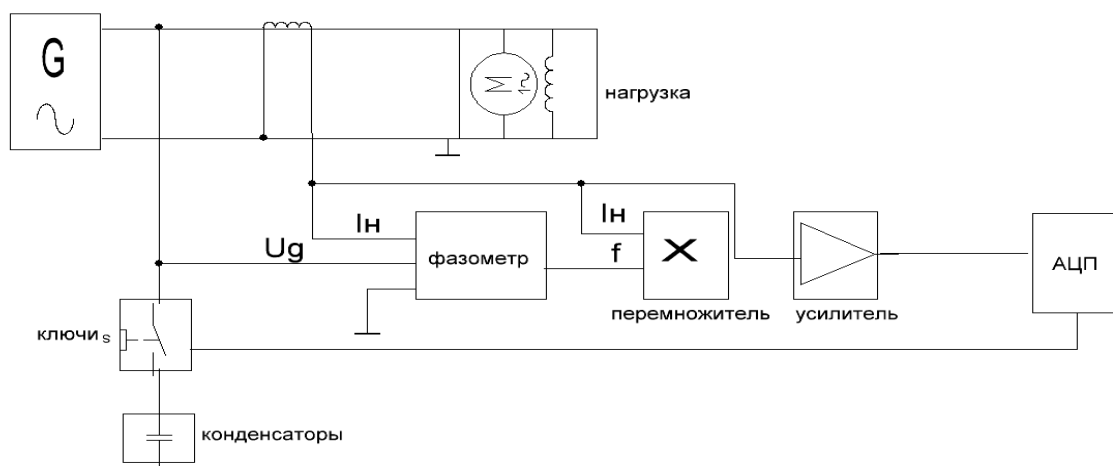


Рисунок 1 – Блок-схема компенсатора

Схема компенсации реактивной мощности подключается между счётчиком электроэнергии и нагрузкой потребителя. Основными узлами схемы являются:

- схема измерения разности фаз сетевого напряжения и потребляемого тока, отражающих долю РМ в нагрузке;
- схема управления симисторными ключами для коммутации компенсирующей ёмкости. Схема включает перемножитель параметров тока нагрузки и разности фаз для реализации формулы определения ёмкости конденсаторов для компенсации реактивной мощности и усилитель для масштабирования полученного произведения;
- линейка симисторных ключей между конденсаторами батареи и фазным проводом;
- компенсаторная батарея конденсаторов.

В качестве измерителя тока может использоваться измерительный трансформатор или резисторный шунт.

Структурная схема адаптивной САУ компенсацией реактивной мощности приведена на рис. 2.

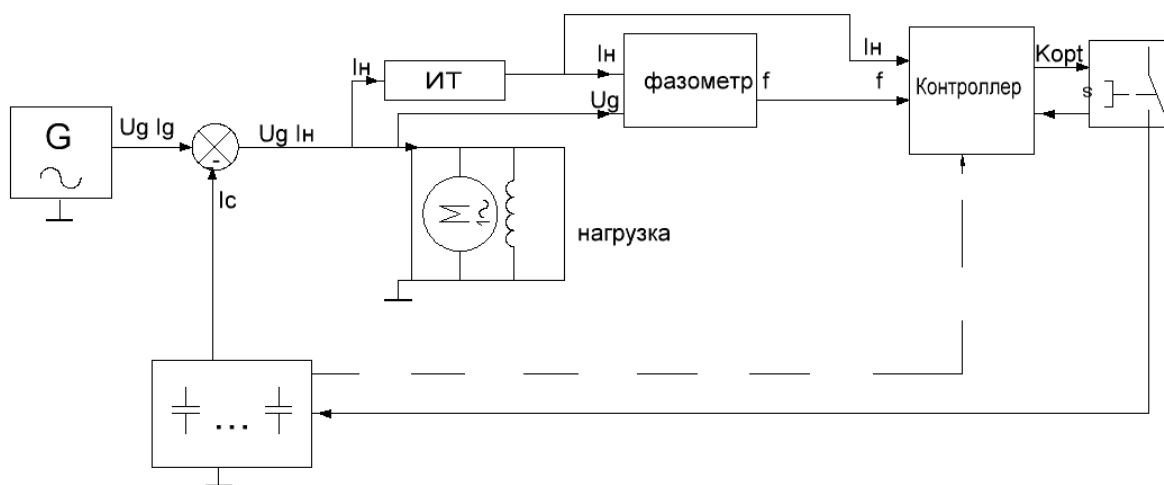


Рисунок 2 – Структурная схема САУ КРМ

Генератор G питает нагрузку системы синусоидальным напряжением 220В 50Гц. Сигналы U_g , I_g поступают на вход элемента сравнения. В данном случае элемент сравнения выполняет функции векторной алгебры, создавая векторные суммы комплексных токов. Нагрузка меняет параметры сигнала тока на $I_n = I_g - I_c$, где конденсаторный ток создается из условия резонанса токов индуктивной нагрузки и компенсирующих конденсаторов.

Измеритель тока ИТ формирует сигнал I_n , который с сигналом U_g подается на фазометр, на выходе которого напряжение f , пропорциональное разности фаз питающего напряжения и тока нагрузки.

Контроллер принимает на себя функции блока умножения, усилителя и АЦП. Блок умножения перемножает сигналы тока и разности фаз в соответствии с формулой для расчёта емкости конденсаторов. Сигнал S на выходе блока определяет компенсирующую ёмкость. Усилитель масштабирует сигнал до уровня, требуемого аналогово-цифровым преобразователем АЦП для формирования кода K управления ключами коммутации конденсаторов компенсирующей батареи.

Коммутация в соответствии с кодом K приведёт к неравномерной нагрузке на ключи и работающие конденсаторы, что существенно снизит надёжность элементов. Кроме того, при ограниченной долговечности элементов важно контролировать их состояние и учитывать его при управлении коммутацией. С этой целью в контур управления введён микропроцессорный контроллер. Функции контроллера состоят в анализе состояния симисторов коммутатора и конденсаторов, выборе алгоритма коммутации по многим критериям и информирования о потере работоспособности устройства. На выходе контроллера формируется сигнал управления ключами $Kopt$.

Блок коммутаторов создаёт электрическую цепь для тока через блок компенсирующих конденсаторов.

Представление компенсатора реактивной мощности адаптивной системой автоматического управления позволяет построить модель в терминах теории автоматического управления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Компания «Матик-электро» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.matic.ru, – 2011 г.
2. Шишкин, С. А. Реактивная мощность потребителей и сетевые потери электроэнергии / С. А. Шишкин // Энергосбережение. – № 4. – 2004.
3. Регулятор реактивной мощности с аналоговым вычислителем. Республика Беларусь / ПАТЭНТ на карысную мадэль № 8066 / Аутар Ярошевич А.В. / Зарэгістравана у Дзяржауным рээстры карысных мадэляу 2011.12.15.
4. Ярошевич, А. В. Схема компенсации реактивной мощности в квартирных электрических сетях / А. В. Ярошевич // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест: БрГТУ. 2011. – Вып.5(71): Физика, математика, информатика. – С. 66–67.

**НАДЕЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ
МАШИН**

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАР ТРЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ПРИРАБОТКИ

Акулич Я. А.

Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Рациональная приработка взаимодействующих поверхностей узлов трения не в последнюю очередь определяет общую долговечность работы изделия. В завершении процесса приработки основные взаимосвязанные характеристики качества поверхностей, такие как микротвердость, чистота поверхностей, шероховатость, структура граничного слоя и ряд других, приобретают величины, соответствующие стабильным условиям изнашивания при эксплуатации. Данные условия определяются материалом пар трения, скоростью и направлением взаимного перемещения, нагрузкой, способом смазывания и взаимодействием поверхностей с используемой смазкой, а так же рядом других факторов.

Установлено, что развитие процесса поверхностного разрушения связаны с характеристиками шероховатостей поверхности, от которой зависят также несущая способность смазочных слоев, формирование сил трения и других эксплуатационных свойств в зоне контакта. Вместе с тем, одним из основных условий окончания процесса приработки можно считать изменение исходной технологической шероховатости поверхностей и образование эксплуатационной шероховатости, зависящей от условий их изнашивания. Полученная шероховатость будет оптимальной для конкретных условий взаимодействия пары трения и обеспечит оптимальный ее износ.

Достаточно важной и ответственной задачей представляется выбор материала исследуемых пар трения. В данном случае такой выбор будет зависеть от конструкции и назначения узла, условий эксплуатации, прочности составляющих деталей, надежности, затрат на изготовление и эксплуатационных расходов.

Испытания проводились с использованием пар трения типа “вал-втулка”. Материалом образцов выступали легированная конструкционная сталь 40Х, с проведением последующей термообработки до HRC 40..45, ГОСТ 4543–71, и оловянистая бронза БрОЦС 5–5–5 ГОСТ 613–79. Такое сочетание материалов антифрикционных пар трения – сталь-бронза можно отнести к одному из оптимальных, вследствие того, что коэффициенты трения скольжения для них не будут иметь высоких значений.

Размеры образцов, подвергнутых испытаниям, были установлены согласно руководству по эксплуатации машины трения 2070 СМТ–1 [1]. Радиус рабочей поверхности образцов составлял $R_{\text{раб.}} = 17,5$ мм.

Для определения трибологических характеристик исследуемых пар трения в процессе приработки, которые бы имели отличную исходную шероховатость, были использованы разные методы механической обработки. Сопрягаемые поверхности образцов имели усредненный параметр шероховатости поверхностей, полученных шлифованием $R_a = 0,27$ и точением $R_a = 1,31$. Наиболее оптимальные показатели шероховатости для испытания пар трения данного типа были определены в соответствии с рекомендациями источника [2].

При проведении трибологических испытаний была реализована прямая пара трения, т. е. соблюдались следующие условия: вращался образец с большей номинальной площадью и большей твердостью исходной структуры материала поверхности, когда как нагрузка прикладывалась через неподвижный образец.

В качестве жидкостной среды, в которой проводились испытания, было использовано масло И-40А, ГОСТ 20799-88, с кинематической вязкостью при 40 °С 51–75 мм²/с. При испытании был реализован режим граничного трения.

В процессе трибологических испытаний регистрировались: момент трения $M_{тр}$, частота вращения образца, температура смазочной среды. Отслеживая динамику изменения температуры жидкостной среды в процессе испытания, представлялось возможным установить момент стабилизации температуры, что является одним из критериев завершения процесса приработки трущихся поверхностей.

Так же были определены трибологические характеристики пар трения в процессе приработки. Параметр шероховатости в процессе эксперимента определялся с помощью профилографа-профилометра модели 296.

Определение линейного износа внешнего образца (втулки) пары трения проводили методом весового износа образцов на основе данных определения массы до и после испытаний. Взвешивание образцов производили на аналитических весах ВЛР-200, 2 класс, ГОСТ 19491–74 с точностью измерения до 0,0001 г. Таким образом, был определен путь трения и линейная интенсивность изнашивания по изменению массы Δm изношенного слоя.

При проведении исследований пар трения в процессе приработки, имеющих отличную исходную шероховатость, полученную разными методами механической обработки, были получены следующие результаты. На рисунке 1 представлены кривые изменения значений среднего арифметического отклонения профиля R_a в процессе приработки пары трения. Из зависимостей видно, что при полученной после обработки чистовым точением характеристике качества поверхности $R_a = 1,31$, в завершении приработки наблюдалось уменьшение среднего арифметического отклонения профиля ($R_a = 0,53$). Вместе с тем, при испытании образцов после шлифования и соответственно имеющих более низкую исходную шероховатость ($R_a = 0,27$), параметр шероховатости при завершении приработки имел значения, превышающие исходные ($R_a = 0,32$). Таким образом, в процессе приработки была получена оптимальная шероховатость для данных условий трения, которая должна обеспечить наиболее приемлемый износ пары трения. Следует отметить, что значение параметра оптимальной шероховатости было как выше, так и ниже исходного, что свидетельствует о влиянии способа обработки поверхностей, на износные характеристики исследуемой пары трения.

Динамика изменения величин коэффициента трения от времени испытания представлены на рисунке 2.

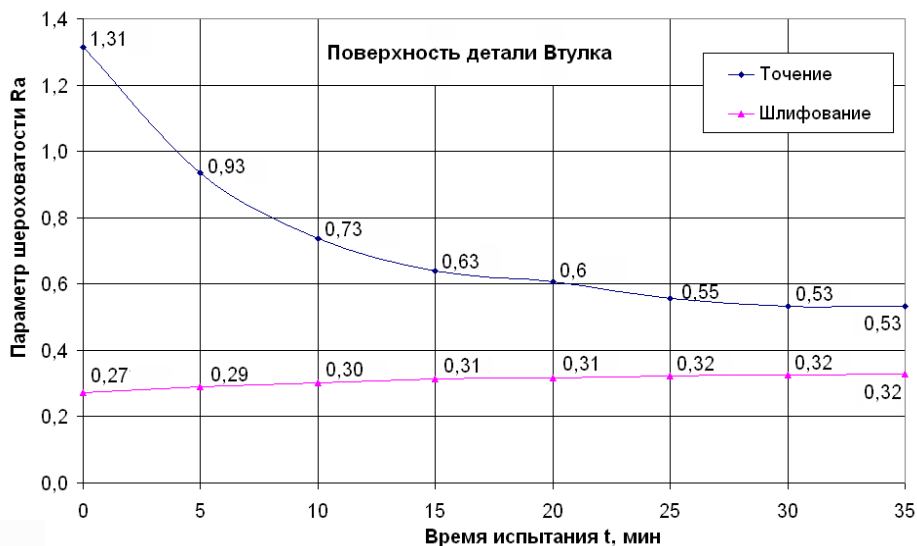


Рисунок 1 – Изменения параметра R_a поверхности детали втулка в процессе приработки

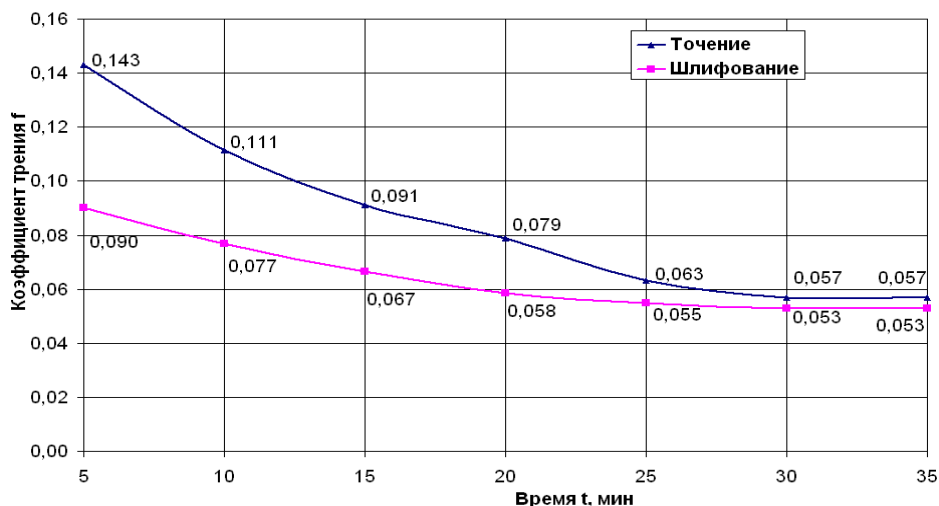


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от времени испытания пар трения

Как видно из приведенных зависимостей, через 25–30 минут после начала испытаний наблюдались стабильные значения коэффициента трения, что говорит о переходе исследуемой пары трения в равновесное динамическое состояние.

Следует отметить, что процесс приработки поверхностей пар трения, обработанных шлифованием, проходит быстрее. Отметим так же полученные более низкие значения коэффициента трения и температуры среды для данной пары трения. Очевидно, что время приработки, сопровождаемое интенсивным изнашиванием сопряженных поверхностей будет зависеть от того, насколько исходные параметры шероховатости будут близки к эксплуатационным, что обуславливает технологическое обеспечение оптимальных параметров качества взаимодействующих поверхностей пар трения на стадии изготовления.

Результаты испытаний пар трения на износ и расчета интенсивности изнашивания приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет значений интенсивности изнашивания пары трения

Время испытания t , мин.	Путь трения L , м	Величина суммарного износа, для поверхностей		Интенсивность изнашивания	
		точение $\Sigma\Delta m$, г	шлифование $\Sigma\Delta m$, г	точение, I_h	шлифование, I_h
15	900	0,0049	0,0032	$28,020 \cdot 10^{-11}$	$20,686 \cdot 10^{-11}$
30	1800	0,0067	0,0038	$19,157 \cdot 10^{-11}$	$12,282 \cdot 10^{-11}$
180	10800	0,0069	0,0039	$3,288 \cdot 10^{-11}$	$2,101 \cdot 10^{-11}$
360	21600	0,0073	0,0041	$1,739 \cdot 10^{-11}$	$1,104 \cdot 10^{-11}$
540	32400	0,0077	0,0042	$1,223 \cdot 10^{-11}$	$0,754 \cdot 10^{-11}$
720	43200	0,0080	0,0043	$0,9531 \cdot 10^{-11}$	$0,579 \cdot 10^{-11}$

Диаграмма на рисунке 3 свидетельствует о том, что интенсивность изнашивания в первые минуты приработки (путь трения от 0 до 0,9 км) значительно превышает последующие значения изнашивания. Однако, при значении пути трения $L = 10,8$ км, уже можно наблюдать стабилизацию величины интенсивности изнашивания как для поверхностей, полученных точением, так и шлифованием.

Очевидно, что интенсивность изнашивания пар трения в процессе приработки имеет значительно более высокие показатели, чем в процессе их стабильной работы. При этом на диаграмме видно, что интенсивность изнашивания пары трения с поверхностями трения, полученными шлифованием ($R_a = 0,65$) имеет несколько меньший показатель в процессе приработки. Вместе с тем, по достижении оптимальной шероховатости поверхности, показатели интенсивности изнашивания поверхностей, полученных разными способами обработки, имеют близкие значения.

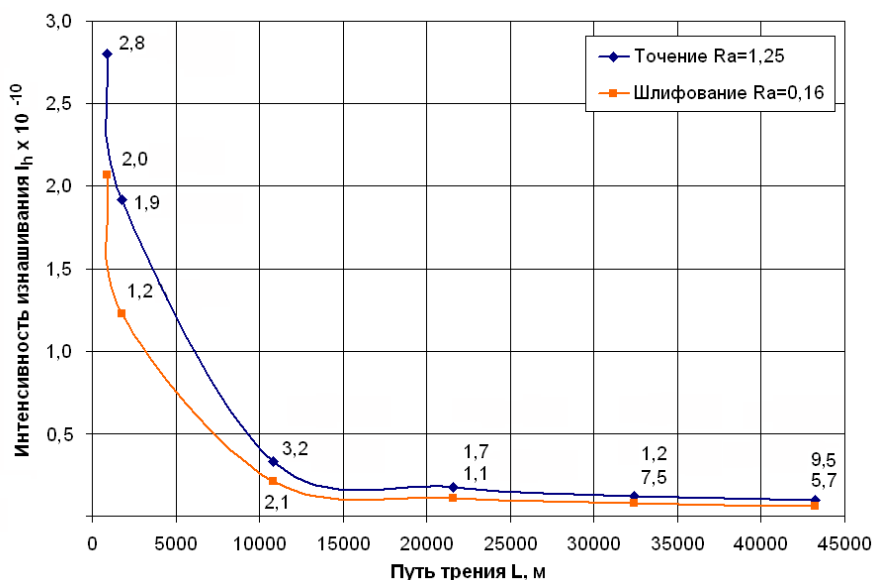


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности износа от пути трения пар в процессе приработки (нагрузка $P = 1000$ Н, скорости скольжения $V = 1,0$ м/с).

Таким образом, длительность приработки поверхностей пары трения будет зависеть от того, насколько исходная шероховатость и другие параметры качества поверхности будут близки к эксплуатационным параметрам, сложившимся

после завершения приработки. Вместе с тем долговечность последующей эксплуатации пары трения связана с интенсивностью изнашивания в процессе приработки и тем самым с ее длительностью, что говорит о целесообразности уже на стадии изготовления технологически обеспечивать оптимальные параметры качества поверхностного слоя.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Машина для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1 / Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2.779.013-01 ТО – М.: МЗИО, 1981. – 69 с.
2. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.

УДК 539.3

МЕТОДИКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИБРОЗАЩИТЫ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ МЕТРОПОЛИТЕНА НЕГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ ВИБРОИЗЛЯЦИОННЫМИ БЛОКАМИ EBS

Василевич Ю. В.¹, Неумержицкая Е. Ю.², Чигарев В. А.¹, Власов Ф. В.¹

1) Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

2) Академия последиplomного образования,

г. Минск, Республика Беларусь

Проблема защиты зданий и сооружений от вибрации, передающейся через грунт, возникла с момента строительства метрополитена неглубокого заложения. Строительство открытым способом сложных инженерных сооружений таких, как станции метрополитена, а также прокладка тоннелей мелкого заложения, позволили снизить стоимость и сократить сроки строительства. Однако вибрации, возникающие в зданиях, расположенных в технической зоне метрополитена, как правило, превышают нормативный уровень.

В случае, если уровень вибрации в здании превышает нормативные величины, снижение вибрации возможно за счет применения одного или группы виброзащитных мероприятий. По общепринятой классификации к числу упомянутых мероприятий следует отнести:

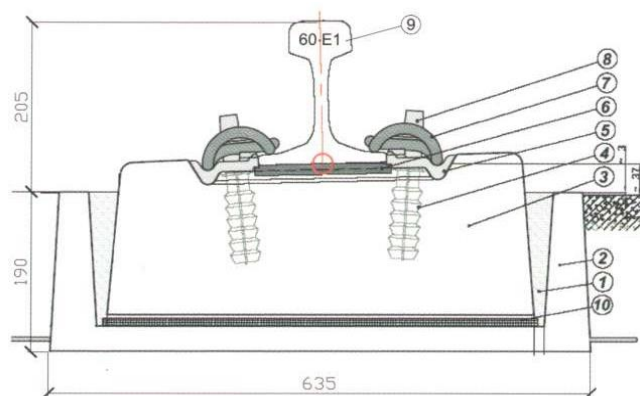
- применение виброзащитных устройств, снижающий передачу динамических нагрузок на колесные пары и верхнее строение пути (ВСП);
- применение амортизирующих конструкций в верхнем и нижнем строении пути и др.

Настоящая работа посвящена исследованию эффективности виброзащиты ВСП рельсовыми блочными опорами системы EBS.

Экспериментальный участок на виброизолированных рельсовых опорных блоках системы EBS, протяженностью 125 м, изготовлен на первой линии Минского метрополитена.

Рельсовые блочные опоры системы EBS – это безбалластная система конструкции рельсового полотна. Она обеспечивает эластичное распределение давления рельсовых транспортных средств и гашение вибраций, вызванных движением поездов [1, 2]. В этой системе рельсы прикрепляются не к обрезным шпалам, а к отдельным бетонным опорным блокам, установленным в сборных гнездах из бетона или композита с использованием эластичной заливочной массы Edilon Corhelast. Двухкомпонентная смолярная масса Edilon Corhelast обеспечивает прочное и эластичное крепление опорных блоков в гнездах [1].

На рисунке 1 изображена рельсовая блочная опора – вариант со сборным бетонным гнездом.



- 1 – изоляционный слой опорного блока – заливочная масса Edilon Corkelast;
 2 – сборное гнездо опорного блока; 3 – бетонный опорный блок; 4 – винтовой дюбель;
 5 – угловая направляющая; 6 – подрельсовая прокладка; 7 – эластичная клемма;
 8 – болт; 9 – рельс; 10 – эластичная виброизоляционная прокладка Edilon Resileient Strip.

Рисунок 1 – Рельсовая блочная опора – вариант со сборным бетонным гнездом

Основная цель выполненной работы заключается в проведенных экспериментальных исследованиях виброизолирующих характеристик железнодорожного пути метрополитена, изготовленного с использованием виброизолированных рельсовых опорных блоков системы EBS.

Методика изучения виброизолирующих характеристик опытного участка, с внедренными виброизолированными рельсовыми опорами системы EBS, включала два взаимосвязанных этапа исследований. Взаимосвязь исследований заключалась в скоординированном измерении уровней соответствующих компонент виброускорения при прохождении подвижного состава на виброизолированном и невиброизолированном участках пути. Измерительное сечение невиброизолированного участка пути располагалось недалеко от границы виброизолированного ВСП. Взаимовлияние измерения уровней виброускорения как на виброизолированном, так и на невиброизолированном участках, полностью исключалось. В измерительных сечениях фиксировались максимальные уровни виброускорения от проходящих тележек вагонов.

Эффективность виброизоляции рельса, лотка и центра боковой стены тоннеля в обоих измерительных сечениях оценивалась как разность соответствующих уровней компонент виброускорения на виброизолированном и невиброизолированном участках. Сравнение уровней вибрации на участке с типовым рельсовым ВСП и на виброизолированном участке дает истинную достоверную информацию об эффективности применения виброизоляционного технического решения.

Методика выполнения измерения уровней виброускорения. В основу методики выполнения измерения уровней виброускорения положена методика выполнения измерений «Однократные прямые измерения уровней звука, звукового давления и ускорения приборами серий ОКТАВА и ЭКОФИЗИКА». Приложение к руководствам по эксплуатации ПКДУ. 411000. РЭ, ПКДУ. 411000.001.02 РЭ, ПКДУ.411000.001.03РЭ. – М., 2012.

Для измерения уровней виброускорения использованы виброметры, анализаторы спектра ЭКОФИЗИКА – 110 В.

Измерения вибрации.

Приборы ЭКОФИЗИКА – 110 В реализуют прямые методы измерения вибрации с использованием вибропреобразователей различного типа. При использовании пьезоакселерометров виброускорение преобразуется в сигнал электрического напряжения и передается через блок согласования измерительного модуля 110В на аналого-цифровой преобразователь и сигнальный процессор, который осуществляет измерение данного сигнала и определение требуемых уровней вибрации согласно параметрам калибровки измерительного канала.

Типовая схема подключения вибродатчиков к прибору рассчитана на применение пьезоакселерометров со встроенной электроникой типа IERE (ICP). Эти датчики не имеют многих недостатков, свойственных классическим пьезоакселерометрам.

Чувствительным элементом пьезоакселерометра является пьезокристалл с присоединенной массой. При вибрации масса по инерции давит на пьезокристалл, поэтому на гранях последнего появляется электрический заряд (явление “пьезоэлектричество”). Величина заряда пропорциональна силе, а следовательно, и ускорению.

Для измерения уровней виброускорения рельса, лотка и боковой чугунной стенки тоннеля в центре виброизолированного участка и на участке с типовым верхним строением пути (путь на деревянных шпалах) были выбраны два измерительных сечения (т. е. два поперечных сечения тоннеля). В каждом измерительном сечении регистрировались уровни виброускорения следующих компонент вибрации:

- вертикальные колебания рельса; однокоординатный датчик крепился к подошве рельса для съема вертикальных колебаний (канал 3, Z) рельса при прохождении подвижного состава;

- вертикальные колебания лотка тоннеля; однокоординатный датчик, канал 2 (Y), крепился к замоноличенной в путевой бетон металлической пластине, которая находилась рядом с гнездом блочной рельсовой опоры системы EBS;

- горизонтальные колебания центра боковой стенки чугунной обделки, канал 1 (X); датчик надежно крепился к чугунной обделке. Указанные горизонтальные колебания являются нежелательными при передаче колебаний фундаментам близко расположенным к зданиям в технической зоне метрополитена мелкого заложения.

От каждого датчика кабели были соединены с соответствующими гнездами приборов. Штатные кабели были небольшой длины, поскольку датчики находились рядом с закрепленными на обделке тоннеля приборами. Несмотря на то, что кабели были антивибрационными, они были прикреплены к лотку и обделке тоннеля с интервалом крепления 20 см.

После окончания испытаний датчики и приборы были демонтированы из установленных мест. Записанные вибросигналы вводили в компьютер и обрабатывали в октавных и 1/3-октавных полосах частот с использованием стандартного программного обеспечения.

Эффективность виброизоляции рельса, лотка и центра боковой обделки тоннеля в обоих измерительных сечениях оценивалась как разность соответствующих уровней компонент виброускорения на виброизолированном и не виброизолированном участках пути.

Сравнение соответствующих уровней виброускорения рельса, лотка, обделки тоннеля на виброизолированном рельсовыми блоками системы EBS и на не виброизолированном участках пути показало:

- достигнут большой эффект виброизоляции рельса на виброизолированном участке пути по сравнению с типовым рельсовым ВСП;
- на частотах до 16 Гц также наблюдается эффект виброизоляции лотка и обделки тоннеля на виброизолированном участке пути; однако этот эффект не выявлен в октавных и третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 31,5 и 63 Гц;
- в октавных и третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 31,5 и 63 Гц эффект виброизоляции лотка и обделки тоннеля на виброизолированном участке отсутствует, поскольку зафиксированные уровни виброускорения сопоставимы с соответствующими уровнями виброускорения на участке с типовым ВСП.

Следовательно, предложенная конструкция виброизоляции пути и тоннеля метрополитена с использованием рельсовых опорных блоков системы EBS не является эффективной по виброизоляции лотка и обделки тоннеля вследствие полученных сопоставимых уровней виброускорения в диапазоне изменения частот с центральными частотами 31,5 и 63 Гц, являющимися характерными частотами наибольших колебаний тоннелей метрополитена мелкого заложения, на виброизолированном и не виброизолированном участках пути. Вибрацию, в диапазоне частот с центральными частотами 31,5 и 63 Гц, необходимо подавлять в первую очередь, как хорошо передающуюся от колеблющегося тоннеля через грунт фундаментам зданий и сооружений в технической зоне метрополитена мелкого заложения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Железная дорога, метро. Системы рельсовых покрытий. Chemical Global Group TINES.
2. Шахуняц, Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахуняц. – М.: Транспорт, 1987.

УДК 621.62-762

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УПЛОТНЕНИЙ ВАЛОВ ГИДРОМАШИН

Голуб В. М.

УО «Брестский государственный технический университет

В статье рассмотрены условия эксплуатации уплотнений валов гидромашин, причины их внезапных отказов и технологические методы повышения их надежности и долговечности.

Условия эксплуатации насосов весьма разнообразны и зависят от технологических режимов перекачки: подачи, давления, температуры и свойств перекачиваемой среды. Исходя из анализа внеплановых выходов из строя центробежных насосов нефтехимических предприятий видно (рисунок 1), что более 60 % отказов приходится на долю торцовых уплотнений. Аналогичная картина отказов у насосов добычи, транспорта нефти и нефтепродуктов.

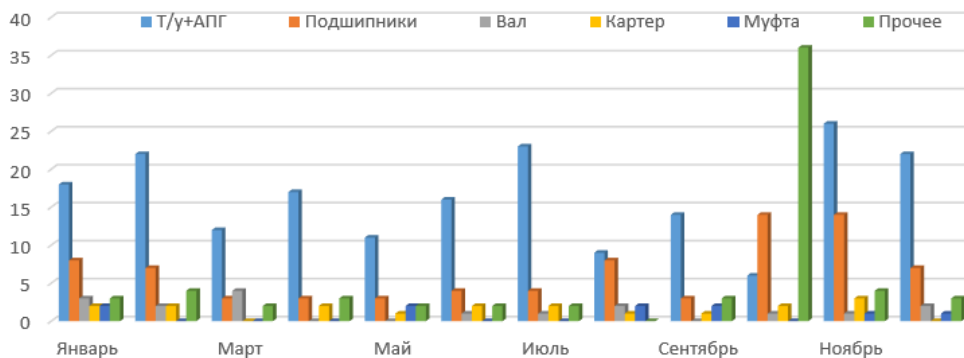


Рисунок 1 – Анализ внеплановых выходов насосов из строя

Проблема повышения надежности насосного оборудования заключается в том, что эксплуатация насосов с неисправными уплотнениями, кроме потери перекачиваемого сырья, приводит к нарушению режима перекачки, ухудшает условия работы обслуживающего персонала, а в ряде случаев и к критическим, аварийным последствиям. В связи с этим предъявляются жесткие требования к герметичности насосов по пожаро- и взрывобезопасности. Высокие требования к уровню герметичности зачастую определяют не только конструкцию насосов, но и параметры технологического процесса. Многие эффективные технологические процессы не могут быть реализованы из-за недостаточной герметичности валов по корпусу насоса, что снижает их надежность и долговечность.

Состояние поверхностного рабочего слоя колец пар трения представляет собой один из главных показателей, определяющих эксплуатационные характеристики торцового уплотнения, т. к. отказ уплотнения обычно связан с износом и разрушением трущихся поверхностей, приводящих к нарушению герметичности уплотнения. Правильный выбор материалов колец и соответствующей технологии обработки рабочих поверхностей контактной пары трения обеспечивают надежную работу уплотнения на длительный период даже в условиях относительно плохой смазочной способности уплотняемой среды.



1 – кольцо неподвижное; 2 – кольцо вращающееся
Рисунок 2. – 3D модель торцового уплотнения

Торцовое уплотнение (рисунок 2) в процессе работы при больших скоростях скольжения воспринимает как статические, так и динамические нагрузки. Материалы колец пар трения должны поглощать и рассеивать тепловую энергию антифрикционного покрытия без растрескивания и катастрофического изнашивания рабочих поверхностей, способную проявиться в результате многократных колебаний силового и теплового воздействий. Одним из эффективных способов повышения долговечности торцового уплотнения является нанесение на рабочие поверхности контактных колец износостойкого композиционного слоя из тонкозернистых порошков карбида вольфрама, сплавляемых медьсодержащей матричной связкой, обладающей высокой теплопроводностью.

Принципиальной особенностью изготовления таких колец является то, что соединяются совершенно различные по своим физико-механическим свойствам и химическому составу материалы. Контактное кольцо является комбинированной деталью, основу которой составляет конструкционная сталь, а нанесенный на рабочую поверхность износостойкий пояс толщиной 2–3 мм в заданных чертежом размерах представляет собой твердый композиционный материал с высокими антифрикционными характеристиками. Механическая обработка таких колец не представляет технологических трудностей, т. к. только контактная торцовая поверхность требует при обработке применения специального сверхтвердого абразивного инструмента. При спекании и пропитке композиционного слоя заготовка нагревается до температуры 1200–1300 °С, поэтому в процессе охлаждения в сталях происходят определенные структурные изменения.

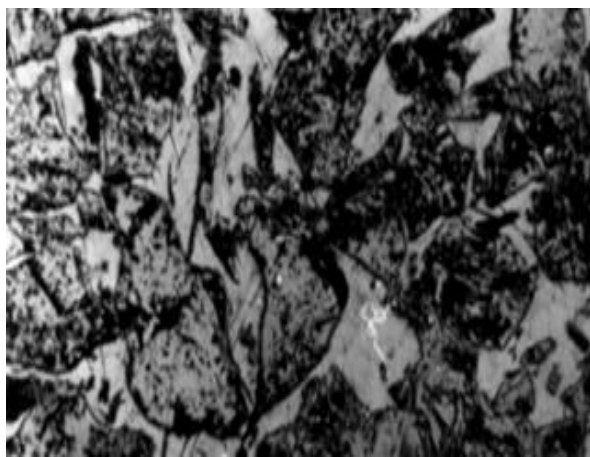
Стали аустенитного класса хорошо смачиваются пропиточным материалом, имеют коэффициент линейного расширения, близкий к коэффициенту линейного расширения композиционного материала, а структурные превращения не приводят к изменению ее объема. Мартенситное превращение в сталях сопровождается заметным увеличением объема, что приводит к возникновению остаточных напряжений, возникновению трещин в композиционном слое и его отслоению. Трещины могут возникнуть как в процессе охлаждения, так и в процессе механической обработки заготовки контактного кольца.

Появление опасных остаточных напряжений в композиционном слое кольца, основа которых выполнена из сталей мартенситного класса, устраняется не только путем подбора состава компонентов покрытия, что довольно сложно, но и путем предварительного нанесения на стенки и дно канавки стальной заготовки кольца пластичной металлической подложки. Для этих целей возможно применение меднения или металлизации поверхностей канавки под износостойких слоев шихты из твердосплавных порошков.

Фазовый состав нанесенного композиционного материала изучался по рентгенограммам. Идентификацию рентгенограмм проводили по межплоскостным расстояниям и ширине интерференционных линий. На электронном микроанализаторе были проведены исследования по количественному и качественному распределению элементов в композиционном слое.

Поверхности шлифов из композиционного материала предварительно изучались с помощью металлографического микроскопа.

Поверхность износостойкого слоя представляет собой разнотонкозернистую структуру, которая состоит из тонкодисперсных и мелких зерен карбида вольфрама и цементирующей их матричной связки (рисунок 3) на основе меди, никеля и кобальта.



а) $\times 70$



б) $\times 200$

Рисунок 3 – Микрофотография поверхности (а) и структура композиционного материала (б)

Для сканирования выбирались наиболее типичные участки микрошлифов. Исследовалось распределение W, Cu, Ni, Co в плоскости, перпендикулярной контактной поверхности. Отмечаются наложения интерференционных максимумов различных фаз друг на друга, наблюдаются изменения кристаллической структуры решеток WC и W₂C в результате обезуглероживания. Матричная связка образует твердый раствор никеля в меди с дисперсно-рассеянными частицами карбида вольфрама и кобальта. Отмечено образование сложных карбидов типа θ -Co₂W₄C₃ и η -Co₃W₃C на границах зерен карбида вольфрама, а также на границе композиционного слоя и стальной основы кольца. Это указывает на подплавление и частичное скрепление твердого каркаса, состоящего из зерен карбида вольфрама.

Полученные микрофотографии поверхности композиционного слоя в поглощенных электронах наглядно показывают равномерность распределения в цементирующей связке по границам зерен вольфрама элементов кобальта, меди и никеля.

Из спектрограмм (рисунок 4) видно, что в диффузионной зоне контакта композиционного слоя со сталью содержание никеля доходит до 0,9 мас. %, значительно снижаясь в глубину стали h, и на расстоянии 30 мкм составляет $\leq 0,1$ %. Кобальт в сталь диффундирует на глубину до 8 мкм. Медь и вольфрам в сталь не диффундируют. Матричная связка, цементирующая крупные зерна карбида вольфрама, состоит из твердого раствора никеля в меди, наполненного тонкодисперсными частицами карбида вольфрама и кобальта. Содержание меди в прослойках находится в пределах от 15 до 60, никеля – от 4 до 25, кобальта – от 4 до 10 мас. %. Содержание дисперсно-рассеянного карбида вольфрама в связке колеблется от 30 до 50 %.

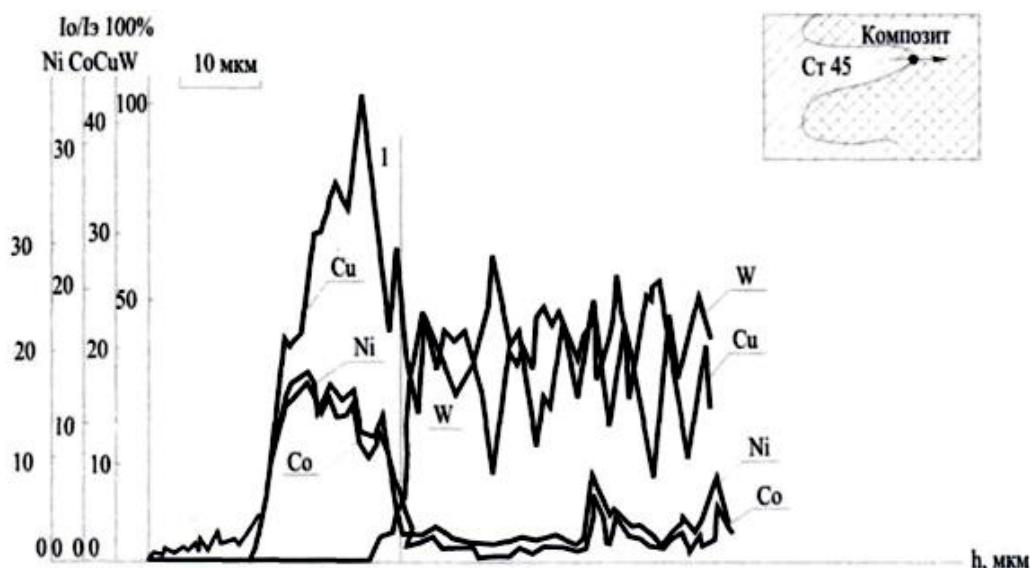


Рисунок 4 – Распределение элементов композиционного материала с матричной связкой

На поверхности зерен карбида вольфрама отмечаются тонко рассеянные мелкие частички меди, чем обеспечиваются высокие антифрикционные характеристики нанесенного композиционного слоя.

УДК 921.7.093

РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Горбунов В. П.¹, Тюшкевич В. В.²

- 1) Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь
- 2) ООО «Машиностроительное предприятие «Компо»,
г. Брест, Республика Беларусь

Машины и аппараты пищевых производств занимают особое место среди изделий машиностроения. С одной стороны — это типичные представители различной сложности машин, в которых воплощены многие достижения науки и техники, с другой — это машины, предназначенные для изготовления пищевых продуктов для употребления человеком. Номенклатура, объем и технический уровень парка этого оборудования определяются возможностью удовлетворять разнообразные и постоянно меняющиеся требования к различным видам оборудования пищевой промышленности, его безопасности и эффективности производства.

Особые требования к качеству продуктов питания, а также возрастающие требования к объему выпускаемой продукции и мобильности технологических процессов приводят к созданию сложных технологических комплексов, где производительность и надежность оборудования, входящего в такие производственные комплексы, должны быть высокими.

Для того, чтобы оборудование работало стабильно, не снижая производительности и качества выпускаемой продукции, необходимо поддерживать его в работоспособном состоянии, для чего проводятся техническое обслуживание и плановые ремонты. В противном случае неизбежны значительные издержки в производстве, вызванные расходами на незапланированные ремонтные работы и снижением количества выпускаемой продукции, связанного с фактическими простоями. Наибольший экономический эффект обеспечивает близкое соответствие планируемых сроков выполнения ремонтных работ и времени возникновения действительной необходимости в них. Это ставит задачу по обеспечению требуемой надежности как технологического оборудования в целом, так и его узлов и деталей. Решение этой проблемы связано с научно обоснованным назначением технического ресурса [1], с учетом факторов влияющих на надежность изделия для выбора конструктивных и технологических решений.

Целью ресурсных испытаний являются:

- выбор оптимальной конструкции технологического оборудования, узла или элемента;
- прогнозирование срока службы изделия;
- определение и прогнозирование показателей надежности функционирования того или иного узла;
- определение оптимального количества требуемых запасных частей и расходных материалов.

Порядок проведения ресурсных испытаний включает в себя:

- анализ конструкции технологического оборудования с выявлением лимитирующего элемента и определением параметров его предельного состояния;
- проведение лабораторных либо эксплуатационных испытаний;
- определение качественных и количественных закономерностей изменения предельного состояния параметров, определяющих технический ресурс;
- оптимизация конструкции и назначение эффективных режимов эксплуатации.

В качестве предельного состояния принимаются как показатели работоспособности машины (производительность, качество выпускаемой продукции, срок службы, ресурс), так и показатели качества составляющих элементов, которые в большей степени снижают технические характеристики. Однако эти показатели взаимосвязаны друг с другом. Критерии предельного состояния различаются большой разнообразностью. Главную роль в изменении технических характеристик машин являются вредные процессы. Профессором Прониковым А. С. предложена классификация видов данных процессов по скорости разрушения функциональных связей, которые делятся на три группы: быстро протекающие процессы, процессы средней скорости и медленно протекающие процессы [2]. Существенную роль в них с точки зрения изменения технического ресурса являются медленно протекающие процессы, где определяющим является износ составных элементов машин.

В качестве объекта исследования рассматривался комплекс для формирования сосисок и колбас в состав которого входят шприц, порционирующее и навешивающее устройства. Основной машиной в этом комплексе является шприц.

В нашем случае используется шприц вакуумный двухвинтовой, одним из наиболее важных узлов которого, определяющего производительность и качество выпускаемой продукции, является приводной узел [3]. Это узел вытеснения фарша из корпуса в оболочку, который при несвоевременном обслуживании приводит к остановке комплекса, и в дальнейшем требует больших затрат для его восстановления.

Схема данного узла представлена на рисунке 1 и имеет следующие составляющие элементы: привод (поз. 1), коробка раздаточная (поз. 2), корпус вытеснителя (поз. 3), двухвинтовой вытеснитель (шнеки) (поз. 4), опорная решетка (поз. 5) с втулками (поз. 6).

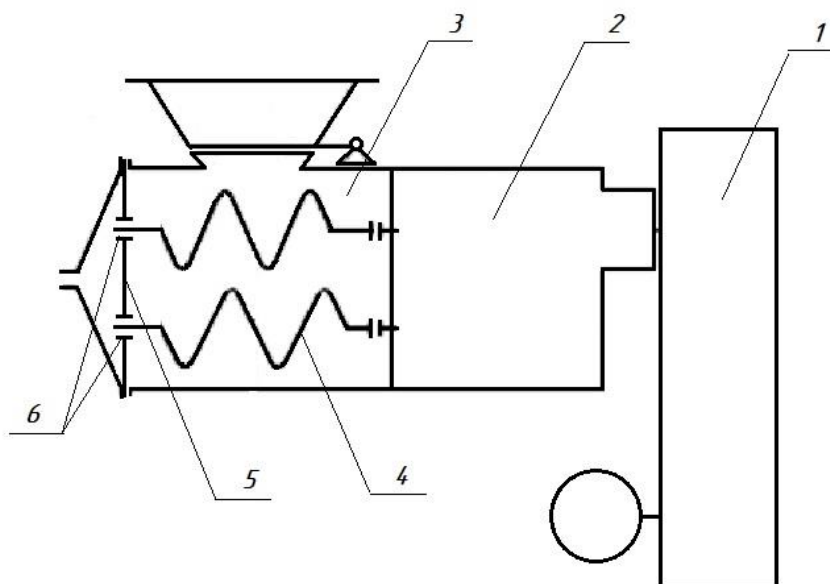


Рисунок 1– Узел вытеснения фарша

Лимитирующим элементом данного узла, определяющим работоспособное состояние всего комплекса, являются втулки (поз. 6, рисунок 1), установленные в опорную решетку (поз. 5). Данные втулки служат опорой для двухвинтового вытеснителя и подшипником скольжения. Внутренний диаметр опорной поверхности втулок выполняется с размером $20^{+0,04}$ мм. Изготовлены втулки из материала, являющегося композицией фторопласта. Несмотря на то, что втулки имеют высокую износостойкость и низкий коэффициент трения, при работе на больших скоростях оборудования (с или без использования переключателя) в кислото-щелочной среде, они за короткий срок подвергаются сильному износу. Основной причиной износа является увеличение биения шнеков, которое могло быть вызвано следующими факторами: непараллельностью осей приводных валов в раздаточной коробке (погрешности при изготовлении и сборки); работой на замороженном фарше до температуры заморозки $-4...-5^{\circ}\text{C}$ (проявляется большое давление на витки шнеков из-за перепада диаметров, что в дальнейшем приводит к прогибу в ослабленном месте шнеков); человеческим фактором (при санобработке произошло падение шнеков) и т. д.

Допустимый размер изношенной поверхности составляет согласно техническим условиям, $\text{Ш}20,2$ мм. Эксплуатация оборудования проводилась в агрессивной кислото-щелочной среде, при двухсменной работе с использованием переключателя на больших оборотах (т. е. оборудование максимально загружено по

техническим параметрам и возможностям). Установка скорости в среднем 70–75 % (460–490 мин⁻¹) от максимальной скорости. Каждую неделю при плановом осмотре и обслуживании оборудования замерялся фактический износ втулок. В среднем общий приведенный срок службы опорных втулок до предельного износа составлял 220 часов, после чего производилась замена на новые. Изъятые втулки были проверены и обмеряны на контрольно-измерительной машине. Проведенные наблюдения показали, что наиболее изнашиваемой является левая втулка узла, изменяющиеся параметры которой в дальнейшем будут рассматриваться. Испытания проводились до и после проведения текущего ремонта, при котором была произведена замена шнеков, втулок на валах раздаточной коробки, замена подшипников и расходных материалов. Полученная выборка представлена на рисунке 2, что позволило более подробно и точно выявить срок службы втулок и вести статистику износа.

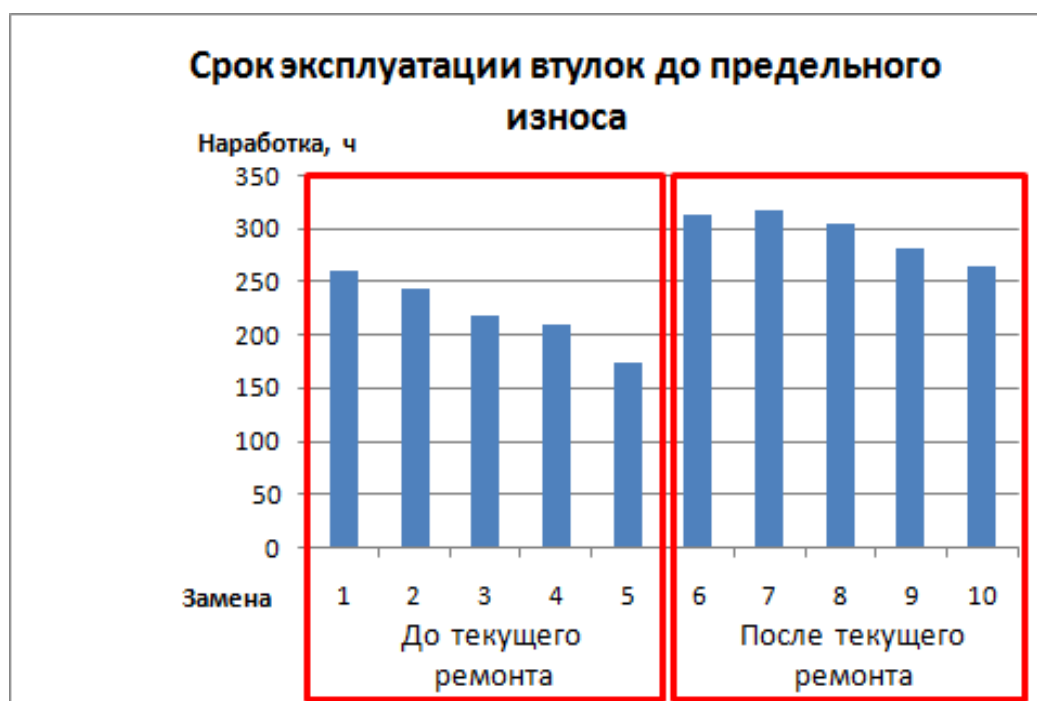


Рисунок 2 – График срока службы втулок до предельного износа

Из графика видно, что с каждым разом при замене комплекта втулок срок их службы до предельного износа уменьшался. При измерении изношенных втулок на контрольно-измерительной машине было обнаружено у 90 % втулок отклонение от цилиндричности опорной поверхности на величину 0,2–0,3 мм, что говорит о присутствии в данном узле биения и износа шнеков, следствием которых были: плохая набивка колбасного батона, потеря давления при вытеснении фарша (фарш возвращался обратно в зону вытеснения, из-за больших люфтов, в результате выработки корпуса вытеснителя и шнеков). Данная выработка начала влиять на скорость выхода продукта (производительность упала) и качество продукции, так как вес данных продуктов начал прыгать из-за неравномерности подачи дозы, вследствие чего данный узел пришлось ремонтировать. Таким образом подтвердилась связь показателей работоспособности рассматриваемого узла с критерием предельного состояния лимитирующего элемента.

После проведения текущего ремонта средний срок службы данных втулок увеличился с 220 часов до 295 часов. Скорость износа втулок уменьшилась почти в два раза.

Выводы. Проведенные исследования ресурса опорных втулок в условиях эксплуатации позволили: произвести оценку условий работы данных деталей; определить основные критерии, влияющие на нарушение работоспособного состояния узла; получить статистические данные по параметрам износа втулок и срокам службы узла. Все это дает возможность использовать полученные данные на этапе проектирования технологического оборудования для проведения компьютерного моделирования влияния условий эксплуатации на изделие в среде САПР и прогнозирования технического ресурса узла, а также создания оптимальной структуры межремонтного периода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-15. – Введ.01.03.2017. – М.: Издательство стандартов, 2016. – 28 с.
2. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 560 с.
3. Ивашов, В. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: Учеб. пособие / Ивашов В. И.; СПб: ГИОРД, 2003. – Ч. 2. – 464 с.

УДК 921.9.06

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СКОРОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ

Горбунов В. П.¹, Тюшкевич В. В.²

- 2) Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь
- 2) ООО «Машиностроительное предприятие «Компо»;
г. Брест, Республика Беларусь

Современное технологическое оборудование, наряду с обеспечением качества выпускаемой продукции, должно обладать высокой производительностью, надежностью и требуемым уровнем автоматизации. Эффективное использование его является актуальной задачей для каждого предприятия. Сохранение начальных характеристик и безотказности работы оборудования обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта. Недостаточный уровень технического обслуживания может привести к серьезным экономическим потерям, связанными с незапланированными простоями. В этой связи важным является обеспечение технического ресурса за счет комплекса мер, применяемых на стадиях проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации оборудования. Решение этой проблемы открывает пути для научно обоснованного назначения ресурса, анализа и синтеза машин с учетом факторов надежности, для выбора конструктивных и технологических решений, обеспечивающих назначенные показатели долговечности.

В этой связи, наиболее актуальной становится проблема прогнозирования и обеспечения технического ресурса машин и конструкций [1]. Прогнозирование

ресурса на стадии проектирования позволяет обоснованно назначать график технического обслуживания, время межремонтного периода, а также срок службы узлов и деталей.

При определении ресурса важным является выбор выходного параметра машины и установление его предельных состояний, так как их величина определяет область работоспособности. Причиной изменения выходного параметра являются вредные процессы [2].

На рисунке 1 представлена схема потери работоспособности оборудования по предельному состоянию параметра, где:

$f(T)$ – закон распределения времени работы изделия до отказа;

$f(X_0)$ – закон распределения рассеивания параметров изделия в начальном состоянии;

A – рассеивание начальных параметров изделия;

1 – изменение среднего значения параметра под действием вредных процессов;

$2,3$ – изменение среднего значения параметра под действием вредных процессов со скоростью γ_2, γ_3 ;

4 – граница минимального изменения состояния параметра;

T_p – срок службы оборудования до отказа (ресурс);

$X_{\text{тек}}$ – текущее значение выходного параметра;

X_0 – начальное значение выходного параметра;

X_{max} – предельно допустимое значение параметра;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы;

$1 - P(t) = F(t)$ – вероятность отказа.

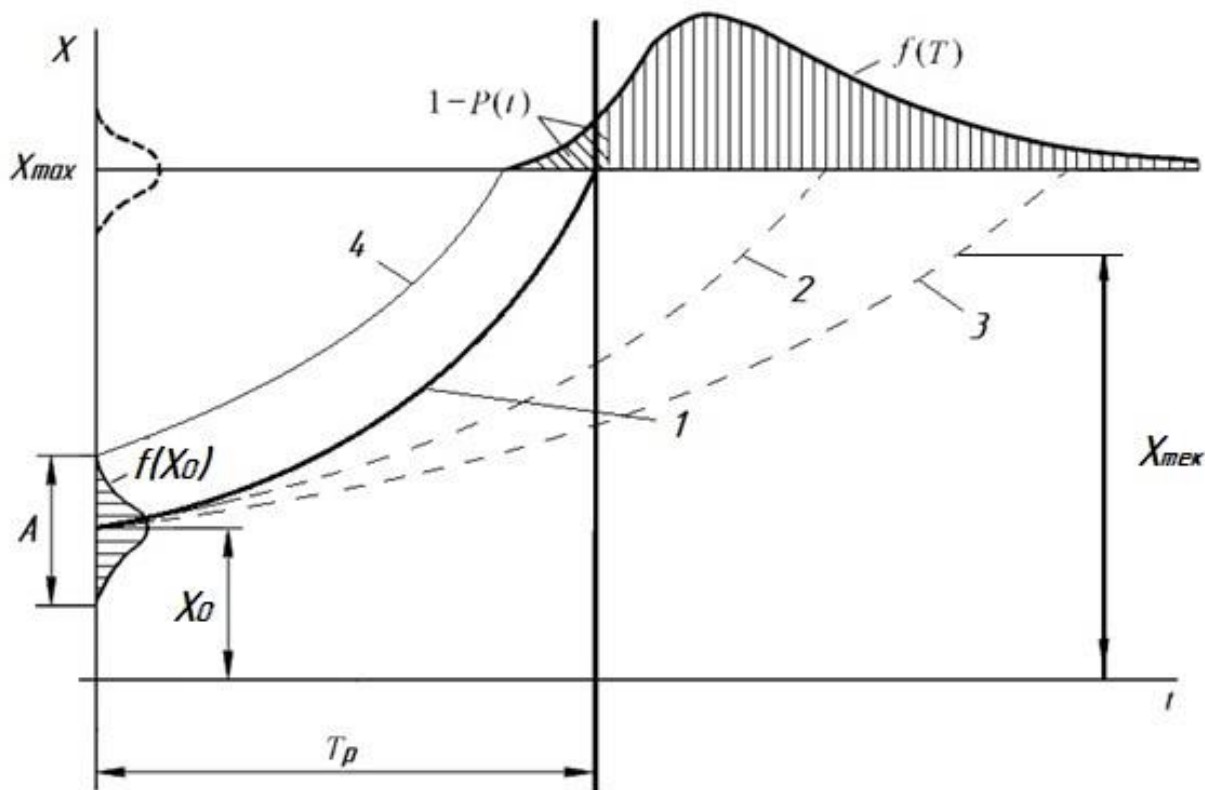


Рисунок 1 – Схема потери работоспособности по предельному состоянию параметра

В случае нормального закона распределения времени работы изделия до отказа вероятность безотказной работы по параметру X составит [3]:

$$P(t) = 1 - F(t) = 0,5 + \Phi \left[\frac{X_{max} - X_0 - \gamma_{cp} T}{\sqrt{\sigma_X^2 + (\sigma_\gamma)^2}} \right], \quad (1)$$

где Φ – нормированная функция Лапласа;

X_0 и σ_X – соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение рассеивания выходного параметра X нового изделия;

γ_{cp} – средняя скорость изменения параметра под действие вредных процессов X ;

σ_γ – среднее квадратическое отклонение изменения скорости;

T – продолжительность эксплуатации изделия.

Наибольшее влияние на потерю машиной работоспособности оказывают необратимые процессы, которые приводят к постепенному ухудшению выходного параметра. Это медленно протекающие процессы, к которым, как правило, относится изнашивание основных механизмов и деталей машины. Продолжительность времени работы машины зависит от величины скорости изнашивания лимитирующего элемента (узла). При линейной зависимости износа от времени величина скорости изнашивания примет вид:

$$\gamma = \frac{\Delta_{пр}}{T_{ср}}, \quad (2)$$

где $\Delta_{пр}$ – предельно допустимая величина износа, мм;

$T_{ср}$ – средний срок службы рассматриваемого изделия, ч.

В данной работе приведены рекомендации по созданию эффективного графика технического обслуживания и ремонта оборудования, а также методики прогнозирования ресурсов узла, деталей на примере шприца для наполнения колбасных оболочек фаршем, лимитирующим элементом конструкции которого являются опорные втулки винтов вытеснителя. Данные втулки выполняют роль подшипников скольжения, изготавливаются из композиционного материала на основе фторопласта и в процессе работы подвергаются интенсивному абразивному износу. Оборудование эксплуатируется при двухсменной работе с максимальной загрузкой и скоростью вращения привода. При плановом осмотре и обслуживании шприца производился замер фактического посадочного размера втулок с сравнением его с допустимым. Допустимая величина износа рассматриваемой поверхности равняется согласно техническим требованиям 0,2 мм.

Значения времени наработки до предельного состояния (ресурса) левых и правых опорных втулок представлены в таблице 1. Наблюдения проводились до и после проведения текущего ремонта, при котором была произведена замена шнеков, подшипников, втулок и расходных материалов. Согласно формулы 2 были определены скорости изнашивания измеряемых втулок и их средние значения.

Таблица 1 – Скорости изнашивания при предельно допустимом износе втулок $\Delta_{пр} = 0,2$ мм

№ втулки	Ресурс левых втулок T , ч	Скорость изнашивания левой втулки γ_l , мм/ч	Средняя скорость изнашивания левой втулки $\gamma_{ср}$, мм/ч	Ресурс правых втулок T , ч	Скорость изнашивания правой втулки γ_p , мм/ч	Средняя скорость изнашивания правой втулки $\gamma'_{ср}$, мм/ч
До текущего ремонта						
1	226	0,00088	0,0012	193	0,00104	0,0013
2	187	0,00107		152	0,00132	
3	155	0,00129		150	0,00133	
4	160	0,00125		154	0,00130	
5	133	0,00150		124	0,00161	
После текущего ремонта						
6	367	0,00054	0,00067	390	0,00051	0,00066
7	333	0,00060		333	0,00060	
8	320	0,00063		338	0,00059	
9	267	0,00075		255	0,00078	
10	239	0,00084		250	0,00080	

Из расчетов видно, что средняя скорость изнашивания $\gamma_{ср}$ для правой и левой втулки каждой из выборок практически одинаковые. Скорость изнашивания после текущего ремонта практически уменьшилась в два раза.

Используя зависимость 2, можно по требуемому ресурсу T_p задаваться необходимой скоростью изнашивания γ , что важно при конструировании изделия и выборе материала, а также возможно решение обратной задачи.

Так как величина времени наработки до отказа T величина случайная и характеризуется рассеиванием значений, то прогнозирование ресурса T_p необходимо вести с учетом показателя надежности $P(t)$ вероятности безотказной работы. Используя формулу 1 и задаваясь полученными при исследовании значениями выразим ресурс T_p через скорость изнашивания γ при $P(t) = 0,997$, $P(t) = 0,95$, $P(t) = 0,68$ (соответствующих квантилям распределения 3,2,1) получим среднее значение ресурса из зависимости:

$$T_p = \frac{K_p}{\gamma_{ср}}, \quad (3)$$

где K_p – коэффициент, учитывающий состояние параметров и степень риска потребителя. Значения представлены ниже при условии: $X_{max} = 20,25$ мм, $X_0 = 20,02$ мм, $\sigma_x = 0,03$ мм, $\Delta_{пр} = 0,2$ мм:

$P(t)$	0,997	0,995	0,68
K_p	0,2246	0,2218	0,2183

Проведенные исследования показали, что при существующей системе обслуживания технический ресурс втулок используется не полностью. Так, по существующей схеме технического обслуживания среднее время работы втулок после текущего ремонта составило 295 часов, а расчетная величина буде равна 340 часов (при $P(t) = 0,95$). Это приводит к увеличению издержек на предупре-

дительную замену деталей. Приведенные расчеты показали возможность сокращения количества и объема работ при техническом обслуживании шприца по замене втулок в межремонтном периоде, что в итоге позволяет уменьшить организационные и экономические затраты.

Выводы. Использование полученных зависимостей срока службы втулки от скорости изнашивания позволяет обоснованно назначать технический ресурс изделия, соизмеримый со степенью риска потребителя и изготовителя. Также на этапе проектирования оборудования на основании требуемых T_p или γ можно выбирать материал с требуемыми характеристиками.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций» / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. — 312 с.
2. Проников , А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 560 с.
3. Кочергин, А. И. Основы надежности металлорежущих станков / А. И. Кочергин. – Минск : Выш. школа, 1982. – 175 с.

УДК 621.9-05

МОБИЛЬНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Григорьев В. Ф., Дакало Ю. А.

Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Введение. Шумовые характеристики металлорежущих станков определяют экологическую обстановку в производственном помещении, а также состояние и качество изготовления деталей и узлов станков. Будучи акустическим проявлением вибрации, шум станков является важным показателем их динамического качества, свидетельствующим о наличии отклонений по геометрической точности деталей, участвующих в передаче движения. Повышенный шум при работе является диагностическим сигналом чрезмерного износа узлов и механизмов. Аттестованные шумомеры имеются далеко не на всех предприятиях.

Мобильные приложения современных устройств связи позволяют выполнять измерения и спектральный анализ шумов технологического оборудования в цеховых условиях [1].

Цель работы. Оценить возможности мобильных приложений устройств связи для оценки шумовых характеристик технологического оборудования.

Методы и средства оценки шумовых характеристик станков. В качестве стандартных основных шумовых характеристик станков установлены следующие [2, 3]: октавные и скорректированные уровни звуковой мощности; октавные уровни звукового давления и уровни звука на рабочем месте оператора.

При измерении шумовых характеристик обычно ограничиваются использованием скорректированной частотной характеристики А шумомера, моделирующей особенности восприятия шума человеческим ухом. В качестве аппаратуры

для измерения уровней звука и октавных уровней звукового давления используют шумомеры 2-го класса в соответствии с ГОСТ 17187-2010 «Шумомеры. Общие технические требования и методы испытаний».

При измерении уровней звуковой мощности процедура разбивается на два этапа:

1. Измерение уровней звукового давления в точках, располагающихся вокруг станка.

2. Производится пересчёт полученных данных, в соответствии с ГОСТ 33972.5 – 2016 «Нормы и правила испытаний металлорежущих станков. Часть 5. Определение уровня шума».

Нормируемыми параметрами шума станков являются уровни звуковой мощности L_p и скорректированный уровень звуковой мощности L_{pA} – при работе станков на холостом ходу и под нагрузкой.

Анализ характеристик мобильных приложений и шумомера-анализатора спектра. Современные мобильные устройства связи имеют полноценный шумоизмерительный тракт, а также вычислительные возможности для экспресс-определения шумовых характеристик [1]. Проанализировав характеристики приложений в свободном доступе, были выбраны следующие приложения для спектрального анализа шума: «Spectroid», «SPL-анализатор» и «Spectrum Analyzer».

«Spectroid» – это анализатор аудио спектра в реальном времени с разумным разрешением по частоте по всему частотному спектру. «Spectroid» работает с любыми звуковыми колебаниями, включая человеческий голос, выполняя над ними быстрое преобразование Фурье и разбивая их на частотные составляющие. Окно программы «Spectroid» показывает спектральный состав звука. Преобразование Фурье отражает спектр аудиосигнала в линейном масштабе, что может быть полезно при исследовании гармоник. Анализатор октавных частотных интервалов способен показывать спектры на 1/12, 1/6, 1/3 и полнооктавном разрешении. Преимущество состоит в том, что она может эффективно генерировать спектр, который лучше соответствует частотному разрешению восприятия звука человеком.

«Анализатор спектра звука» («SPL-анализатор») измеряет и анализирует уровень звукового давления (амплитуда в децибелах) и звуковой спектр частот в реальном времени (RTA) с использованием БПФ (быстрое преобразование Фурье). Данное приложение имеет следующие функции: измерение звукового давления; измерение АЧХ и спектральный анализ сигнала; возможность одно-временной работы с тремя источниками сигнала, на 3 каналах; отображение на экране формы и спектра сигнала; отображение на экране цифровых значений измеряемых величин.

«Spectrum Analyzer» – даёт данные спектра в реальном времени от микрофона устройства. Бесплатная версия продукта имеет следующие особенности: без рекламы; частота дискретизации 44100 Гц; максимальные частоты до 22050 Гц; возможность выполнять снимок экрана и передавать по Bluetooth и Wifi, а также сохранять на Google диск или на облако Mail.ru. Существует ряд недостатков бесплатной версии продукта: цвет графика не может быть изменен; нет никаких вариантов усреднения, таких как 1/3, 1/6 и т. д; отсутствует сглаживание октав; на некоторых устройствах изначально невозможно запустить программу.

Шумомер-виброметр, анализатор спектра «ЭКОФИЗИКА-110А» предназначен для измерения среднеквадратичных, эквивалентных и пиковых уровней звука, скорректированных уровней виброускорения, октавных, 1/3-октавных, 1/12-октавных и узкополосных спектров, для анализа сигналов различных первичных преобразователей? для регистрации временных форм сигналов с целью оценки влияния звука, инфра- и ультразвука, вибрации и иных динамических физических процессов человека на производстве, в жилых и общественных зданиях, определения виброакустических характеристик механизмов и машин, а также для научных исследований [4].

В таблице 2 приведены результаты сравнительного анализа характеристик шумомера «ЭКОФИЗИКА 110-А» 1-го класса точности и мобильных приложений. Анализ характеристик бесплатных версий мобильных приложений показывает, что выбранные приложения практически не уступают по возможностям шумомерам 1-го класса точности и могут использоваться для анализа шумовых характеристик технологического оборудования. Для исследований шумовых параметров станков было выбрано приложение «SPL-анализатор» по совокупности перечисленных выше характеристик.

Таблица 2 – Характеристики шумомера и мобильных приложений

Технические характеристики		Шумомер «ЭКОФИЗИКА-110А»	«Spectroid»	«Spectrum Analyzer»	«SPL Анализатор»
Диапазон измерения, дБ	A, дБА	22–139	30–140	22–139	22–139
	C, дБС	27–139	22–143	–	22–140
	Z, дБZ	31–139	–	–	–
Уровень собственных шумов при калибровочной поправке 0 дБ	A, дБА	12	18	24	12
	C, дБС	12	22	–	14
	Z, дБZ	15	–	–	–
Частотные фильтры		Октавный фильтр 1-16000 Гц	Октавный фильтр 31,5-16000 Гц	Октавный фильтр 31,5-12000 Гц	Октавный фильтр 30-14000 Гц
Динамический диапазон		≥100дБ	≥100дБ	≥100дБ	≥100дБ
Частотная коррекция		A,C,Z	A,C	A	A,C
Количество каналов измерения		1	1	1	3
Интерфейсы		Телеметрия; USB передача данных	Телеметрия, фотография экрана	Фотография экрана, передача данных по Bluetooth	Телеметрия, передача данных AUX, Bluetooth; фотография экрана

Испытания шума металлорежущих станков. Получены следующие результаты цеховых замеров уровня шума на холостом ходу токарно-винторезного станка КУСОН-3 с номинальной мощностью электродвигателя $P = 7,5$ кВт мобильным устройством с операционной системой «Android» и поверенным прибором «ЭКОФИЗИКА-110А».

Измерение уровня шума станка КУСОН-3 проводилось при частоте вращения шпинделя $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$. Другое оборудование, кроме проверяемого, в момент проведения измерений не работало. Микрофон располагался на расстоянии 1 м от контурной линии станка и 1,5 м от плоскости его фундамента.

Результаты измерений уровней звуковой мощности в октавных полосах до и после калибровки измерительного тракта мобильного устройства по результатам измерений шумомером «ЭКОФИЗИКА-110А» приведены в таблице 3. Спектрограммы уровней звуковой мощности испытываемого станка, полученные с помощью приложения «SPL-анализатор спектра звука», для указанных условий представлены на рисунке. Полученные в результате измерений значения сравнивались с допустимыми уровнями звуковой мощности L_p (таблица 3).

Как видно из таблицы 3, уровень звуковой мощности не превышает допустимых значений. Следует отметить, что испытания станка КУСОН-3 проводились не на максимальной частоте $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ввиду его изношенности.

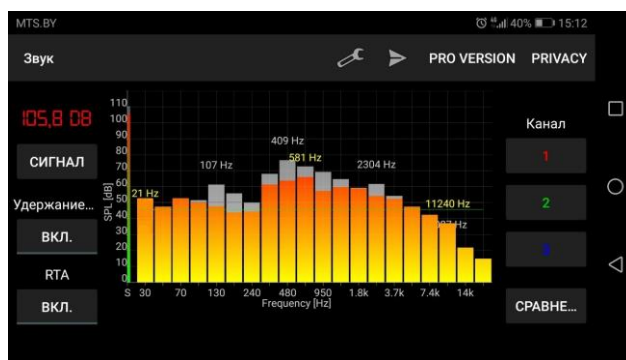


Рисунок – Спектрограммы уровней звуковой мощности станков КУСОН-3 после калибровки

Таблица 3 – Результаты измерений и допустимые значения шумовых характеристик станка КУСОН-3

Способ измерения	Уровни звуковой мощности L_p , дБА, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
«SPL-анализатор»	65	71	71	57	51	48	39	32	20
«SPL-анализатор» после калибровки	54	54	61	50	78	69	59	55	45
«ЭКОФИЗИКА-110А»	57	54	61	78	83	76	75	66	54
Допустимые значения по ГОСТ 33972.5-2016	95	95	95	95	95	92	90	88	86

Выводы. 1. Мобильные приложения устройств связи для спектрального анализа шума по своим возможностям соответствуют характеристикам шумомеров-анализаторов спектра 1-го класса точности по ГОСТ 17187-2010. 2. Разработана методика оценки шумовых характеристик оборудования с использованием приложения «SPL-анализатор спектра звука», как наиболее удобного. 3. Замеры шумов холостого хода станка КУСОН-3 показали принципиальную применимость методики для текущей оценки состояния оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьев, В. Ф. Оценка возможности применения мобильных устройств связи для проверки шумовых характеристик технологического оборудования / В. Ф. Григорьев, Ю. А. Дакало // ВЕСТНИК БрГТУ. – 2019. – №_4_(117): Машиностроение. – С. 39–42.
2. Машиностроение. Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование. / Б. И. Черпаков [и др.]. – Под ред. Б.И. Черпакова. – 2-е изд., испр. 2002. – Т. IV – 7 – 864 с.
3. Определение эквивалентных уровней звуковой мощности металлорежущих станков в процессе их эксплуатации. Методические рекомендации / Сост. М. П. Козочкин, В. Д. Кузнецов. М. : ЭНИМС, 1983. – 27 с.
4. Шумомер-вибромметр, анализатор спектра. ЭКОФИЗИКА-110А. Руководство по эксплуатации. ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ОКТАВА-ЭЛЕКТРОНДИЗАЙН» ООО «ПКФ Цифровые приборы», 2011.
5. Металлорежущие станки: учеб. пособие для вузов / Н. С. Колев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1980. – 500 с., ил.

УДК 621.833

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

Дакало Ю. А.¹, Ишин Н. Н.², Гоман А. М.², Скороходов А. С.²

1) Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

2) Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Введение. В основу предлагаемого методического подхода положен способ вибрационно-импульсной диагностики, по которому снимают параметры вибраций с диагностируемого подшипникового узла, из полученных данных выделяют информативные составляющие, в качестве которых служат амплитуды снятых параметров вибраций, определяют параметры динамической нагруженности, в частности амплитуды ударных импульсов, по которым с помощью расчетных зависимостей определяют величину радиального зазора в подшипнике. В результате получают расчетно-экспериментальные графические зависимости изменения радиального зазора в подшипнике во времени, по которым рассчитывают остаточный ресурс диагностируемого подшипника. Получаемые в процессе вибромониторинга данные по износу элементов подшипника могут быть использованы при принятии решений о продолжении эксплуатации подшипника, проведении мероприятий по техническому обслуживанию для поддержания работоспособности или замене подшипника.

Основная часть. Одним из основных параметров, характеризующих техническое состояние подшипникового узла, является радиальный зазор подшипника, по которому с достаточной вероятностью можно прогнозировать ожидаемый отказ. При этом изменение величины радиального зазора при работе машины удовлетворяет требованиям к диагностическому параметру, который может информировать о состоянии подшипника и о возможном приближении его к отказу.

При проведении диагностики результаты измерений величины радиального зазора подшипника необходимо сравнивать с номинальными и максимально допустимыми значениями для данного типа. Это позволяет выполнить практическую оценку фактического технического состояния подшипников и в условиях эксплуатации без демонтажа и разборки машины, своевременно осуществить техническое обслуживание или замену подшипников.

Наличие конструктивных радиальных зазоров в подшипниках качения обуславливает образование ударных импульсов. Вследствие того, что ось вала подшипника не остается неподвижной и совершает прецессию, вал сталкивается с телами качения и имеет место ударное взаимодействие, вызывающее вибрации в механизме. Соударения тел качения подшипника с дорожками качения характеризуются малой длительностью (порядка 10^{-4} с) и значительными по величине ударными силами, вызывающими возникновение дефектов в подшипниках: питтинг, отслаивание материалов, износ и др.

Процесс возникновения ударных сил при столкновении вала с телами качения (рисунок 1) происходит следующим образом:

- вследствие радиального зазора Δ при вращении положение вала устойчиво в течение промежутка времени, при котором он опирается на два тела качения;
- в момент времени, когда одно из тел качения достигает нижнего положения, внутреннее кольцо подшипника вместе с валом опрокидывается на следующее за ним тело качения.

Из-за радиального зазора радиус R_B дорожки качения внутреннего кольца (рисунок 1, а) меньше радиуса окружности R_{1B} , касающейся всех шариков [1]:

$$R_{1B} = R_B + \Delta.$$

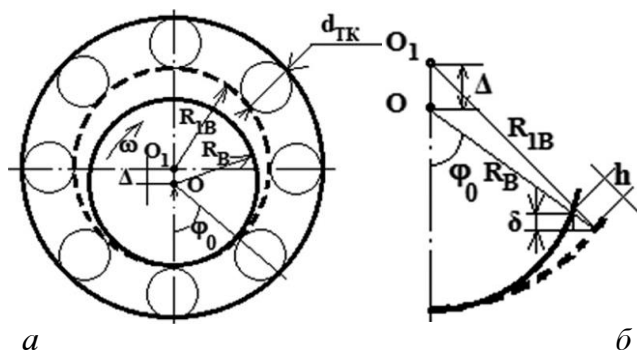


Рисунок 1 — Процесс возникновения ударных импульсов при столкновении вала с телами качения

Периодические падения вала и создают периодические ударные импульсы.

При падении внутреннее кольцо подшипника проходит расстояние h (см. рисунок 1, б):

$$h = \Delta(1 - \cos\varphi_0), \quad (1)$$

где $\varphi_0 = 2\pi/N$ — угловое расстояние между соседними телами качения,
 N — число тел качения.

Скорость вала, приобретенная к моменту удара, определяется из равенства кинетической энергии вала с закрепленными на нем телами работе радиальной силы. Кинетическая энергия вала в момент столкновения равна

$$T = \frac{MV_0^2}{2}, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2)$$

где M — масса вала с закрепленными на нем телами, кг;
 V_0 — скорость вала в момент удара, м/с.

Работа радиальной силы F , действующей на вал:

$$A = F \cdot \delta, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3)$$

где $\delta = h \cdot \cos \varphi_0$ (рисунок 1, б).

Из равенства выражений (2), (3) с учетом (1) находится скорость удара:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2F\Delta}{M}(1 - \cos \varphi_0) \cos \varphi_0} = \sqrt{\frac{2F\Delta}{M} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{N}\right) \cos \frac{2\pi}{N}}. \quad (4)$$

Для малых углов φ_0 можно принять, что

$$\cos \varphi_0 \approx 1, \quad 1 - \cos \varphi_0 \approx \varphi_0^2 / 2 \quad (5)$$

После подстановки (5) в (4) получим

$$V_0 = \varphi_0 \sqrt{\frac{F\Delta}{M}} = \frac{2\pi}{N} \sqrt{\frac{F\Delta}{M}}.$$

Основными параметрами ударного импульса являются амплитуда и время действия. Процесс ударного взаимодействия вала подшипника с телами качения показан на рисунке 2. Рассматривается упругий удар двух тел. Первое тело массой M (приведенная к подшипнику масса) ударяется со скоростью V_0 во второе тело массой m (тело качения). При этом имеет место центральный удар двух тел. Принимается, что масса тела качения существенно меньше массы вала: $m \ll M$.

Дифференциальное уравнение движение вала имеет вид:

$$M \ddot{\delta} = F - P(\delta_{\text{ш}}), \quad (6)$$

где P — контактная сила; $\delta_{\text{ш}} = \delta_1^{\text{ш}} + \delta_2^{\text{ш}}$ — сближение тел вследствие местного сжатия (δ_1 — сближение внутреннего кольца подшипника и тела качения; δ_2 — сближение тела качения и наружного кольца).

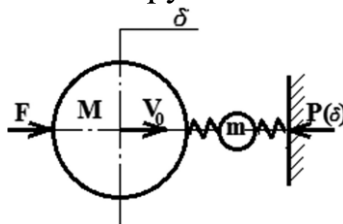


Рисунок 2 — Ударное взаимодействие вала с телом качения

Для шарикоподшипников, у которых имеет место контактное взаимодействие тел, ограниченных криволинейными поверхностями и соприкасающихся до деформации в одной точке, сближение тел определяется по формуле [2]:

$$\delta_{\text{ш}} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^2 n_{\delta i} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta_i^2 \sum k_i} \right) P^{\frac{2}{3}}, \quad (7)$$

где n_{δ} — коэффициент, входящий в выражение для сближения соприкасающихся тел;

η — упругая постоянная соприкасающихся тел, которая для одинаковых материалов равна

$$\eta = \frac{2(1 - \nu^2)}{E}, \quad (8)$$

где E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; Σk — сумма главных кривизн поверхностей соприкасающихся тел.

Из выражения (7) находится связь между контактной силой P и сближением тел $\delta_{\text{ш}}$:

$$P(\delta) = \lambda \delta_{\text{ш}}^{\frac{3}{2}}, \quad (9)$$

где

$$\lambda = \frac{2^{\frac{3}{2}}}{\left(\sum_{i=1}^2 n_{\delta i} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta_i^2 \sum k_i} \right)^{\frac{2}{3}}}. \quad (10)$$

Проинтегрировав и проведя ряд преобразований уравнение для определения $\delta_{\text{шmax}}$ примет вид:

$$\delta_{\text{шmax}}^{\frac{5}{2}} - \frac{5F}{2\lambda} \delta_{\text{шmax}} - \frac{5MV_0^2}{4\lambda} = 0 \quad (11)$$

или с учетом (4)

$$\delta_{\text{шmax}}^{\frac{5}{2}} - \frac{5F}{2\lambda} \delta_{\text{шmax}} - \frac{5F\Delta}{2\lambda} (1 - \cos \varphi_0) \cos \varphi_0 = 0. \quad (12)$$

Выразив Δ из (12), получим формулу для определения радиального зазора в подшипнике

$$\Delta = \frac{2\lambda \left(-\delta_{\text{шmax}}^{\frac{5}{2}} + \frac{5F}{2\lambda} \delta_{\text{шmax}} \right)}{5F(1 - \cos \varphi_0) \cos \varphi_0}, \quad (13)$$

С учетом того, что амплитуда ударного импульса равна

$$P_{\text{max}} = \lambda \delta_{\text{шmax}}^{\frac{3}{2}}, \quad (14)$$

$$\delta_{\text{шmax}} = \left(\frac{P_{\text{max}}}{\lambda} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (15)$$

Подставив (15) в (13), получим

$$\Delta = \frac{2\lambda \left(-\left(\frac{P_{\text{max}}}{\lambda} \right)^{\frac{5}{3}} + \frac{5F}{2\lambda} \left(\frac{P_{\text{max}}}{\lambda} \right)^{\frac{2}{3}} \right)}{5F(1 - \cos \varphi_0) \cos \varphi_0} = \frac{-2\lambda \left(\frac{P_{\text{max}}}{\lambda} \right)^{\frac{5}{3}} + 5F \left(\frac{P_{\text{max}}}{\lambda} \right)^{\frac{2}{3}}}{5F(1 - \cos \varphi_0) \cos \varphi_0}. \quad (16)$$

Типичный вид протекания процесса изнашивания подшипника качения во времени содержит три периода (рисунок 3): I – приработка, II – установившийся износ, III – ускоренный (катастрофический) износ [3]. Ресурс работы подшипника T_p определяется предельным значением радиального зазора $\Delta_{\text{пр}}$.

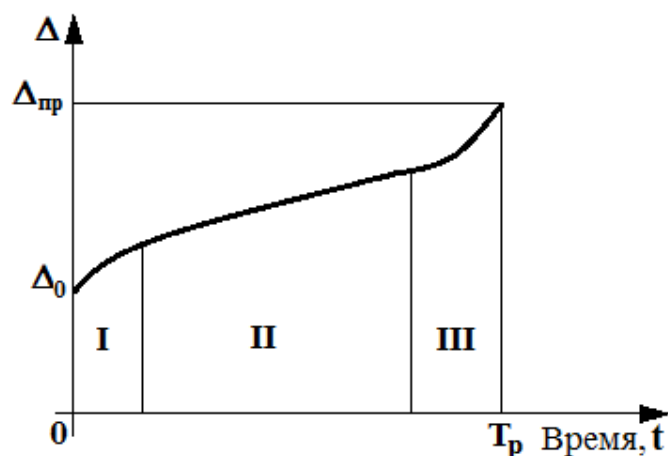


Рисунок 3 — Периоды изнашивания подшипника качения

Началу эксплуатации подшипника после его приработки соответствует величина начального радиального зазора Δ_0 (времени t_0).

Суть решения поставленной задачи заключается в определении величины промежутка времени (остаточного ресурса работы подшипника), за который величина радиального зазора достигнет предельного значения $\Delta_{пр}$.

Достаточная точность расчета остаточного ресурса достигается в предположении, что величина радиального зазора в подшипнике при эксплуатации изменяется во времени по линейному закону.

В первом приближении можно считать, что на этапе установившегося износа (участок II) скорость изменения зазора в подшипнике качения определяется по формуле:

$$v_{\Delta} = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad (17)$$

где t_{i-1} и t_i – время предыдущего и последующего замеров амплитуд виброимпульсов; Δ_{i-1} и Δ_i – рассчитанные по формуле (16) величины радиальных зазоров.

В этом случае зависимость (16) позволяет по экспериментально определенным амплитудам ударных импульсов (P_{max}) рассчитать величины радиальных зазоров в подшипниках качения в эксплуатационных условиях.

Остаточный ресурс подшипника находится из выражения:

$$t_{ост} = \frac{\Delta_{пр} - \Delta_i}{v_{\Delta}}. \quad (18)$$

Заключение. Предложенный методический подход к эксплуатационной оценке остаточного ресурса подшипников качения по результатам вибромониторинга ударных импульсов позволяет перейти от планово-предупредительного обслуживания подшипниковых узлов механизмов и машин к обслуживанию по фактическому техническому состоянию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поддубко, С. Н. Вибрационно-импульсный метод оценки технического состояния подшипников качения. Расчёт параметров ударных импульсов / С. Н. Поддубко [и др.] // Международный научно-технический журнал «Механика машин, механизмов и материалов». – Минск, 2019. – Выпуск №1(46): Общие проблемы механики– С. 5-12.

2. Прочность, устойчивость, колебания: справ. в 3 т. / под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. – М. : Книга по требованию, 2012. – Т. 2. – 463 с.
3. Мигаль, В. Д. Техническая диагностика автомобилей: справочное пособие: в 6 т. / В. Д. Мигаль. – Х.: Майдан, 2012. – Том 6: Диагностическое обеспечение технической и экологической безопасности. – 538 с.
4. Комплексный контроль и повышение качества зубчатых приводных механизмов для машиностроения / О.В. Берестнев [и др.]. — Минск : БелГИСС, 2009. – 115 с.
5. Поддубко, С. Н. Вибрационно-импульсный метод оценки технического состояния подшипников качения. Исследование параметров ударных импульсов при изнашивании элементов подшипника. / С. Н. Поддубко [и др.] // Международный научно-технический журнал «Механика машин, механизмов и материалов» – Минск, 2019 – Выпуск № 2(47): Общие проблемы механики. – С. 5–13.

УДК 621.113

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

Кострицкий В. В.

Полоцкий государственный университет;
г. Новополоцк, Республика Беларусь

Введение. К настоящему времени все производимые автомобили оборудуются электронными системами управления двигателем (ЭСУД). ЭСУД управляет работой современного двигателя внутреннего сгорания, которая позволяет добиться высоких технико-экономических показателей работы ДВС [1].

В процессе эксплуатации в конструктивных элементах ЭСУД, как и в любой другой системе автомобиля, неизбежно возникают различные неисправности (нарушение регулировок, изменение электрических характеристик, коррозионное разрушение контактов, повреждение изоляции и т. д.). Это влечет за собой ухудшение выходных параметров работы ДВС (мощности, топливной экономичности, выбросов вредных веществ с отработавшими газами) и, в конечном счете, приводит к частичной или полной потере им работоспособного состояния [2].

Для предупреждения отказов и обеспечения заданного уровня эксплуатационной надежности ЭСУД при проведении регламентных работ технического обслуживания (ТО) автомобилей целесообразно контролировать состояние конструктивных элементов этой системы и при необходимости устранять в них возникшие повреждения. При этом заводами-изготовителями при проведении регламентных ТО рекомендуется проверять лишь коды неисправностей в памяти электронного блока управления двигателя (ЭБУД) и только при их наличии выполнять необходимые контрольно-диагностические операции. При отсутствии в ЭБУД кодов неисправностей ЭСУД признается технически исправной и дополнительные проверки не проводятся. В большинстве случаев коды неисправностей не указывают конкретно на неисправный элемент, а указывают на отклонения допустимого диапазона параметров ЭСУД [3]. Кроме того, отклонения значений параметров в элементах ЭСУД, не превышающие предельные значения

значительно ухудшают показатели экономичности, динамичности и экологичности двигателя внутреннего сгорания. Такие неисправности ЭСУД носят скрытый характер и наиболее сложны, и трудоёмки в определении. В статье предложен метод определения состояния элементов ЭСУД, который позволяет повысить эффективность диагностирования.

Основная часть. ЭСУД состоит из блока управления, датчиковой аппаратуры и исполнительных механизмов. Для удобства электронную систему управления бензинового двигателя можно разбить на 3 основные подсистемы: система подачи воздуха, система подачи топлива и система зажигания. В каждую из этих подсистем будет входить соответствующий набор датчиков и исполнительных механизмов, который отвечает согласно логике построения ЭСУД непосредственно за работоспособность конкретной подсистемы. Например, типичная система управления бензиновым двигателем с распределенным впрыском сгруппированная предложенным способом представлена на рисунке 1.

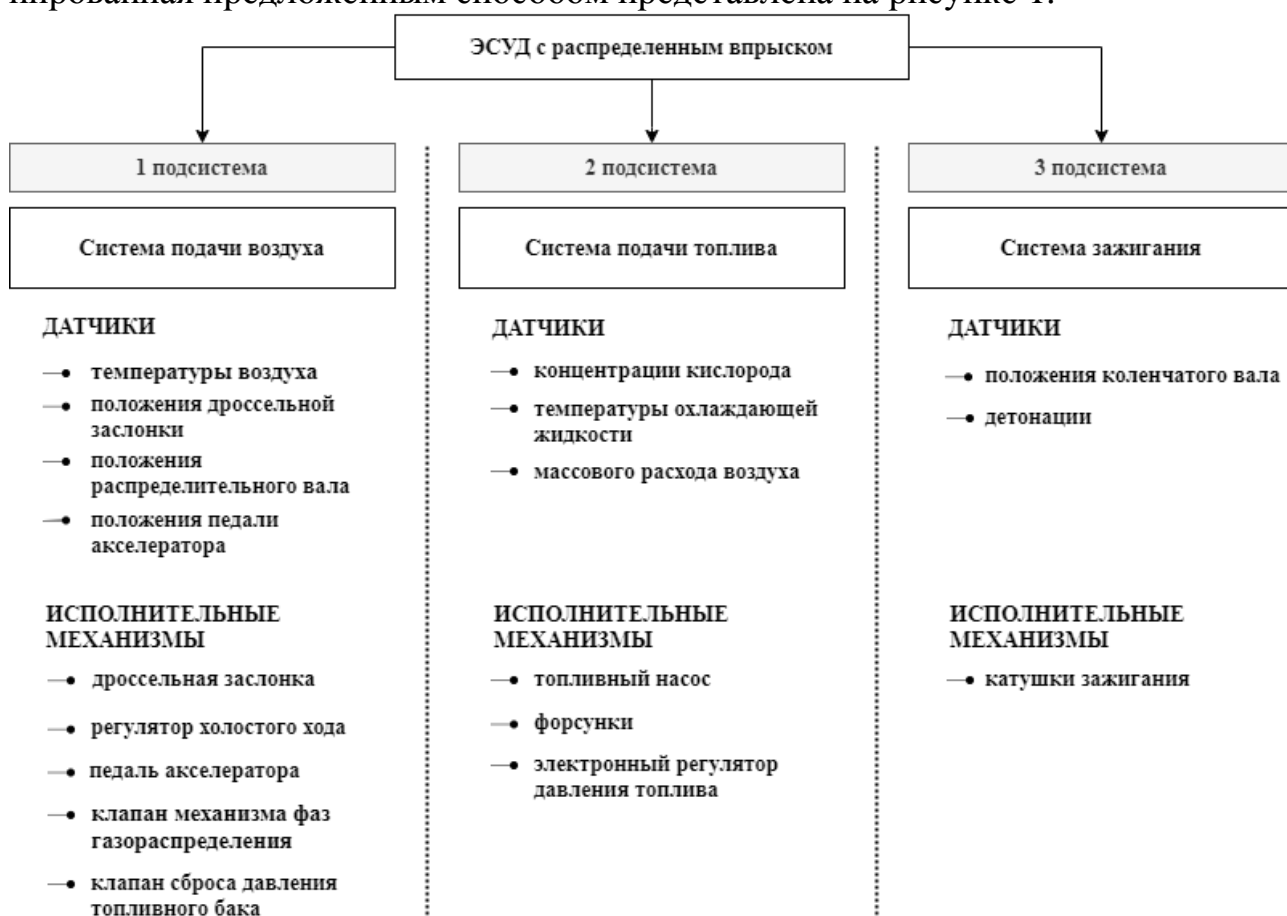


Рисунок 1 – Подсистемы ЭСУД с распределенным впрыском

Сложность диагностирования ЭСУД заключается в том, что каждый из элементов имеет свою методику проверки, поэтому процесс контроля весьма длительный и трудоёмкий. Кроме того, требует широкий перечень контрольно-диагностического оборудования и технической документации.

В результате полученный массив диагностических параметров сложно проанализировать и выявить связи между признаками неисправности и конкретным элементом ЭСУД. Поэтому для упрощения диагностирования предлагается сформировать три группы диагностических параметров:

- 1-я группа. Диагностические параметры первого порядка;
- 2-я группа. Диагностические параметры второго порядка;
- 3-я группа. Диагностические параметры третьего порядка.

К *диагностическим параметрам первого порядка* следует отнести такие параметры, как мощность двигателя, расход топлива и качество отработавших газов (содержания в отработавших газах компонентов CO, CH, O₂, NO). В эту группу параметров можно отнести и коды неисправностей, записываемые в памяти ЭБУД.

Изменение мощности и расхода топлива во время эксплуатации выявить достаточно сложно и за частую способы их определения и расчеты носят приближенный характер. Однако по косвенным субъективным признакам (ухудшение динамики разгона, снижение тяги и т. д.) можно предположить об снижении мощности двигателя, а среднее значение расхода топлива является неотъемлемым параметром бортового компьютера любого современного автомобиля. А вот качество отработавших газов носит объективный характер и определяется газоанализатором по содержанию таких компонентов, как CO, CH, O₂ и NO. Для выявления кодов неисправностей используют различные диагностические системы (Launch X431 Pro, Bosch KTS, Autocom, Autel и т. д.).

Параметры первого порядка являются общими для всех подсистем. Ухудшение этих параметров является первичным признаком наличия неисправностей элементов ЭСУД и предполагает переход к рассмотрению 2-ой группы параметров.

Вторая группа параметров – *диагностические параметры второго порядка*. Это комплексные диагностические параметры, каждый из которых отражает техническое состояние конкретной подсистемы в целом. Количество таких параметров будет равным количеству подсистем ЭСУД. Соответственно для приведенного выше примера системы управления бензиновым двигателем с распределенным впрыском к таким параметрам относятся:

- давление воздуха во впускном коллекторе $P_{вп}$, мбар;
- длительность импульса открытия форсунки $t_{впр}$, мс;
- угол опережения зажигания, $k_{оз}$, °.

Выбор параметра второго порядка для подсистемы может быть осуществлен в частном порядке в зависимости от конкретной электронной системы. Но этот параметр должен быть высокочувствительным к изменению технического состояния элементов подсистемы. Кроме того, быть однозначным т. е. монотонно изменяться в зависимости от происходящих изменений технического состояния элементов подсистемы, а также стабильным – обладать постоянством значений при многократных измерениях одинаковых элементов в одном и том же техническом состоянии.

Предельные значения этих параметров устанавливаются по результатам испытаний ЭСУД на заводах-изготовителях. Наступление предельных значений параметров второго порядка влияет на показатели параметров первого порядка и предполагает возникновения в памяти ЭБУД соответствующего кода неисправности.

Однако в ходе испытаний было выявлено, что в пределах (текущих) допустимых значений параметров второго порядка наступает такое техническое состояние элементов ЭСУД, которое приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик ДВС, т.е. к изменениям параметров первого порядка, но при этом коды неисправности в памяти ЭБУД не записываются или носят не постоянный харак-

тер. Такое состояние ЭСУД является наиболее сложным с точки зрения постановки диагноза и выявления неисправности конкретного элемента. А такие значения параметров второго порядка можно назвать *условно допустимыми*.

Определение условно допустимых значений параметров предполагает наличие закономерностей их изменения по наработке. Такие закономерности можно получить по результатам исследований эксплуатационной надежности подсистем в эксплуатации и с достаточной степенью точности описать степенной функцией [2]:

$$S(t) = S_n + vt^\alpha,$$

где S_n – номинальное значение диагностического параметра S ; v – интенсивность изменения параметра; α – показатель степени, определяющий характер и степень зависимости диагностического параметра от наработки t .

Зная периодичность регламентного обслуживания автомобиля t_0 , величину предельного норматива S_n и интенсивность изменения параметра по наработке v , условно допустимое значение параметра определяется по формуле:

$$S_d = v \left(\sqrt[\alpha]{\frac{S_n}{v}} - t_0 \right).$$

Как показали выполненные исследования, значения параметров второго порядка в пределах условно допустимых значений свидетельствует о том, что в той подсистеме ЭСУД, к которой относится параметр второго порядка имеется неисправный элемент. При чем неисправным элементом может быть как исполнительный механизм, так и датчик.

Если же значение параметра первого порядка имеет отклонение, а значение параметра второго порядка находится в пределах допустимых значений, то неисправным является исполнительный механизм ЭСУД.

Для получения параметров второго порядка используют различные средства диагностирования. Например, для определения значения давления воздуха во впускном коллекторе используется вакуумметр, для определения длительности импульса открытия форсунки применяется осциллограф, а для определения угла опережения зажигания либо диагностическая система, либо стробоскоп.

К третьей группе относятся параметры, которые непосредственно характеризуют элементы ЭСУД. Эти параметры получили название *параметры третьего порядка*. Для датчиковой аппаратуры этими параметрами являются выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ и выходную силу тока $I_{\text{вых}}$ на сигнальном выводе, а для исполнительных механизмов – управляющие напряжение $U_{\text{упр}}$ и управляющий ток $I_{\text{упр}}$.

Значения параметров третьего порядка определяются путём выявления закономерностей изменения напряжения и силы тока на различных режимах работы двигателя и сравнении их с эталонными. Для получения параметров третьего порядка используется осциллограф или мотортестер.

Алгоритм диагностирования ЭСУД предложенным методом представлен на рисунке 2.

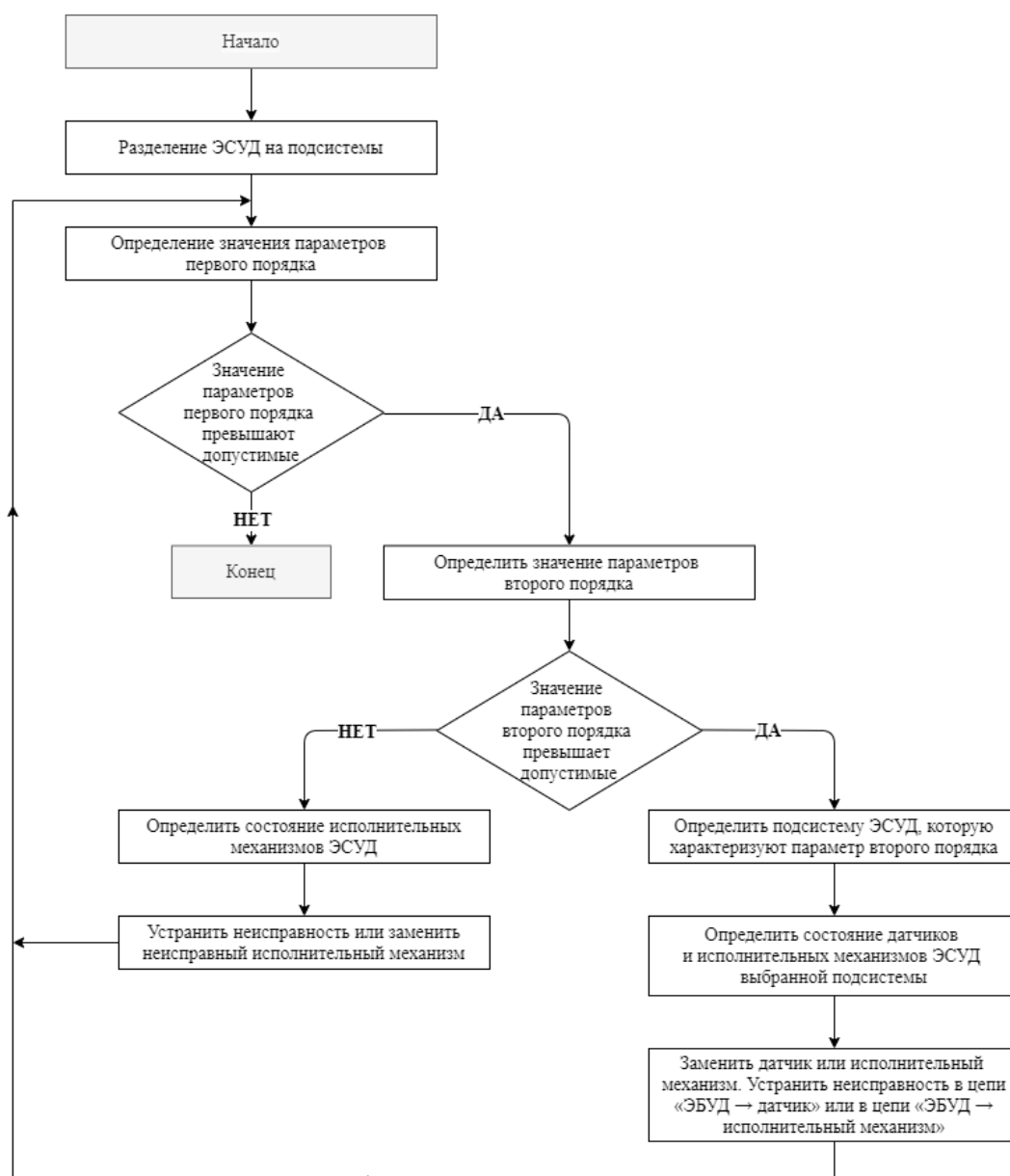


Рисунок 2 – Алгоритм диагностирования ЭСУД

Заключение. Разработанный метод повышает эффективность диагностирования ЭСУД на 25 % путем оптимизации количества контрольно-диагностических операций, а также обеспечивает выполнение операций с наименьшим коэффициентом повторяемости. Это значительно сокращает трудоёмкость, затраты на обнаружение, локализацию и устранение возникших в ЭСУД неисправностей и обеспечивает тем самым высокий уровень ее надежности в эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов, Ю. В. Основы теории надежности машин: учебное пособие для вузов / Ю. В. Баженов. М.: ФОРУМ, 2014. – 320 с.
2. Баженов, Ю. В. Поддержание надежности электронных систем управления двигателем в эксплуатации / Ю. В. Баженов, В. П. Каленов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 2. – с. 2–5.
3. Тюнин, А. А. Диагностика электронных систем управления двигателями легковых автомобилей: учебное пособие / А. А. Тюнин. М. : Солон-Пресс, 2017. – 352 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ УБОЯ И РАЗДЕЛКИ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА

Ляшук Н. У., Дакало Ю. А., Лазарук В.Р., Заречный Я.О.

Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Введение. В Республике Беларусь на Оршанском мясоконсервном комбинате по Указу президента строится мясожировой цех. ООО «Фина» завершает поставку оборудования для этого цеха, а также монтажные и пусконаладочные работы технологических линий убоя и разделки крупного рогатого скота (далее – ТЛ КРС) производительностью 30 голов в час и свиней производительностью 80 голов в час.

При выполнении этих работ спроектирована ТЛ КРС производительностью 30 голов в час, а также основное и вспомогательное технологическое оборудование, входящее в состав данной линии. ТЛ КРС такой производительности применяются на мясожировых производствах и в цехах мясокомбинатов средней мощности [1]. Данный мясожировой цех построен по проекту ОАО «Институт Белгипроагропищепром», для которого предприятием ООО «Фина» был разработан полный технологический цикл убоя крупного рогатого скота (КРС).

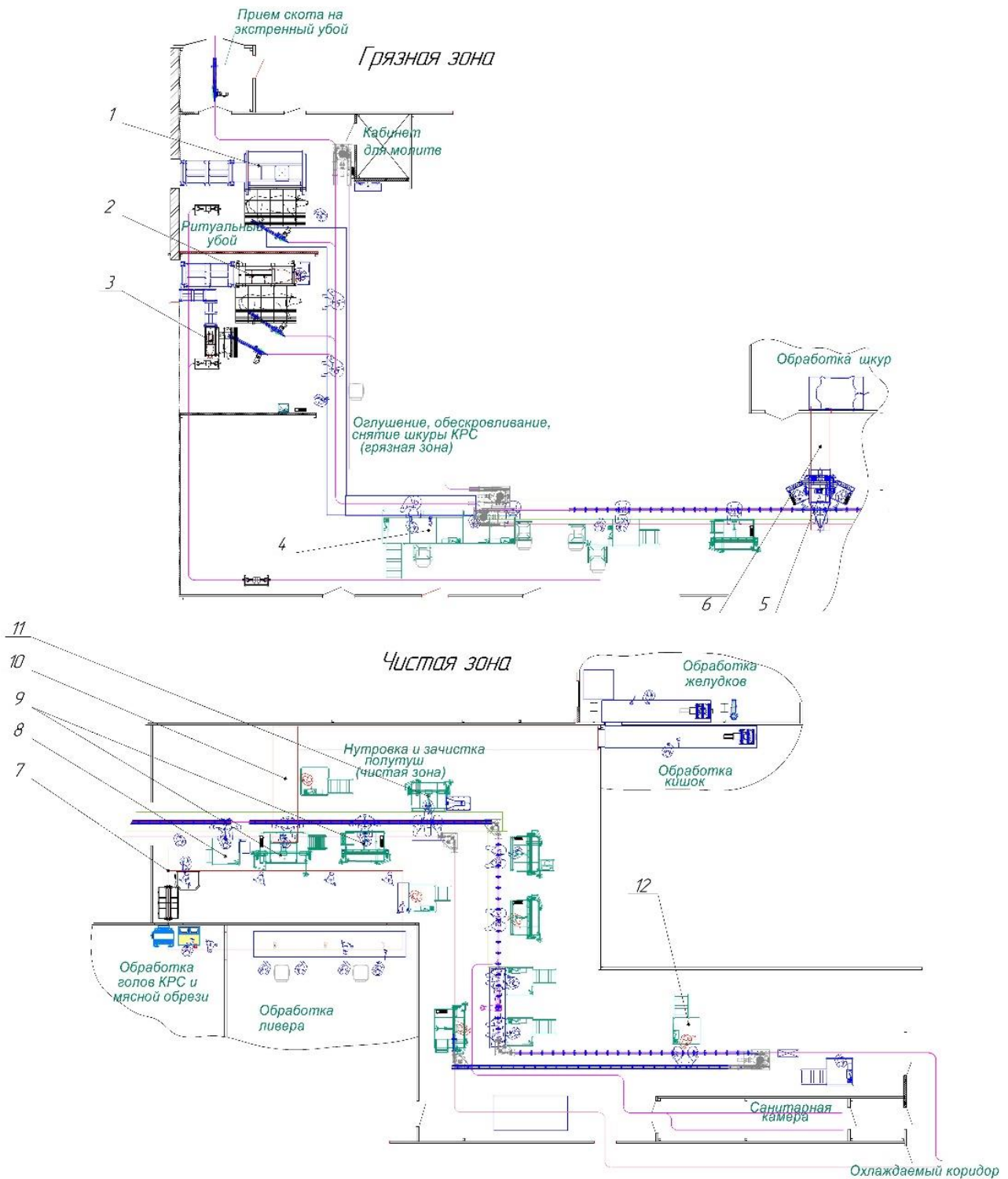
Основная часть. Схема линии представлена на рисунке 1. Технологическое оборудование в данной линии применяется более сложное, чем в линиях меньшей производительности и оснащено средствами механизации вспомогательных операций. На данной ТЛ можно осуществлять убой и разделку КРС по традиционной технологии и по технологии «халяль», а также убой и разделку мелкого рогатого скота (МРС). Поэтому участок оглушения оснащен тремя боксами. Подъем туш от каждого бокса осуществляется индивидуальным подъемником элеваторного типа. Туши и полутуши по подвесному пути транспортируются с помощью подвесных конвейеров [2, 3].

В ТЛ предусмотрен сбор пищевой крови с помощью оригинального вакуумного аппарата полого ножа и электронной системы управления и технической крови. Техническая кровь собирается в ванну, откуда перекачивается с помощью насосов в специальные емкости.

Туши с пути на еврокрюки перевешиваются с помощью элеваторной части повесного пути, оснащенной пневмоцилиндром. Съем шкуры производится гидравлической шкуроеъемной машиной барабанного типа.

Все рабочие места в «чистой» зоне оснащены пневматическими подъемно-опускными площадками, в состав каждой площадки входит мойка, стерилизатор инструмента и мойка фартуков.

Транспортирование белых органов от позиции нутровки к позиции ветеринарной инспекции и далее на участок их обработки производится с помощью системы ленточных транспортеров, оснащенных стерилизаторами лент, а транспортирование голов и красных органов производится с помощью подвесных конвейеров, оснащенных крюками и стерилизаторами.



1 – бокс для уоя КРС по технологии Халяль; 2 – бокс оглушения КРС;
 3 – бокс оглушения МРС; 4 – площадка перевески туш; 5 – шкуроемная машина;
 6 – конвейер для транспортировки туш; 7 – подвесной транспортер для голов
 и печени; 8 – стационарная площадка для распиловки грудины; 9 – подъемно-опускная
 площадка для нутровки; 10 – конвейер для белых органов;
 11 – подъемно-опускная площадка для распиловки туш на полутуши; 12 – стационар-
 ная площадка финальной экспедиции
 Рисунок 1 – Технологическая линия уоя и разделки крупного рогатого скота произ-
 водительностью 30 голов в час

Привод подвесных конвейеров осуществляется с помощью пневмоцилиндров. Что по сравнению с электромеханическим приводом надежнее в условиях высокой влажности.

Недостатком такого проекта является то, что конвейера для транспортирования белых, красных органов и голов работают в разных направления и их работу невозможно синхронизировать с работой основных конвейеров. Кроме того производственное помещение перегорожено конвейерами, которые затрудняют передвижение бойцов. Поэтому специалистами ООО «ФИНА» разработан проект ТЛ КРС, в котором все конвейера движутся параллельно и синхронно до окончательной ветинспекции, а дальше продукты убоя транспортируются на участки обработки с помощью беспилотных автоматических тележек. Подробно об этом проекте будет информация в следующем номере.

Специалисты ООО «Фина» провели конструкторские работы и изготовили технологическое оборудование, входящее в линию.

Так были сконструированы и изготовлены боксы для традиционного оглушения КРС и МРС, бокс ритуального убоя, подъемно-опускные площадки, транспортеры, шкуроръемная машина, установка для сбора пищевой крови, конвейер возврата евро-крюков, машина для мойки евро-крюков и др.

Рассмотрим конструкцию и принцип работы машин, входящих в линию.

Конструкция бокса (рисунок 2) для традиционного оглушения КРС позволяет осуществлять надежную фиксацию туловища и головы животного, механическую выгрузку туши, быстрое приведение бокса в исходное положение для следующего цикла обездвиживания, легкое и надежное открывание и закрывание входной калитки в бокс. Бокс прост в эксплуатации, надежен.

Бокс (рисунок 2) состоит из сварного каркаса, боковой, подгоняющей, выгружающей, задней и передней дверей, пневмоцилиндров.

Обслуживающий персонал управляет боковой, подгоняющей, выгружающей, задней и передней дверьми с помощью пульта управления, расположенного на площадке около бокса.

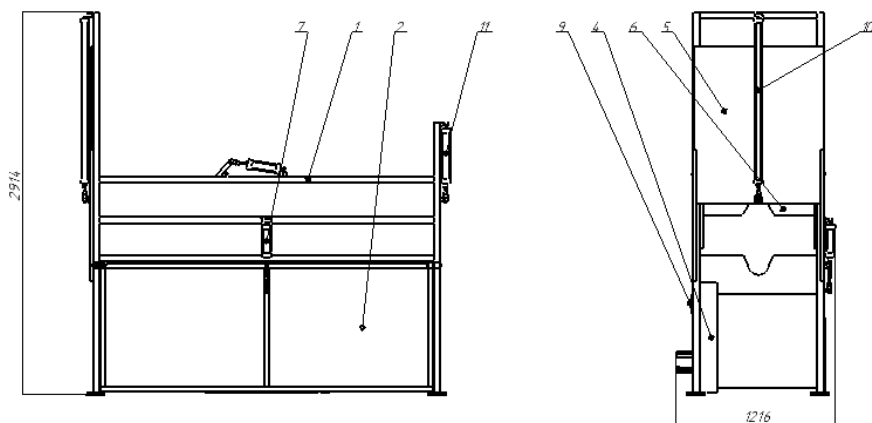


Рисунок 2 – Общий вид бокса: 1 – каркас; 2, 3, 4, 5, 6 – дверь; 7, 8, 9, 10, 11 – пневмоцилиндр

Бокс для оглушения МРС по конструкции и принципу действия аналогичен боксу для КРС.

Сбор пищевой крови производится с помощью передвижной установки (рисунок 3). Основными составными частями установки для сбора пищевой крови

(рисунок 3) являются каркас с обшивками и резервуарами, крышки, узел приводной, вакуумный насос. Каркас установлен на колесных опорах (2 поворотных и 2 неповоротных), что позволяет беспрепятственно перемещать установку в пределах производственного помещения. К трубе каркаса посредством хомута крепится шланг с полым ножом. Через шланг кровь подается в резервуар каркаса. За счет действия вакуумного насоса кровь проходит вниз к выходному отверстию резервуара, закрытому посредством крана. При открытии клапана крана продукт из резервуара подается к выходному отверстию трубопровода и далее к шлангу, установленного на гребенке, соединенной с трубой быстроразъемным соединением.

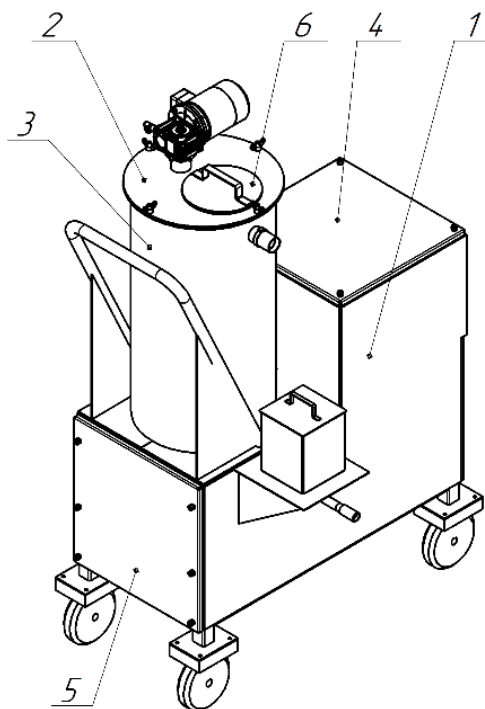


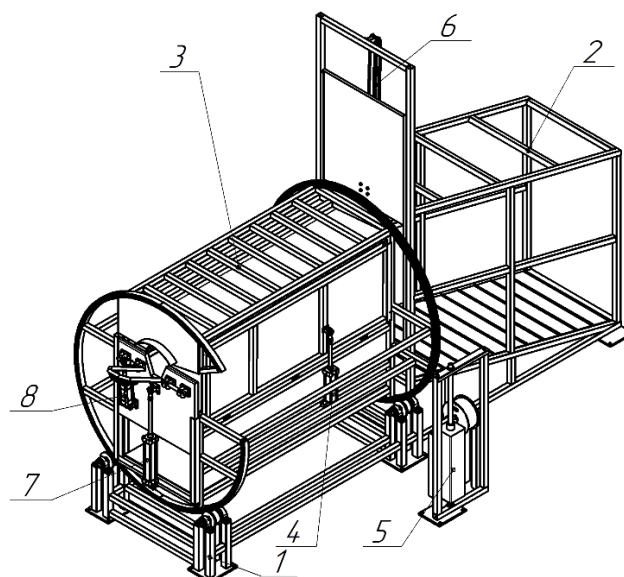
Рисунок 3 – Общий вид установки: 1 – каркас; 2, 4, 5 – крышка; 3 – резервуар; 6 – узел приводной

В емкость заливается цитрат и по мере необходимости вручную подается через трубопровод.

Была разработана также конструкция бокса ритуального убоя. Конструкция позволяет осуществлять механическую выгрузку туши, быстрое приведение бокса в исходное положение для следующего цикла обездвиживания, легкое и надежное открывание и закрывание входной калитки в бокс. Бокс прост в эксплуатации, надежен. Бокс (рисунок 4) состоит из сварного каркаса основания с роликами, эстакада, непосредственно бокса, поворотной установки и троса.

Обслуживающий персонал управляет пневмоцилиндрами с помощью пульта управления с джойстиком, расположенного на площадке около бокса. Животное загоняют в бокс по специальному трапу эстакады. Дверь бокса, через которую загоняют животное, имеет направляющие для перемещения. Дверь открывается, закрывается и фиксируется с помощью пневмоцилиндра.

Животное в боксе прижимается до попадания головы в механизм захвата. Для обеспечения надежной фиксации головы животного применяется специальный шейный упор и коромысло, также снабженные пневмоцилиндрами соответственно.



1 – каркас основания; 2 – эстакада; 3 – бокс; 4, 5, 6, 7, 8 – пневмоцилиндр
 Рисунок 4 – Общий вид бокса

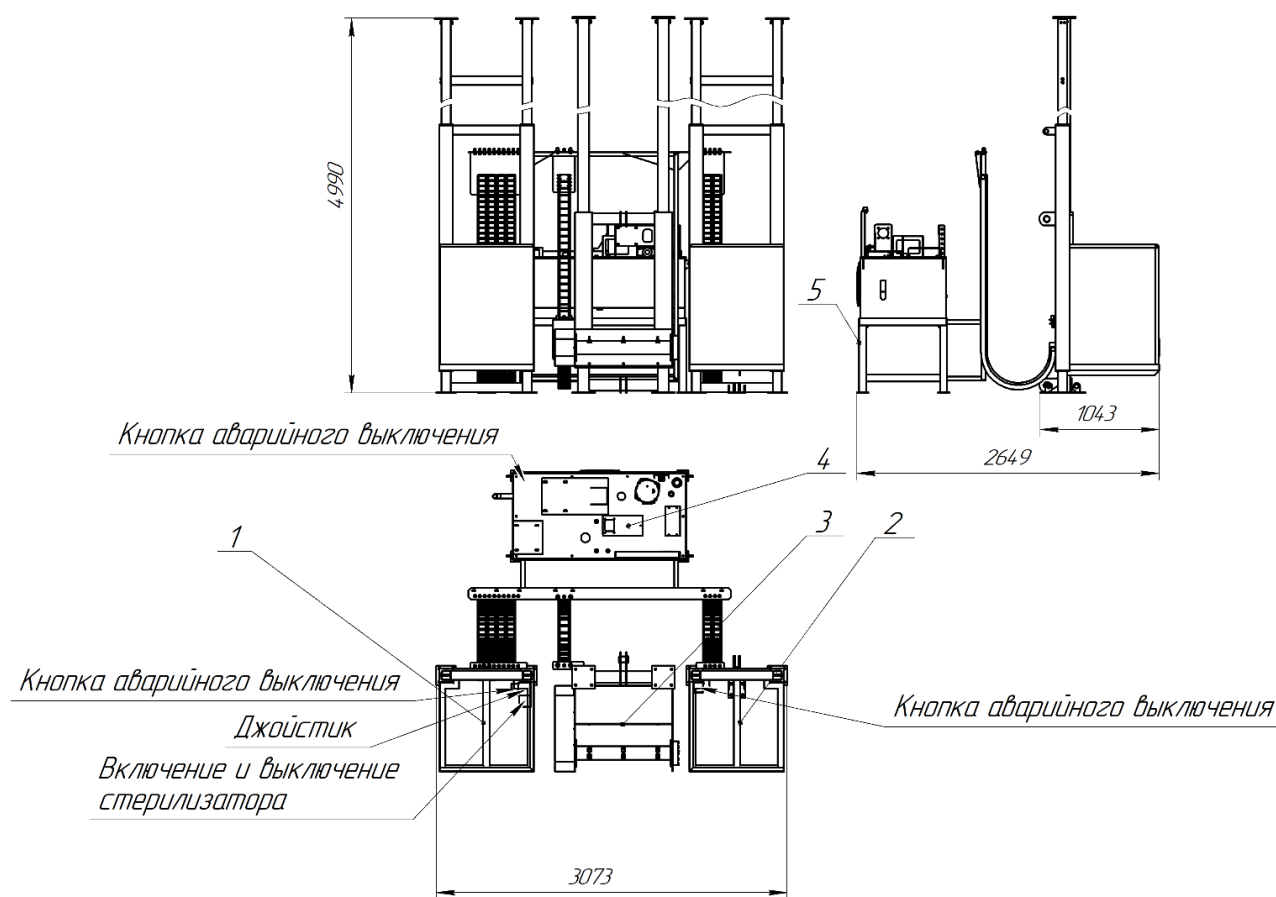
Во время ритуального убоя каркас бокса с зафиксированным животным поворачивается на 180° вокруг горизонтальной оси тросом с помощью пневмоцилиндра и зубчато-реечной передачи поворотной установки, при этом животное располагается в наиболее удобном положении для ритуального убоя. После тщательного обескровливания животного подается команда на выгрузку. При этом стенка левая открывается с помощью пневмоцилиндра. Далее осуществляется выгрузка животного боковой стенкой правой с помощью пневмоцилиндра и животное по спуску попадает на приемную плиту, изготовленную из нержавеющей стали. Далее бокс возвращается в исходную позицию, цикл повторяется.

Конструкция бокса запатентована и отличается от аналогов тем, что для поворота бокса на 180° применяется не электромеханический привод и зубчатую передачу, а пневматический привод. Это значительно упрощает конструкцию и снижает стоимость изделия, а также упрощает техническое обслуживание при эксплуатации, так как исключается применение электродвигателя в зоне санитарной обработки.

Также в процессе выполнения данных работ для предприятия ООО «Могилевский мясокомбинат» была разработана конструкция и изготовлена гидравлическая шкуроръемная машина производительностью 60 голов в час. Данная машина (рисунок 5) предназначена для снятия шкуры с туш крупного рогатого скота после проведения забеловки. Машина – барабанного типа, съем шкуры производится по принципу «сверху вниз».

Шкуроръемная машина состоит из 2-х подъемно-опускных площадок (далее – ПОП), каретки с барабаном и гидростанции. На ПОП установлен джойстик управления гидродвигателем и цилиндром каретки, также на ней установлены кнопки включения и выключения электростимулятора (рисунок 5). На каждой площадке установлена кнопка аварийного выключения. Движение площадок осуществляется гидроцилиндром с помощью ножных педалей.

Во время пусконаладочных работ время съема шкуры с каждой туши составило 40-45 секунд. То есть достигнута производительность 80 голов в час.



1, 2 – подъемно-опускные площадки; 3 – барабан; 4 – гидростанция
 Рисунок 5 – Общий вид машины

Разработанная линия является современной и прогрессивной, обеспечивает требуемую производительность. Однако одним из недостатков рассмотренной линии являются сложные грузопотоки. Для усовершенствования процесса производства требуется полностью автоматизировать технологический процесс.

Таким образом, данная разработка представляет интерес как для средних мясоперерабатывающих отраслей РБ и СНГ. Результаты настоящей работы являются основанием для серийного производства линий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ляшук, Н. У. Классификация мясожировых производств по мощности и технологических линий убой и разделки скота по производительности / Н. У. Ляшук [и др.] // Мясная индустрия – 2019. – №3. – С. 40–44.
2. Ляшук, Н. У. Разработка системы машин для мясожировых производств. Технологические линии убой и разделки КРС / Н. У. Ляшук [и др.]. – 2019. – № 10. – С. 34–40.
3. Ляшук, Н. У. Разработка системы машин для мясожировых производств. Технологические линии убой и разделки КРС / Н. У. Ляшук [и др.]. – 2019. – № 9. – С. 26–29.
4. Мясожировое производство: убой животных, обработка туш и побочного сырья / под ред. Лисицына А. Б. — М. : ВНИИ мясной промышленности, 2007.
5. Ивашов, В. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: Учеб. пособие. / Ивашов В. И.; СПб : ГИ-РД, 2003. – Ч. 2. – С. 259, 260.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ УБОЯ И РАЗДЕЛКИ СВИНЕЙ

Ляшук Н. У., Дакало Ю. А., Данилюк Д. С., Василюк Е. Д.

Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Введение. ООО «Фина» завершает поставку, монтажные и пусконаладочные работы технологических линий убоя и разделки КРС (далее – ТЛ КРС) производительностью 30 голов в час и свиней (далее – ТЛС) производительностью 80 голов в час на строящемся по Указу Президента РБ мясожировом цеху ОАО «Оршанский мясоконсервный комбинат», проект которого выполняли специалисты ОАО «Институт Белгипроагропищепром».

При выполнении данных работ разработана ТЛС производительностью 80 голов в час, а также основное и вспомогательное технологическое оборудование, входящее в состав этой линии.

Основная часть. ТЛС данной производительности применяются на мясожировых производствах и в цехах мясокомбинатов средней мощности [1].

Схема линии представлена на рисунке 1.

На данной ТЛ предусмотрены убой и разделка свиней стандартных размеров, подсвинков и свиноматок. Оглушение производится в пневматическом боксе. После чего туша попадает на роликовый стол, где производится сбор пищевой крови. Процесс сбора пищевой и технической крови и оборудование описаны в 1. Далее туша с помощью элеватора поднимается и подается на трубчатый путь.

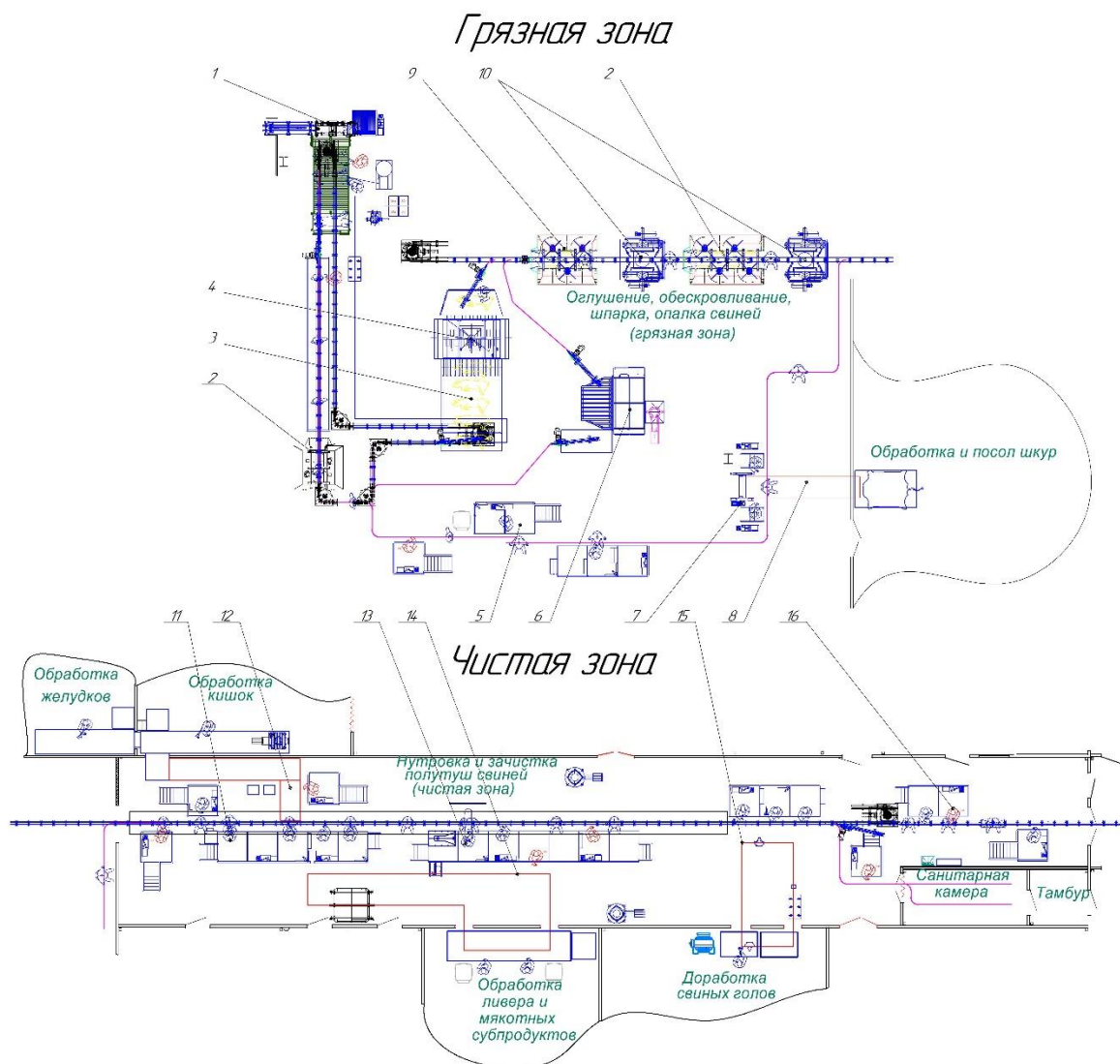
Туши и полутуши по трубчатому подвесному пути транспортируются с помощью подвесных конвейеров [2, 3] производства испанской компании «Меканова». Перевеска туш с пут на еврокрюки производится с помощью элеваторной части подвесного пути, оснащенной пневмоцилиндром.

Стандартные туши подвергаются обезволашиванию с помощью горизонтального роторного шпарчана и одновальной скребмашиной на основной линии. Подсвинки подвергаются обезволашиванию с помощью шпарчана совмещенного со скребмашиной, а свиноматки подвергаются съему шкур на пневматической шкурорьемке. После чего подсвинки и свиноматки подаются на трубчатый путь, где подвергаются осушке, двойной опалке, мойке и полировке.

Все рабочие места в «чистой» зоне оснащены пневматическими стационарными площадками. В состав каждой площадки входит мойка рук, стерилизатор инструмента и мойка фартуков.

Привод подвесных конвейеров осуществляется с помощью пневмоцилиндров, что, по сравнению с электромеханическим приводом, надежнее в условиях высокой влажности.

Недостатком такого проекта является то, что конвейера для транспортирования белых, красных органов и голов работают в разных направлениях и их работу невозможно синхронизировать с работой основных конвейеров. Поэтому ветеринарам сложно определить, к какой туше относятся субпродукты.



1. Бокс для оглушения свиней; 2. Моечные машины; 3. Шпарильный чан; 4. Скребок-машина; 5. Площадка для перевески; 6. Шпарчан совмещённый со скребок-машиной; 7. Шкур-съемная машина; 8. Конвейер для транспортировки шкур; 9. Машина для сушки свиней; 10. Опалочные печи; 11. Площадка для распиловки грудины; 12. Конвейер для белых органов; 13. Площадка для распиловки туш на полутуши; 14. Подвесной транспортёр для печени; 15. Подвесной транспортёр для свиных голов; 16. Площадка финальной экспедиции.

Рисунок 1 – ТЛС производительностью 80 голов в час

Кроме того производственное помещение перегородено конвейерами, которые затрудняют передвижение бойцов по цеху. Поэтому специалистами ООО «ФИНА» разработан новый проект ТЛС, в котором все конвейера движутся параллельно и синхронно до окончательной ветинспекции, а дальше годные продукты убоя транспортируются на участки обработки с помощью беспилотных автоматических тележек. Подробно об этом проекте будет информация в следующем номере. Кроме того в новом проекте предусматривается система АСУТП всего процесса убоя и разделки КРС.

ООО «Фина» были произведены конструкторские работы по разработке технологического оборудования, входящего в линию, и работы по его изготовлению.

Так были сконструированы и изготовлены боксы для оглушения, горизонтальный роторный шпачан, скребмашина, моечные и опалочные машины подъемно-опускные площадки, транспортеры, пневматическая шкуроеъемная машина, шпарчан, совмещенный со скребмашиной, установка для сбора пищевой крови.

Рассмотрим конструкцию и принцип работы машин, входящих в линию.

Конструкция бокса для традиционного оглушения свиней позволяет осуществлять надежную фиксацию туловища, механическую выгрузку туши, быстрое приведение бокса в исходное положение для следующего цикла обездвиживания, легкое и надежное открывание и закрывание входной калитки в бокс. Бокс прост в эксплуатации, надежен.

Основные составные части и размеры представлены на рисунке 2.

Бокс (рисунок 2) состоит из сварного каркаса 1, дверей задней 2, боковой 3, пневмоцилиндров 4, 5.

Обслуживающий персонал управляет дверью задней 2, боковой 3 с помощью пульта управления, расположенного на площадке около бокса. Начальное положение: шток пневмоцилиндра 4 задней двери выдвинут (дверь закрыта), шток пневмоцилиндра 5 боковой двери выдвинут (дверь закрыта).

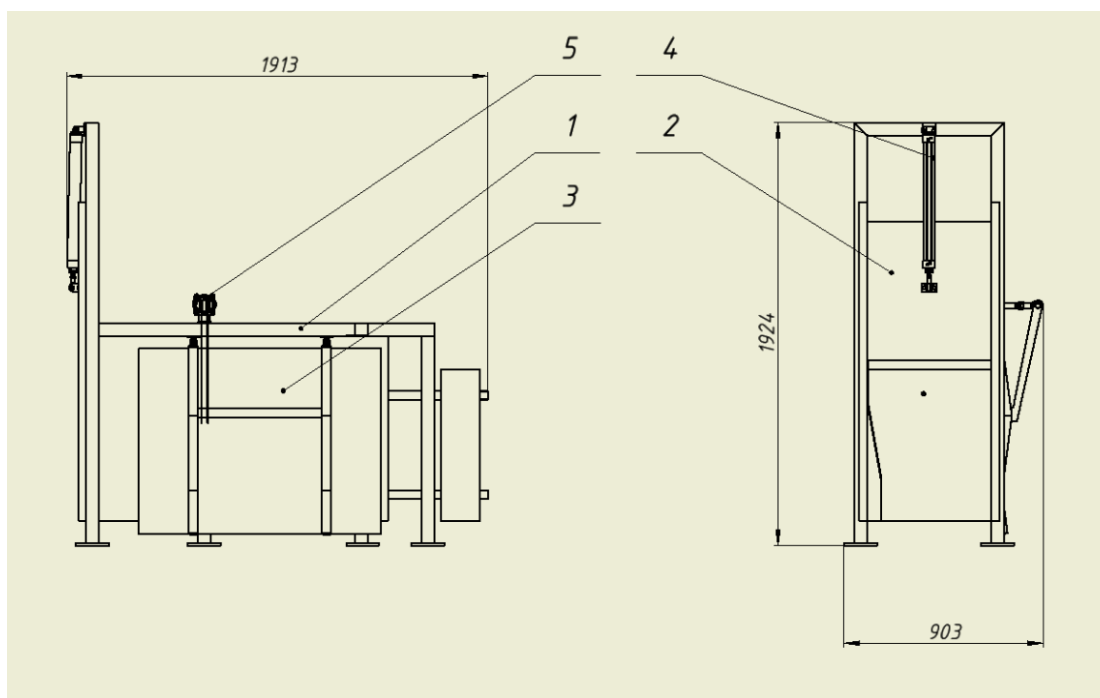


Рисунок 2 – Общий вид бокса

Последовательность работы:

1. Открыть входную дверь (дверь задняя), запустить животное.
2. Закрыть входную дверь.
3. Зафиксировать туловище животного дверью (дверь боковая).
4. Оглушить животное.
5. Открыть боковую дверь (дверь боковая).
6. Привести бокс в начальное положение: закрыть боковую дверь.
7. Цикл повторяется.

Конструкция шкуроемной машины для свиноматок предназначена для снятия шкуры с туш свиноматок после проведения забеловки. Тип машины – барабанный, т.е. во время процесса снятия шкуры, шкура наматывается на барабан (вал) по принципу «сверху вниз». После окончания процесса снятия шкуры вал разматывает шкуру, после чего шкуру можно отсоединять [2].

Основные составные части и размеры представлены на рисунок 3.

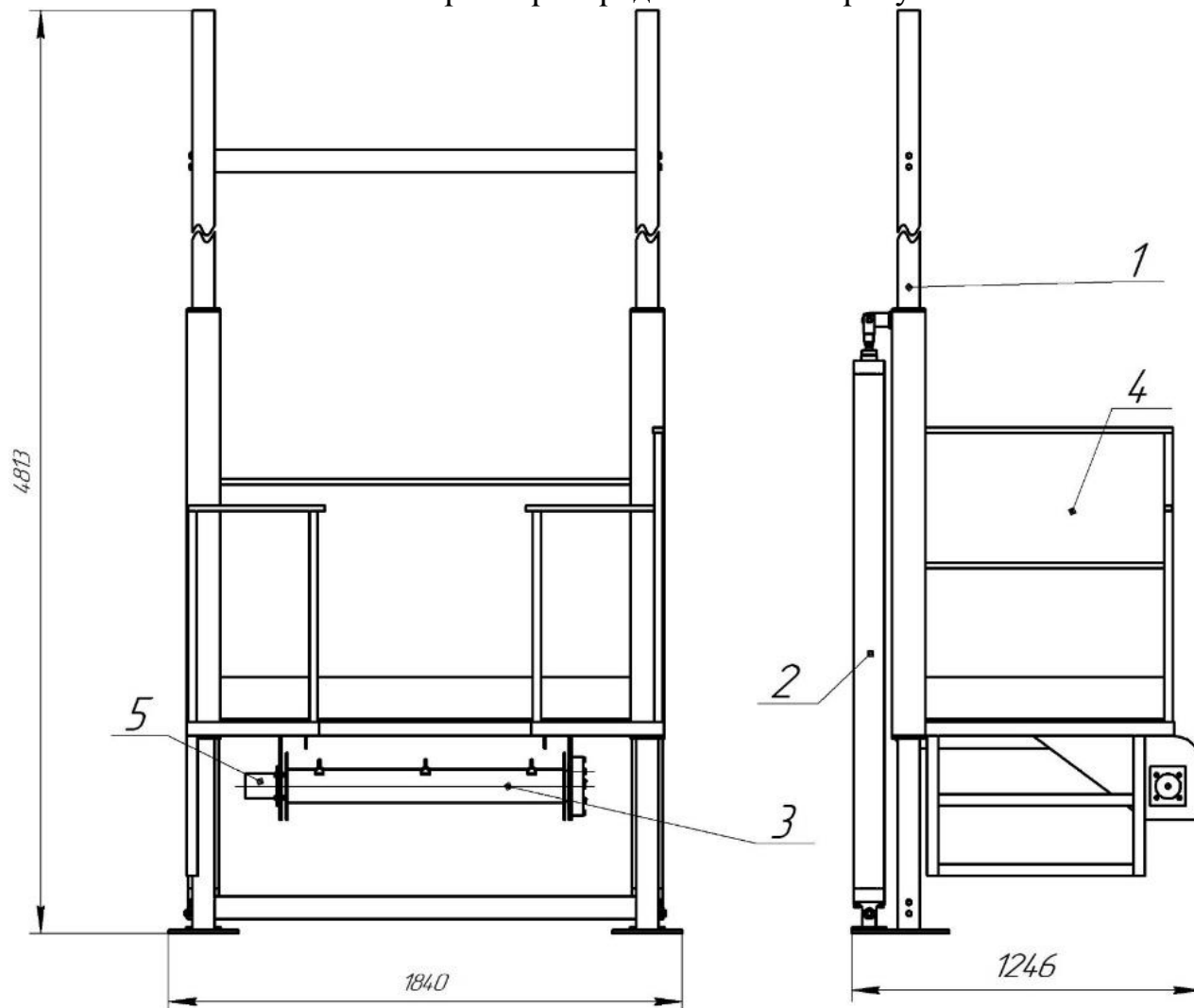


Рисунок 3 – Общий вид машины

Шкуроемная машина состоит из подъемно-опускной площадки 1 с пневмоцилиндрами 2, барабана в сборе 3, каркаса 4. На площадке 1 установлена педаль включения подачи воздуха и кнопочная станция включения вращения барабана (рисунок 1). Движение площадки осуществляется пневмоцилиндром с помощью ножных педалей. На площадке установлена кнопка аварийного выключения. Вращение барабана осуществляется от мотор-редуктора 5.

Конструкция моечной машины для свиней предназначена для мойки свиней в подвешенном состоянии. Моечная машина проста в эксплуатации, надежна.

Основные составные части и размеры представлены на рисунке 4.

Моечная машина состоит из сварного каркаса 1, моечных валов 2, мотор-редукторов 3. В зависимости от комплектации моечная машина может быть оснащена 3-мя или 4-мя валами.

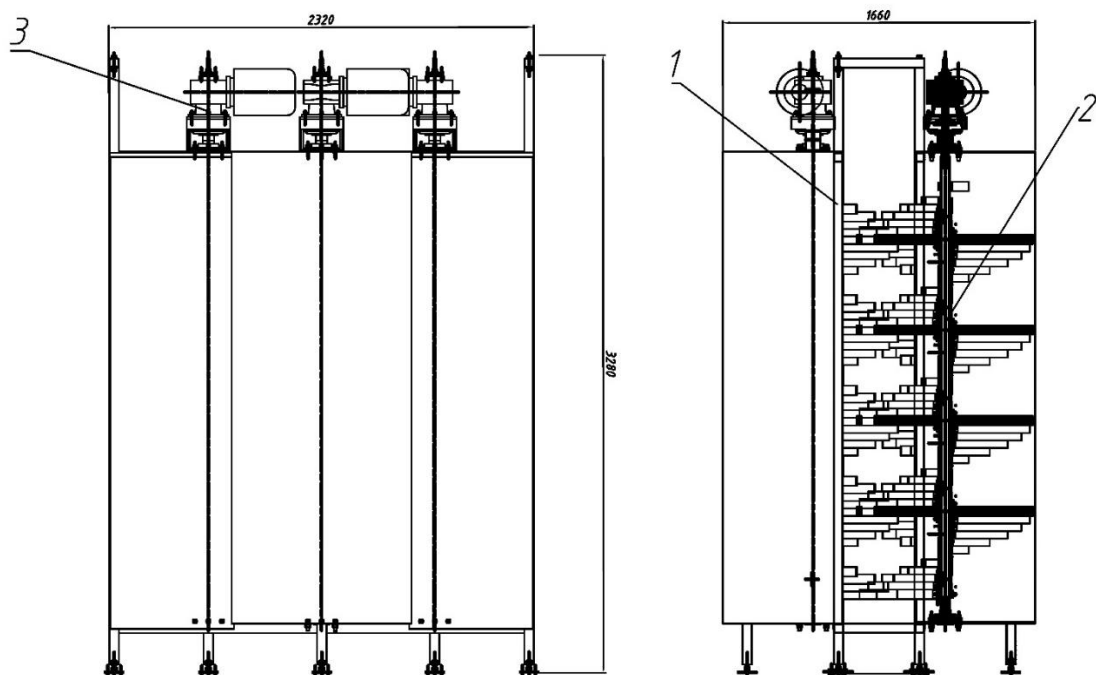


Рисунок 4 – Общий вид моечной машины

Основные технические данные 3-х валовой моечной машины

Габаритные размеры, мм	2320 x 1660 x 3280
Материал изготовления	Сталь AISI 304
Двигатель, кВт	3x4
Масса	750 кг

Конструкция шпирильного чана совмещённого со скребмашиной для свиней (рисунок 6) предназначена для мойки свиней и снятия щетины.

Шпирильный чан, совмещённый со скребмашиной, состоит из сварного каркаса 1, моечных валов 2, мотор-редукторов 3, цепной передачи 4, крышки 5, пневмоцилиндров 6. В зависимости от комплектации нагрев воды может осуществляться паром либо с помощью ТЭНа.

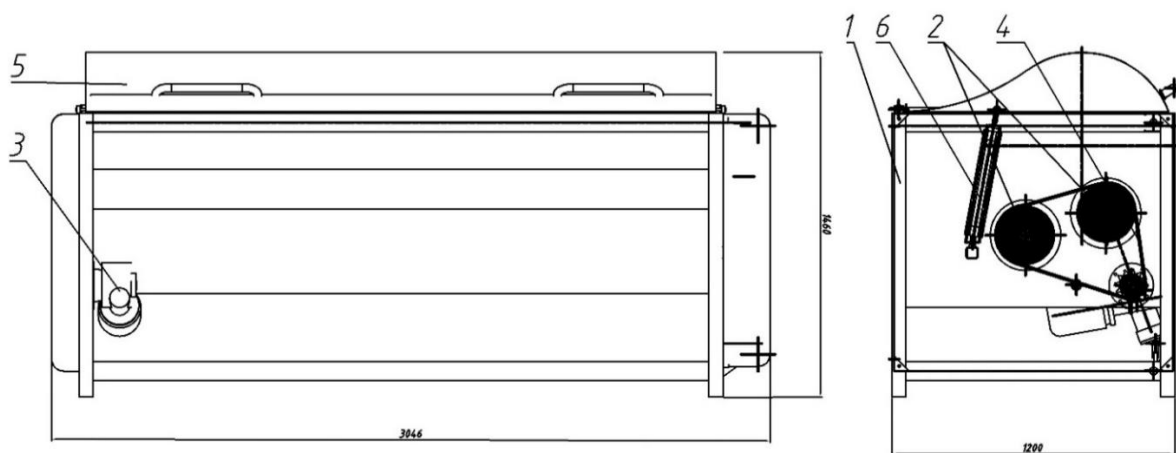


Рисунок 5 – Общий вид шпирильного чана, совмещённого со скребмашиной

Основные технические данные шпарильного чана, совмещённого со скреб-
машиной

Габариты, мм	3046x1200x1460
Материал изготовления	Сталь AISI 304
Двигатель, кВт	3
Масса	800 кг

Заключение. Разработанная линия является современной и прогрессивной, обеспечивает требуемую производительность. Однако одним из недостатков рассмотренной линии являются сложные грузопотоки. Для усовершенствования процесса производства требуется полностью автоматизировать технологический процесс.

Предприятие ООО «Фина» показало возможность разработки и изготовления технологических линий различной производительности. Таким образом, данная разработка представляет интерес как для средних мясоперерабатывающих отраслей РБ и СНГ, а также для машиностроительных предприятий, выпускающих оборудование для убой и разделки скота. Результаты настоящей работы являются основанием для серийного производства линий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Ляшук, Н. У. Классификация мясожировых производств по мощности и технологических линий убой и разделки скота по производительности / Н. У, Ляшук [и др.] // Мясная индустрия – 2019. – № 3. – С. 40–44.
2. Ляшук, Н. У. Разработка системы машин для мясожировых производств. Технологические линии убой и разделки КРС / Н. У, Ляшук [и др.]. – 2019. – № 10. – С. 34–40.
3. Ляшук, Н. У. Разработка системы машин для мясожировых производств. Технологические линии убой и разделки КРС / Н. У, Ляшук [и др.]. – 2019. – №9. – С. 26–29.
4. Мясожировое производство: убой животных, обработка туш и побочного сырья / под ред. Лисицына А. Б. — М. : ВНИИ мясной промышленности, 2007.
5. Ивашов, В. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: Учеб. пособие. / Ивашов В. И.; СПб : ГИ-РД, 2003. Ч. 2. – С. 259, 260.

УДК 620.004.5

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ В ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МНОГОВАЛЬНЫХ ПРИВОДОВ

Парфиевич А. Н., Сокол В. А., Саливончик Ю. Н.

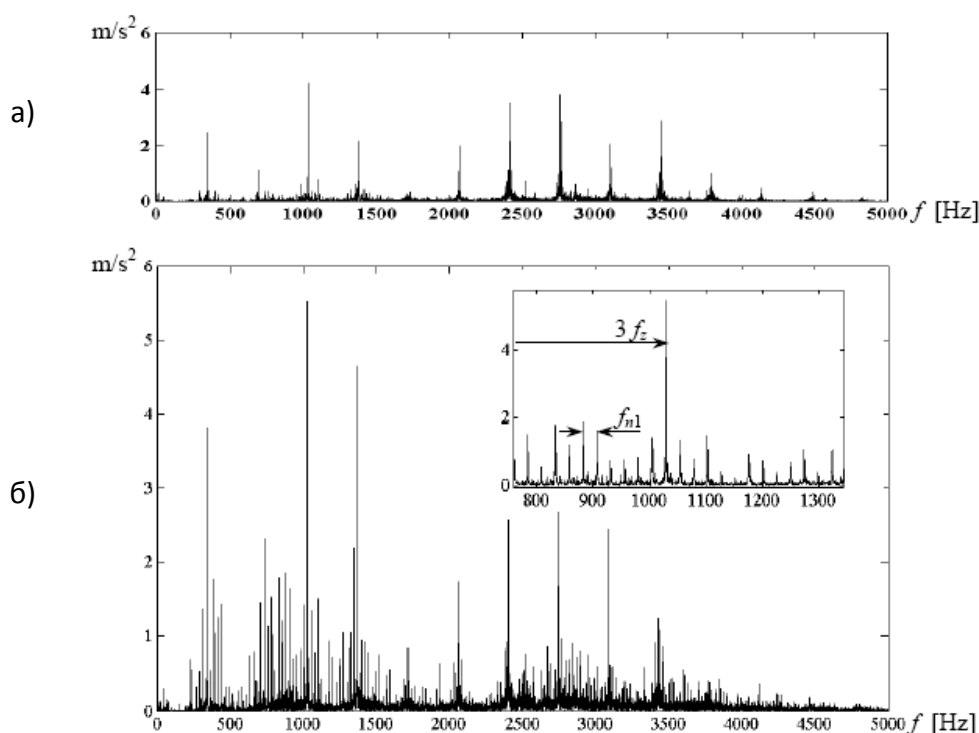
Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

В процессе изготовления, монтажа и эксплуатации зубчатых приводов возникают различные погрешности, а также повреждения рабочих поверхностей зубьев, которые приводят как к качественным, так и к количественным изменениям в виброакустической активности таких объектов.

Анализ ряда публикаций, посвященных оценке технического состояния зубчатых колес многовальных приводов, показал, что среди современных методов

безразборного контроля многовальных зубчатых приводов одним из наиболее перспективных является анализ виброакустического сигнала. Именно данный сигнал содержит достаточно емкую информацию о работе анализируемого объекта и может являться достоверным показателем его состояния.

Также установлено, что эффективность диагностики непосредственно зависит от объема анализируемой информации, содержащейся в виброакустическом сигнале [4]. Оценивая представленную в литературных источниках информацию, можно сделать вывод о недостаточности разрешения по частоте 4000–8000 линий наиболее часто используемых анализаторов. В связи с этим, в ходе собственных экспериментальных исследований использовался контрольно-диагностический комплекс ВИКМА [2], позволяющий использовать при диагностировании спектры виброакустических сигналов с максимальной разрешенностью, что положительно влияет на качество получаемых данных.



а) исправной передачи и б) с дефектом
Рисунок 1 – Спектры вибраций

Анализ публикаций [5,6] показал, что для выявления в составе многовального привода зубчатого колеса с локальным повреждением зуба необходимо в составе спектра анализируемого сигнала установить наличие боковых полос $mxf_z \pm nxf_0$ зубцовых f_z гармоник и кратных им mxf_z . Согласно рисунку 1 на спектре с дефектной шестерней появляются боковые полосы, симметрично расположенные относительно f_z и сдвинутые на частоту вращения вала f_0 , на котором она расположена [5,6]. Методика получения данных частотных составляющих приведена в [5,6] и положена в основу разработанной функции «Анализ гармоник» в используемом контрольно-диагностическом комплексе ВИКМА [2]. Результаты расчета автоматически формируются в числовом табличном виде, пригодном для обработки в прикладных программах (табл. 1).

Таблица 1 – Экспериментальные данные, полученные с помощью функции комплекса «Анализ гармоник» для исследуемого зубчатого колеса

i	Амплитуды гармоник											
	оборотной частоты f_{oi}	зубцовой частоты f_{zi}	боковых полос $f_{zi} \pm k f_{oi}$									
			m=-5	m=-4	m=-3	m=-2	m=-1	m=1	m=2	m=3	m=4	m=5
1	0,067	2,73	1,06	0,89	0,74	1,28	1,65	0,96	1,14	0,46	0,46	0,15
2	0,032	0,78	0,58	0,48	1,33	0,88	1,03	0,55	0,14	0,48	0,25	0,07
3	0,017	0,67	0,84	0,13	0,16	0,41	0,22	0,15	0,17	0,72	0,20	0,44
4	0,023	0,06	0,05	0,06	0,06	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,09
5	0,028	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,11	0,03	0,02	0,02	0,03

В качестве объекта экспериментальных исследований используется коробка скоростей привода главного движения токарного станка SN-501, кинематическая схема которой приведена на рисунке 2.

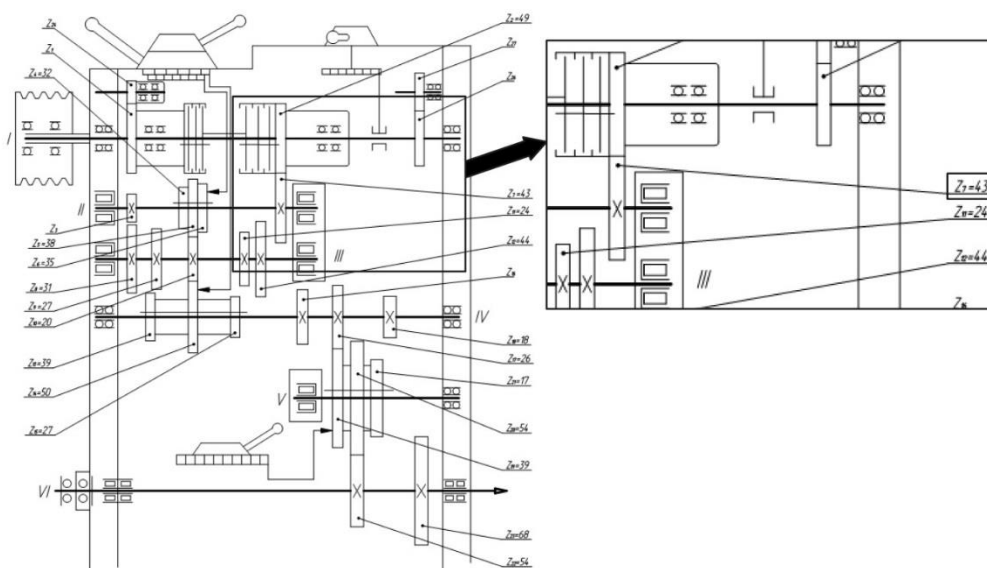


Рисунок 2 – Кинематическая схема коробки скоростей привода главного движения токарного станка SN-501

На шестерне $Z = 43$ вала II имитировался локальный дефект рабочей части зуба различной величины (25 %, 50 %, 75 % длины по вершине зуба и без зуба) (рис. 3). Результаты, полученные при использовании серийных колес, приняты эталонными.



Рисунок 3 – Экспериментальная шестерня $z = 43$, смонтированная по месту на 2-м валу привода

В ходе анализа кинематической схемы привода (рисунок 2) выявлено, что две первые ступени участвуют в работе привода на различных передачах (частота вращения шпинделя 40, 80, 160 и 630 мин⁻¹). Так, при включении данных передач вращение с первого вала на второй осуществляется посредством зубчатой пары $z = 49/z = 43$, а со второго на третий – $z = 35/z = 24$.

В ходе анализа ряда работ [1,4] установлено, что при диагностировании зубчатого колеса с локальным повреждением зуба в составе многовального привода можно производить анализ не только абсолютных значений приведенных выше частотных составляющих анализируемого сигнала, но и соотношения их амплитуд, позволяющих определить фактическое состояние зубчатой пары, которое достаточно очевидно проявляется в спектральных характеристиках. Это даст возможность, используя функцию «Анализ гармоник», получать в автоматическом режиме амплитуды колебаний на характерных частотах, оперативно формировать базу для последующего анализа и реализовать некоторые шаги в направлении формализации процесса применения диагностических признаков, например, приведенных в [4].

На основании экспериментальных исследований установлено, что наиболее важная диагностическая информация при выявлении зубчатого колеса с локальным повреждением зуба в составе многовального привода содержится в следующем перечне информативных частотных составляющих анализируемого сигнала:

- зубцовая частота f_z и 4 кратные ей гармоники;
- оборотная частота f_o и 4 кратные ей гармоники;
- 5 комбинированных $mxf_z \pm kxf_o$ частот по обе стороны от f_z и mxf_z .

Именно эти компоненты спектра отражают фактическое состояние зубчатых передач, что проявляется в изменении соотношения их амплитуд [1,4]. Поэтому подобное табличное представление этих данных (таблица 1) позволило предложить и апробировать следующие интегральные показатели для оценки состояния элементов зубчатых приводов:

1. Соотношение суммы амплитуд кратных зубцовых гармоник анализируемого колеса к сумме амплитуд частот пересопряжения зубьев эталонного колеса K_{zn} :

$$K_z = \frac{\sum_{i=1}^5 A(f_{zi})}{\sum_{i=1}^5 A(f_{zi})_{\text{эт}}}$$

где $A(f)$ – амплитуда колебаний на частоте f_z ;

f_{zi} и $f_{zi \text{ эт}}$ – i -я зубцовая частота анализируемого и эталонного зубчатых колес.

2. Соотношение суммы амплитуд боковых полос к сумме амплитуд боковых полос эталонного колеса $K_{бп}$:

$$K_{\text{бп}} = \frac{\sum_{n=-5}^5 A(f_{zi} \pm nf_o)}{A(f_{zi})}$$

где $A(f_{zi} \pm nf_o)$ – амплитуда колебаний на комбинированной частоте анализируемого зубчатого колеса;

$mxf_{zi} \pm nf_0$ – комбинированная частота анализируемого (эталонного) зубчатого колеса.

По результатам расчетов получены следующие данные, сведенные в таблицы 2 и 3, и отображенные на рисунках 4 и 5.

Таблица 2 – Величины K_z на различных передачах для первых двух степеней привода

Вал	Частота вращения шпинделя = 80 мин ⁻¹		Частота вращения шпинделя = 630 мин ⁻¹		Частота вращения шпинделя = 160 мин ⁻¹		Частота вращения шпинделя = 40 мин ⁻¹	
	$\sum_{i=2}^5 f_{zi}$	K_z	$\sum_{i=2}^5 f_{zi}$	K_z	$\sum_{i=2}^5 f_{zi}$	K_z	$\sum_{i=2}^5 f_{zi}$	K_z
вал 1 вал 2	0,69	0,793	0,926	1,929	0,59	0,614	0,69	0,884
вал 2 вал 3	0,797	0,137	0,740	0,172	0,500	0,113	0,400	0,151

Таблица 3 – Величины $K_{бп}$ для зубчатых колес первых двух ступеней привода на различных передачах

	Частота вращения шпинделя = 80 мин ⁻¹		Частота вращения шпинделя = 630 мин ⁻¹		Частота вращения шпинделя = 160 мин ⁻¹		Частота вращения шпинделя = 400 мин ⁻¹	
	$\sum_{n=5}^5 f_z + nf_0$	$K_{бп}$	$\sum_{n=5}^5 f_z + nf_0$	$K_{бп}$	$\sum_{n=5}^5 f_z + nf_0$	$K_{бп}$	$\sum_{n=5}^5 f_z + nf_0$	$K_{бп}$
ВАЛ 1 ведущее	0,23	0,27	0,5	0,521	0,48	1,000	0,301	0,386
ВАЛ 2 ведомое	1,075	1,25	0,99	1,031	0,56	1,167	0,675	0,865
ВАЛ 2 ведущее	1,318	0,23	0,82	0,186	1,62	0,377	0,595	0,225
ВАЛ 3 ведомое	1,163	0,20	0,96	0,218	1,39	0,323	0,845	0,320

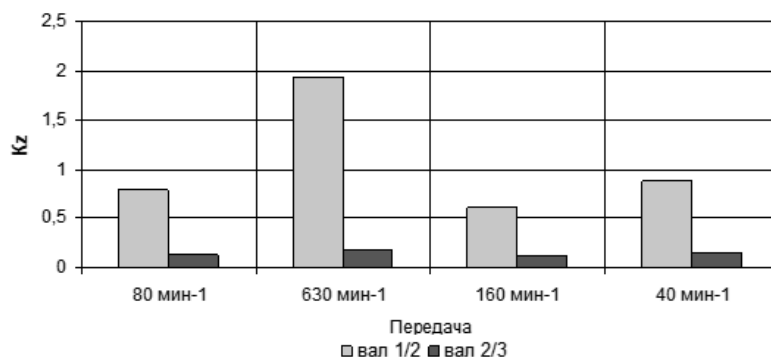


Рисунок 4 – Значения показателя K_z для двух первых ступеней на различных передачах

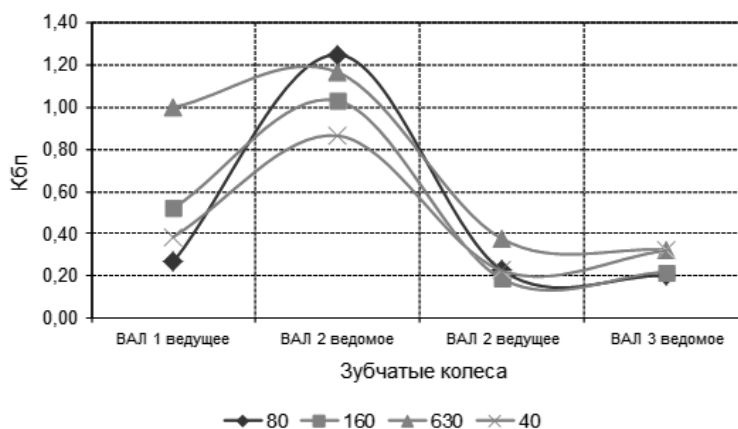


Рисунок 5 – Значения показателя $K_{бп}$ для зубчатых колес двух первых ступеней на различных передачах

По результатам расчета и анализа предлагаемых показателей, приведенных в таблицах 2, 3 и на рисунках 4, 5, можно сделать следующие выводы:

– величина показателя K_z для первой ступени передачи значительно превосходит аналогичный показатель для второй ступени на всех передачах, что свидетельствует о наличии в анализируемом сигнале гармоник на частотах, кратных зубцовой f_z . Причиной такого распределения амплитуд является тот факт, что при отклонении параметров зубчатого зацепления от нормального возникают предпосылки к появлению «ударов» при контакте зубьев, являющихся источниками упругих колебаний в механизме на основе зубчатых передач [3].

– показатель $K_{бп}$ использовался для сравнения состояния колес первой ступени (рисунок 5). Как следует из графика, величина $K_{бп}$ имеет большее значение для ведомого колеса первой ступени, располагающегося на втором валу. Это свидетельствует о более высоких амплитудах боковых комбинированных частот диагностируемого зубчатого колеса по отношению к амплитуде зубцовой гармоники, генерируемых при работе данного колеса.

Изменение величин показателей K_z и $K_{бп}$ говорит о том, что составляющие, входящие в их состав, чувствительны к появлению в зоне зубозацепления зубчатого колеса с локальным повреждением зуба в составе многовального привода, а их анализ менее трудоёмок в ходе мониторинга состояния диагностируемого объекта по сравнению с анализом спектров. Предварительный анализ полученных результатов исследований показал достаточную эффективность и информативность данных показателей без ущерба к качеству производимой диагностики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. Драган, А. В. Новые аппаратно-программные средства для исследования и диагностики механических систем / А. В. Драган [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2006. – № 4. – С. 17–26.
3. Ишин, Н. Н. Динамика и вибромониторинг зубчатых передач / Н. Н. Ишин. – Минск : Беларусь. наука, 2013. – 432 с.
4. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Электронный ресурс] / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. Санкт-Петербург: Официальный сайт, 2014. – Режим доступа : <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm>.
5. Неразрушающий контроль и диагностика : Справочник : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.
6. Постников, О. К. Спектральный анализ шума шестеренчатых механизмов / О. К. Постников // сборник трудов ВНИИОПИТ. – 1972. – № 41. – С. 111–126.

УДК 631.331.53

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАБЛЕЙ-ВАЛКОВАТЕЛЕЙ МОДЕЛИ ГВ-9,6 В КОРМОЗАГОТОВКЕ

Савчук С. В., Парфиевич А. Н., Сокол В. А.
Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Одной из важнейших стадий при заготовке кормов в сельском хозяйстве Республики Беларусь является своевременное и качественное сгребание скошенной травы в валки для последующей операции подбора и прессования.

Для удовлетворения требований потребителя, повышения конкурентоспособности и эффективности при проведении операции валкования, возникает необходимость создания отечественной высокопроизводительной техники, не уступающей по своим техническим показателям лучшим зарубежным аналогам.

В этих условиях конструкторской службой ОАО «Брестский электромеханический завод» была разработана конструкция граблей-валкователей (рисунок 1), прошедших приемочные испытания на Белорусской машиноиспытательной станции. Данные грабли успешно эксплуатируются на полях Брестской области и в других регионах.



Рисунок 1 – Общий вид граблей-валкователей модели ГВ-9,6

Грабли соответствуют требованиям нормативных документов, установленных в Республике Беларусь, и предназначены для сгребания провяленной травы из прокосов в валки, оборачивания валков и для уборки сеяных трав естественных сенокосов на равнинах при влажности массы от 20 до 60 %. Грабли выполнены в прицепном варианте. [2]

Агрегируются с тракторами тягового класса 1.4 (мощностью более 55 кВт) и аналогичными импортными.

Грабли работают на выровненных полях и склонах крутизной до 8°, не имеющих глубоких борозд, рвов. Поле должно быть выровнено, микрорельеф должен составлять 2–3 см.

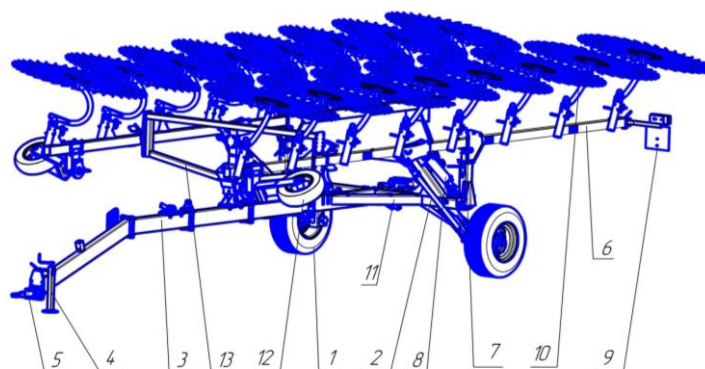
Зона применения сеялки – Республика Беларусь и страны СНГ.

Грабли-валкователи «Берестье» (см. рисунок 2) состоят из следующих основных узлов: центральной рамы с осями колесного хода, прицепного устройства с транспортной петлей, 2-х балок с рабочими колесами в количестве от 6 до 8 штук в зависимости от исполнения граблей, а также двух передних опорных колес, механизма раскладывания и подъема балок с рабочими пальцевыми колесами, гидрооборудования, электрооборудования. К центральной раме прикреплены: два талрепа, обеспечивающие необходимое рабочее положение 2-х балок, рама для фиксации рабочих балок в транспортном положении, а также гидрооборудование с механизмом раскладывания и подъема балок, электрооборудование. Рабочие пальцевые колеса состоят из обода, центрального диска и пальцев в количестве 40 штук каждое, зафиксированных прижимами к центральному диску. Крепление рабочих пальцевых колес к балкам осуществляется с помощью поворотных держателей и ступиц с подшипниковыми узлами.

Секционные балки и центральная рама выполнены из профильных труб со вставленными в них уголками, согнутых из листового проката.

Колесный ход состоит из оси, на которой установлены транспортные колеса со ступицами и подшипниковыми узлами.

Подъем и опускание балок с рабочими пальцевыми колесами происходит с помощью гидросистемы граблей, установленной на центральной раме.



1 – ход колесный; 2 – талреп; 3 – дышло; 4 – домкрат;
 5 – прицепное устройство с транспортной петлей; 6 – балки с рабочими колесами;
 7 – опора; 8 – система гидравлическая; 9 – электрооборудование; 10 – рабочее колесо; 11 – рама колесного хода; 12 – колесо опорное; 13 – опора
 Рисунок 2 – Общий вид граблей [1]

Основные технические данные сеялки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические данные

Наименование параметра	Значение параметра
Марка	ГВ-9,6
Производительность, га/ч, не менее основного времени эксплуатационного времени	7–11 5–8
Габаритные размеры, м, не более: – в транспортном положении длина ширина высота – в рабочем положении длина ширина высота	8,9 4,2 2,5 8,9 9,8 1,5
Количество рабочих колес, шт.	17
Рабочая ширина захвата, м	9,6
Характеристика вала после оборачивания: – ширина до, см Характеристика сформированного вала – ширина до, см	160 160
Потери не более, %	2,00
Диаметр рабочих колес, ± 100 мм	1400
Колея, м:	2,55
Шины транспортных колёс	100/75–15,3
Давление в шинах, МПа (кг/см)	0,25
Вертикальная статическая нагрузка, воспринимаемая буксирным устройством трактора, кг не более	300
Скорость движения, км /ч рабочая транспортная	7–12 20
Срок службы, лет	6

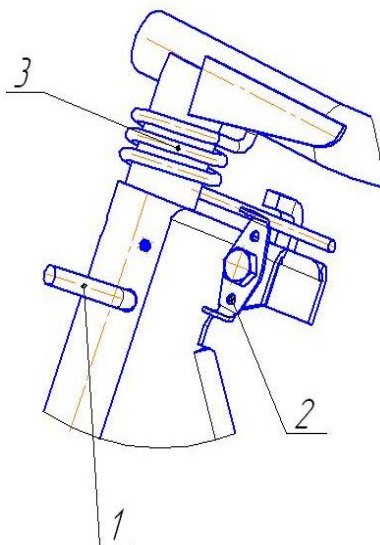
Подготовка граблей к работе включает подготовку трактора, комплектование граблей, регулировку граблей на загоне.

Подготовка трактора осуществляется следующим образом: необходимо установить колеса трактора так, чтобы колея передних и задних колес была в пределах 1400–1600 мм. Далее установить скобу прицепа (если она не была установлена) и, регулируя раскосы навесного устройства трактора, выровнять ее по горизонтали.

Соединение граблей с трактором проводится в определенной последовательности.

В первую очередь необходимо внешним осмотром проверить комплектность и состояние граблей. Все узлы и детали должны быть надежно закреплены. Повернув и закрепив домкрат, установленный на спице граблей, в транспортном положении необходимо поднять сцепную балку (буксирующую петлю) на уровень тяговой скобы трактора. Подать трактор задним ходом к граблям и присоединить грабли к трактору. Далее для безопасного передвижения машин по дорогам общего пользования необходимо провести соединение электрооборудования граблей с электрической системой трактора. С целью управления рабочими механизмами граблей-валкователей производится подключение гидравлической системы машины к питающей гидравлической системе трактора. Подключение производится с помощью быстроразъемных гидромуфт. Соосность граблей и трактора при рабочем движении регулируется растяжками продольных тяг навесной системы трактора.

Положение навески трактора должно быть таким, чтобы прицепная серьга находилась на высоте 40 см от опорной поверхности. Далее устанавливается ширина формируемого валка. Для изменения ширины формируемого валка необходимо ослабить контргайки и, вращая винтовые части талрепов (рисунок 1), добиться требуемой ширины валка. Длина талрепов на обеих балках должна быть одинаковой. После регулировки контргайки следует затянуть. Особое внимание необходимо уделить регулировке давления на почву пальцевых колес относительно оси правого и левого крыла. Регулировка осуществляется вращением винтовой ручки 2 (рисунок 3), вследствие чего происходит перемещение в пазу отвода пружины 3 и изменение давления пружины на рычаг колеса. Регулировка 82 осуществляется в рабочем положении пальцевых колес, когда стержень вставлен в подъемную трубу.



1 – стержень; 2 – ручка винтовая; 3 – пружина
Рисунок 3 – Механизм регулировки давления колес

Заезжая на загон, грабли переводят из транспортного положения в рабочее. Для этого необходимо расфиксировать пальцы (рисунок 2) в скобах фиксирующей рамы для боковых рабочих балок, установленной на дышле и снять растяжку. Перевести боковые балки в рабочее положение: воздействуя на рычаг их управления, раскрыть боковые балки граблей. Вращая винт 2 (рисунок 3) против часовой стрелки отрегулировать давление пальцевых колес на почву.

Окончательную регулировку произвести по результатам пробного заезда.

Оператор во время выполнения технологического процесса должен визуально контролировать его качество. Изменить качество технологического процесса можно при помощи:

- подбора направления и скорости движения;
- регулировки давления пальцевых колес на почву;
- регулировки угла атаки боковых балок;
- регулировки с помощью пружин прилегания с нужным давлением трущихся дисков боковых колесных опор.

Давление пружинных пальцев на почву должно быть достаточным для качественного сгребания скошенной массы в валок без огрехов, в то же время пальцы не должны захватывать почву и дерн.

При уборке трав, скошенных косилкой с сегментно-пальцевыми режущим аппаратом, необходимо двигаться в том же направлении, в котором работала косилка.

При уборке трав, скошенных косилкой с ротационным режущим аппаратом, необходимо двигаться в противоположном направлении движения косилки.

Если скошенная масса предварительно подверглась ворошению (вспушиванию), направление движения не имеет особого значения.

Скорость граблей по полю необходимо выбирать таким образом, чтобы исключить крутые повороты. Прежде чем развернуться, необходимо снизить скорость трактора и поднять пальцевые колеса гидроцилиндрами подъемного механизма при необходимости сложить боковые секции. После разворота заезжают на следующие прокосы.

Боковые опорные колеса, установленные в передней части рабочих балок (рисунок 2) служат уравнивающим фактором для выполнения требования в процессе работы граблей горизонтального (параллельного) положения боковых рабочих балок к уровню поверхности поля.

Во время переездов в начале и конце смены, а также внутрисменных и других транспортных переездов, грабли должны быть переведены в транспортное положение во избежание поломки пружинных пальцев и пальцевых колес.

Особое внимание необходимо уделить обеспечению безопасной работы изделия, для чего нужно обращать внимание и соблюдать следующие приемы:

- перед началом работы убедиться в пригодности предохранительных устройств: страховочные цепи пальцевых колес, страховочные талрепы и растяжка. При необходимости отремонтировать или заменить поврежденные устройства;

- трактор должен быть защищен от непроизвольного перемещения;
- при отцеплении или сцеплении граблей категорически запрещено стоять между граблями и трактором;

- категорически запрещается нахождение людей во время ремонтных и наладочных работ под приподнятыми узлами и элементами конструкции граблей;

- контролировать отсутствие людей и животных рядом с машиной в процессе ее работы;

- не использовать машину не по назначению;

– не разворачивать машину, если поблизости находятся люди, принимая во внимание радиус действия машины;

– запрещается находиться на элементах конструкции граблей во время движения граблей;

– при использовании граблей в темное время суток необходимо предусмотреть освещение машины и зоны работы;

– запрещается эксплуатировать грабли с любыми неисправностями;

– при поворотах рабочие органы необходимо выглублять;

– запрещается транспортировать грабли в рабочем положении.

Разработанные и изготовленные на ОАО «Брестский электромеханический завод» грабли-валкователи модели ГВ-9.6 и их модификации соответствуют требованиям технического задания и действующих ТНПА.

Практическое применение грабли-валкователи модели ГВ-9.6 в хозяйствах республики и странах СНГ позволит более эффективно использовать потенциальные возможности тракторов класса 1.4.

Правильная эксплуатация и своевременное и качественное выполнение работ по техническому обслуживанию обеспечат бесперебойную работу граблей, будут способствовать повышению их производительности и увеличению срока службы.

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по эксплуатации грабли-валкователи ГВ-7,2 «Берестье», ГВ-9,6 «Берестье» / В. Н. Жиян [и др.]: утв. ОАО «Брестский электромеханический завод» 22.03.2016 г.: текст по состоянию на 01 августа 2021 г. – Брест, 2016. – С. 4 – 6.
2. Открытое акционерное общество «Брестский электромеханический завод»: кат. продукции. – 15 с.: цв. ил.

УДК 621.693

О ПРИМЕНЕНИИ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ШУМА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Шелег В. К., Ма Минь, Леванцевич М. А., Кравчук М. А.

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Введение. Снижение шума и вибраций металлорежущих станков является одной из важнейших задач современного станкостроения. Ее актуальность объясняется тем, что у большинства металлорежущих станков нормированные уровни звукового давления находятся в пределах от 84 до 100 дБ и выше [1]. Однако, хотя эти уровни во многих случаях и обеспечиваются при изготовлении станков, тем не менее, они превышают предельно допустимые санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [2]. Наиболее высокие уровни шума зарегистрированы у крупногабаритных токарных, револьверных, фрезерных и шлифовальных станков.

Как известно, в металлорежущих станках источники возбуждения шума и вибраций условно разделяют на две группы: источники, у которых шум и вибрации обу-

словлены работой механизмов станка (например, работой приводов, электродвигателей, пневматических или гидравлических систем и др.); источники, генерирующие шум непосредственно в процессе обработки изделий, т. е. при выполнении технологических операций, например, при обработке с некорректно выбранными режимами резания, затупленным резцом или резцом, заточка которого не соответствует обрабатываемому материалу заготовки, виду и размерам снимаемой стружки, и др. При резании, вследствие увеличения нагрузки на приводы и взаимодействия резца с поверхностью обрабатываемой детали, шум станка может увеличиваться соответственно на 3...5 и 5...10 дБ [3]. Однако, несмотря на наличие большого количества источников шума и вибраций, большинством исследователей установлено, что главным из них в металлорежущих станках являются зубчатые приводы механизмов подачи и шпиндельного узла, содержащие зубчатые колеса, работа которых, вследствие погрешностей зацепления, определяемых точностью изготовления и сборки колес в узле, сопровождается ударом. При этом, как следует из данных обобщенных спектрограмм, полученных в [4], спектр уровней шума, например горизонтально-фрезерного станка мод. 6М82, может находиться в достаточно широком диапазоне частот от 125 до 8000 Гц.

Снижение уровня шума и вибраций в металлорежущих станках может быть достигнуто применением звукоизолирующих кожухов, одеваемых на коробки скоростей шпинделей, различного рода демпфирующих прокладок, монтируемых на стыках соединений, подбором наилучшего, с точки зрения демпфирования колебаний, материала деталей и др. Также использованием в процессе изготовления высокоточных зубчатых колес различных видов отделочно-упрочняющей обработки, таких как зубошевингования, зубохонингования, зубошлифования, зубопритирки, обкатки и др., предусматривающих в ряде случаев, снятие тонкой стружки. При обработке закаленных зубчатых колес это способствует снижению уровня шума зубчатых передач на 3...5 дБ, однако существенно повышает трудоемкость и стоимость колес [5].

Эффективным способом снижения шума может быть также и нанесение на поверхность деталей демпфирующих вибропоглощающих покрытий. Например, по данным работы [6], сравнительно тонкая медная пленка, толщиной до 2 мкм, сформированная на рабочем профиле зубьев зубчатых колес, может обеспечить снижение шума эвольвентных зубчатых передач на 15 %. Однако к настоящему времени имеется сравнительно немного данных об эффективности использования подобных покрытий в применении к металлорежущим станкам и непосредственно к их шпиндельным узлам, что, по-видимому, связано с недостаточной изученностью демпфирующих способностей подобных покрытий и поэтому обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

Цель исследований заключалась в изучении влияния покрытий на зубьях колес на уровень шума встроенного зубчатого привода шпиндельного узла консольно-фрезерного станка ОШ Ф-32, выпускаемого Оршанским станкостроительным заводом «Красный борец».

Методика исследований. Нанесение покрытий на рабочий профиль зубьев зубчатых колес встроенного зубчатого привода шпиндельного узла консольно-фрезерного станка ОШ Ф-32 осуществляли с помощью вращающейся цилиндрической щетки диаметром 180 мм, шириной 20 мм, с вылетом и диаметром проволочного ворса, соответственно 35 и 0,2 мм. Линейная скорость ее вращения составляла 35 м/с, число проходов – 6, значение величины натяга щетки – 1,2 мм. Толщина сформированного слоя

покрытия на зубьях зубчатых колес не превышала 4...6 мкм. В качестве материала-донора для нанесения покрытий использовали бронзографит.

Уровень шума шпиндельного узла со встроенным зубчатым приводом оценивали непосредственно на станке ОШ Ф-32 с помощью виброакустического измерителя ВШВ 003, при холостом вращении шпинделя на разных частотах, по существующей на предприятии методике. Первоначально замеры уровня шума проводили до нанесения покрытия, затем – после демонтажа зубчатых колес, нанесения на них покрытия и последующей сборки зубчатого привода.

Результаты исследований. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что сформированный слой покрытия на рабочем профиле зубьев зубчатых колес встроенного зубчатого привода шпиндельного узла консольно-фрезерного станка ОШ Ф-32 способствует снижению уровня шума на большинстве частот вращения шпинделя (рисунок 1). На второй ступени встроенного привода (рисунок 1 а), в диапазоне частот вращения шпинделя от 270 до 400 мин⁻¹, снижение уровня шума составило 1...2 децибела. На первой ступени (рисунок 1 б) максимальное снижение уровня шума (до 5 децибел) наблюдалось на частоте вращения шпинделя 1750 мин⁻¹. На остальных частотах существенного снижения уровня шума не наблюдалось.

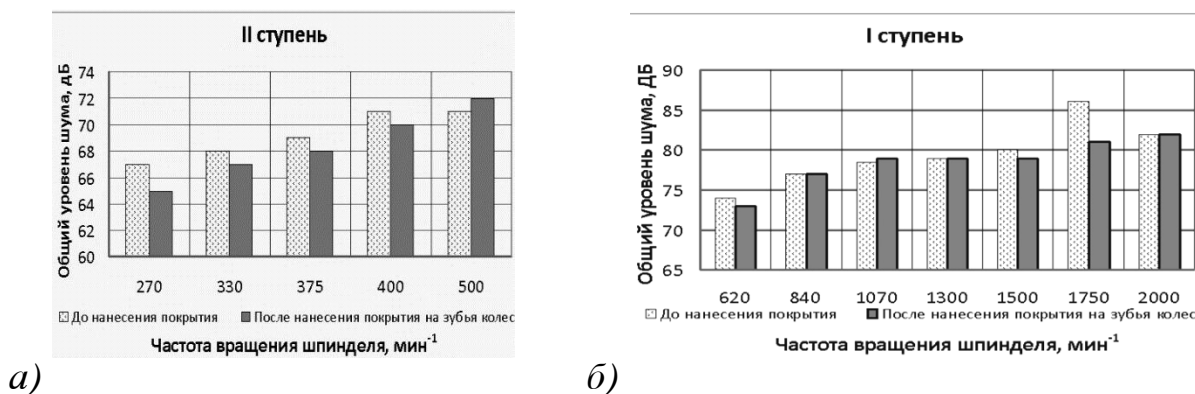


Рисунок 1 – Виброграмма уровня шума II-й (а) и I-й (б) ступени встроенного зубчатого привода шпиндельного узла консольно-фрезерного станка ОШ Ф32 при различных частотах вращения шпинделя

Снижение уровня шума встроенного зубчатого привода станка на большинстве частот вращения шпинделя после нанесения покрытия из бронзографита на рабочий профиль зубьев колес связано, по-видимому, в большей степени с улучшением условий контактного взаимодействия соударяющихся зубьев, и в меньшей степени с демпфирующей способностью тонкого покрытия. Подобное улучшение объясняется тем, что в процессе формирования покрытия ворсом вращающейся щетки сглаживаются микронеровности на рабочей поверхности зубьев, удаляются риски, царапины и др. дефекты, оставшиеся после шлифования и прикатки спаренных колес на обкатных станках, во многих случаях с добавлением абразивного порошка для достижения требуемого размера пятна контакта [8]. При этом нанесенный на поверхность зуба слой покрытия из мягкого металла, в силу пластического течения под воздействием контактных нагрузок в зацеплении, способствует увеличению пятна контакта и снижению трения скольжения, что в совокупности обеспечивает снижение шума привода.

Заключение. Результаты выполненных исследований позволяют заключить, что покрытия из бронзографита, сформированные на рабочем профиле зубьев зубчатых колес встроенного привода шпинделя консольно-фрезерного станка ОШ Ф-32 могут способствовать снижению уровня шума шпиндельного узла на 1...5 децибел. В процессе формирования подобных покрытий ворсом вращающейся щетки сглаживаются микронеровности на рабочей поверхности зубьев, удаляются риски, царапины и др. дефекты, оставшиеся после шлифования и прикатки спаренных колес на обкатных станках, во многих случаях с добавлением абразивного порошка. Последующее формирование слоя покрытия из мягкого металла в силу пластического течения под воздействием контактных нагрузок в зацеплении способствует увеличению пятна контакта и снижению трения скольжения, что в совокупности обеспечивает снижение шума шпиндельного узла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Система стандартов безопасности труда. Шум. Станки металлорежущие. Допустимые шумовые характеристики: ГОСТ 12.2.107-85. – Введ. 30.06.1986 (издание 01.04.2008). – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2008. – 16 с.
2. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки: Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96.
3. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н. И. Иванов. – М.: Логос, 2008. – 423 с.
4. Медведев, А. М. Проектирование акустически оптимальной архитектуры редукторных систем станков / А. М. Медведев, Г. В. Литовко // Ученые записки. – 2013. – № II-1 (14). – С. 64–75.
5. Берсудский, А. Л. Повышение работоспособности эвольвентных поверхностей зубчатых колес / А. Л. Берсудский // Вестник машиностроения. – 2005. – № 1. – С. 10–13.

УДК 621.85-8

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА НАГРУЖЕННОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПРИВОДОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ГОРНОГО КОМБАЙНА

Шелег В. К.¹, Романович А. С.², Конопляник И. А.²

- 1) Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
- 2) УПП «Нива» Романовича С. Г.,
Солигорский район, г. Солигорск, Республика Беларусь

Введение. Горный комбайн «Универсал-600» используется при добыче калийной руды камерным способом и подготовке шахтного поля путем создания в горном массиве транспортных, вентиляционных, вспомогательных и других штреков арочного типа, профиль и схема формирования которых показаны на рисунке 1.

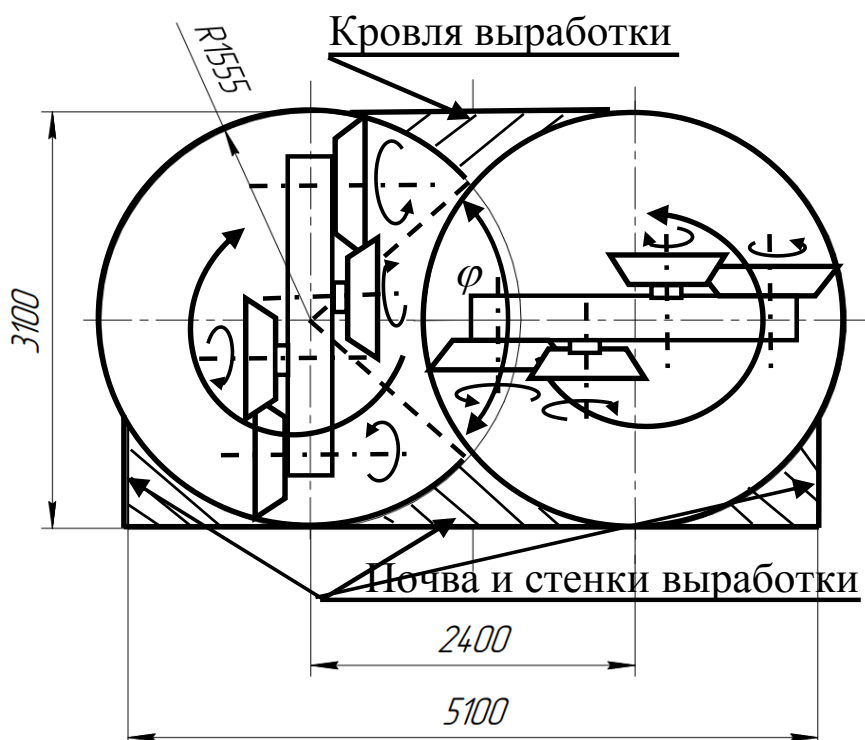


Рисунок 1 – Сечение выработки и ее параметры

Вес горного комбайна «Универсал-600» достигает 110 тонн, а мощность зубчатых приводов каждого из двух исполнительных органов – 200 кВт. При этом каждый исполнительный орган кроме привода собственного вращения имеет две кинематические ветви привода вращения режущих дисков, установленных на выходных валах в соответствующих рукоятях, нагрузка между которыми, как правило, распределяется неравномерно.

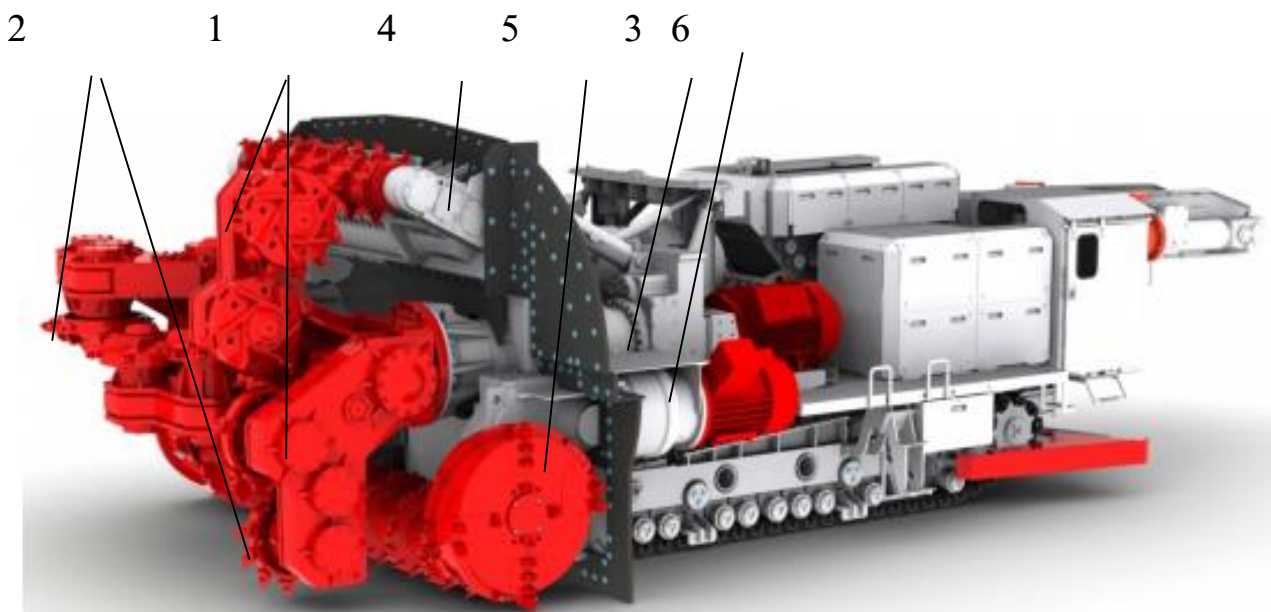
Проведение ремонтных работ комбайна непосредственно в создаваемой им выработке крайне затруднено из-за стесненных и слабоосвещенных в ней условий. Вместе с тем, около половины всех отказов связано с выходом из строя зубчатых приводов исполнительных органов [1], что, в свою очередь, обусловлено их перегруженностью вследствие неравномерности распределения нагрузки между ветвями в рукоятях каждого исполнительного органа.

Исследованию нагруженности зубчатых приводов исполнительных органов и созданию систем ее мониторинга в процессе эксплуатации посвящено значительное число исследований [2–5]. Однако до настоящего времени эта проблема по существу не решена и ее по праву можно отнести к одной из наиболее актуальных для горных комбайнов.

Цель исследований – разработка системы мониторинга нагруженности зубчатых приводов исполнительных органов горного комбайна.

Методические подходы при создании системы мониторинга

Общий вид горного комбайна «Универсал-600», созданного и изготовленного на ОАО «ЛМЗ Универсал», входящего в состав холдинга «Нива-Холдинг» (г. Солигорск), показан на рисунке 2, его габаритные параметры, влияющие на формирование объема выработки? – на рисунке 3.



1 – рукояти привода вращения режущих дисков 2; 3 – привод вращения исполнительного органа; 4 – редуктор привода отбойного устройства; 5 – бермовый орган; 6 – привод бермового органа
Рисунок 2 – Общий вид горного комбайна «Универсал-600»

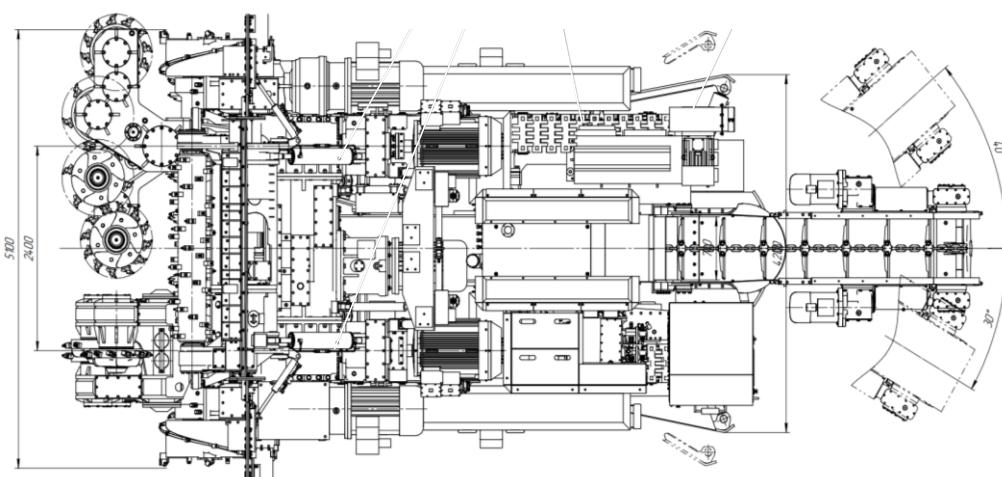


Рисунок 3 – Габаритные параметры горного комбайна «Универсал-600» на виде сверху, влияющие на формирование объема выработки

В состав горного комбайна входят зубчатые редукторы приводов:

- привода вращения режущих дисков для двух органов планетарного типа, каждый из которых имеет по четыре таких диска для создания режущими органами двух опережающих цилиндрических полостей четырьмя режущими дисками с резцами;
- привода верхнего отбойного устройства, формирующего кровлю выработки;
- привода бермового органа, формирующего почву и нижнюю часть стенок выработки, по которой движется горный комбайн.

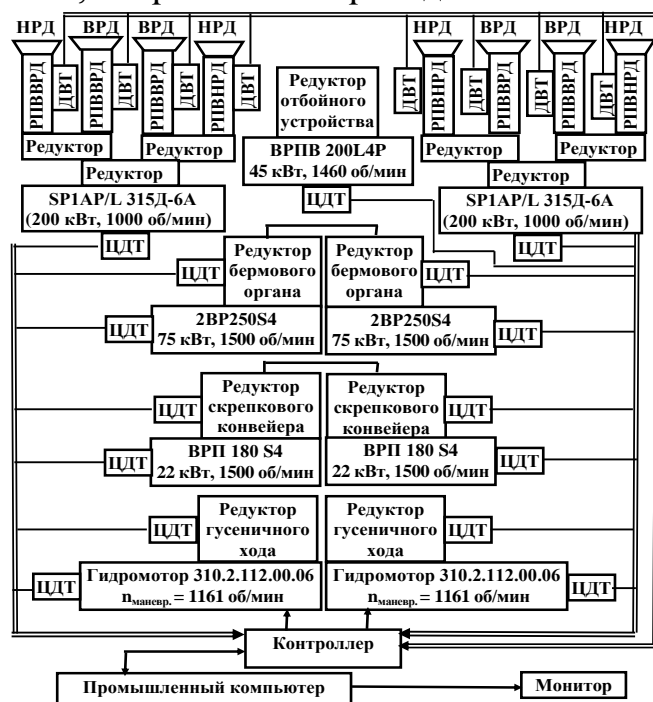
В основу методических подходов при создании системы мониторинга нагруженности зубчатых приводов комбайна «Универсал-600» были положены результаты предварительных исследований:

- параметров осциллограмм механических колебаний с собственными частотами колебаний компонентов комбайна, возникающих при поломке резцов и их анализ с привязкой к реальному масштабу времени;
- параметров колебаний мощности, потребляемой исполнительным органом при его функционировании.

Результаты исследований и их обсуждение. Схема разработанной мобильной автоматизированной системы мониторинга (МАСМ) поломок резцов режущих дисков горного комбайна «Универсал-600» показана на рисунке 4, схема коммутации средств контроля, обработки и хранения диагностических данных и визуализации результатов мониторинга неравномерности нагружения рукоятей двух кинематических ветвей исполнительного органа – на рисунке 5.

Система мониторинга активизируется кнопкой «пуск» на ее управляющем модуле перед запуском приводов исполнительных органов комбайна. При проведении мониторинга в течение 5 минут осуществляется регистрация мощности, потребляемой приводами исполнительных органов, и колебаний с частотой 5 Гц. Из полученных данных в вычислительном модуле МАСМ формируются файлы данных с привязкой к реальному масштабу времени. Обработка полученных данных осуществляется с использованием методов математической статистики.

Заключение. Разработана мобильная автоматизированная система мониторинга приводов вращения режущих дисков горного комбайна «Универсал-600» и схема средств для ее реализации, учитывающая минимально необходимую и достаточную номенклатуру регистрируемых системой мониторинга параметров. В ее состав входят параметры колебаний, возникающих на корпусе подшипникового узла вала с режущими дисками при функционировании планетарного зубчатого редуктора привода их вращения и динамического взаимодействия резцов этих дисков с обрабатываемой породой, температура наиболее нагруженных подшипниковых узлов зубчатого редуктора привода вращения режущих дисков и мгновенная мощность, потребляемая приводами исполнительных органов.



*НРД, ВРД – соответственно наружный и внутренний режущий диски;
 ДВТ – датчик вибрации и температуры; РПВНВД, РПВВД – редуктора
 приводов вращения, соответственно наружного и внутреннего режущих дисков;
 ЦДТ – цифровой датчик температуры*

Рисунок 4 – Схема системы мониторинга поломок резцов режущих дисков горного комбайна «Универсал – 600»

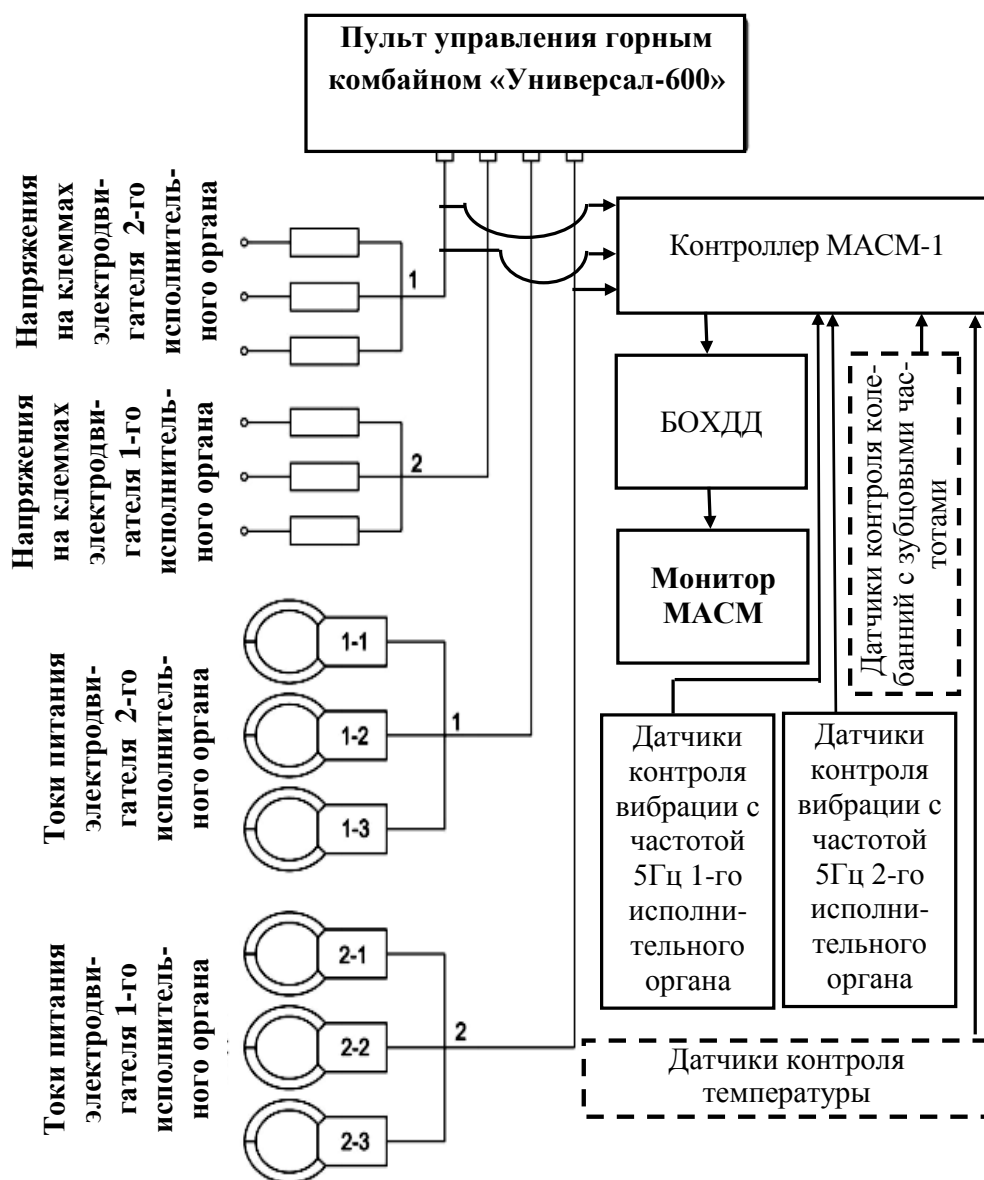


Рисунок 5 – Схема коммутации средств контроля, обработки и хранения диагностических данных и визуализации результатов мониторинга горного комбайна «Универсал-600» (пунктиром показано подсоединение дополнительных датчиков контроля колебаний с зубцовыми частотами и датчиков контроля температуры при использовании существующих методов вибромониторинга и мониторинга тепловой нагруженности)

Обработка полученных диагностических данных позволяет:

- своевременно выявить поломку резца на режущем диске и оперативно восстановить его работоспособность путем замены резца;
- определить неравномерность распределения нагрузки между ветвями приводов исполнительных органов и их реальную нагруженность, автоматизированное сравнение которой с допустимой позволяет избежать возникновения аварийной ситуации, например, путем регулирования подачи на забой и существенно повысить достоверность прогнозирования остаточного ресурса зубчатых передач.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трифанов, М. Г. Оценка нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» для выбора технически обоснованных режимов работы в реальных условиях эксплуатации: Диссертация на соиск. уч. ст. к.т.н. / М. Г. Трифанов. – Пермь, 2018. – 164 с.
2. Палев, П. П. Нагруженность и усталостная долговечность привода исполнительного органа горнопроходческого комбайна. Диссертация на соиск. уч. ст. д.т.н.: 05.05.06 Горные машины / П. П. Палев. – Караганда, 1982. – 423 с.
3. Ещин, Е. К. Теория предельных режимов работы горных машин / Е. К. Ещин. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1995. – 232 с.
4. Афанасьев, А. И. Совершенствование трансмиссии горных машин как средство повышения их надежности: автореф. дис.... докт. техн. наук.: 05.05.06 / А. И. Афанасьев. – Екатеринбург, 1996. – 43 с.
5. Иванов, С. Л. Повышение ресурса трансмиссий горных машин на основе оценки энергонагруженности их элементов / С. Л. Иванов. – СПб. : Изд-во Санкт-Петербург. горного ин-та, 1999. – 92 с.

УДК 621.793

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ОКСИДОВ В УСЛОВИЯХ ГИДРОАБРАЗИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Ялковский Н. С.

Брестский государственный технический университет;
г. Брест, Республика Беларусь

Интенсивному гидроабразивному износу подвергается оборудование в энергетической, абразивной, цементной, металлургической промышленности и других отраслях, связанных с дроблением, измельчением, резкой и транспортировкой сырья и материалов.

Перспективным методом повышения долговечности оборудования, работающего в условиях гидроабразивного износа, является формирование на изнашиваемых поверхностях различного рода защитных покрытий, в том числе газотермических покрытий из керамических материалов.

Не смотря на достаточно широкое применение, особенности гидроабразивного изнашивания покрытий данного типа еще недостаточно изучены.

В данной работе исследовались свойства плазменного покрытия из механической смеси оксидов алюминия Al_2O_3 и титана TiO_2 . Рассматривались покрытия с 2, 8, 14 и 20 % оксида титана в составе.

Покрытие формировалось из порошков зернистостью 40 мкм на установке плазменного напыления швейцарской фирмы “Плазма-Техник АГ”. В качестве плазмообразующего газа использовался азот.

Напыление производилось на образцы, выполненные из стали 40, имеющие форму диска с размерами: диаметр – 50 мм, высота – 10 мм.

Для увеличения прочности сцепления напыляемого покрытия с поверхностью образца использовался подслоя из алюминид никеля (NiAl) толщиной 0,1 мм. Перед напылением поверхность образца подвергалась дробеструйной обработке.

Толщина защитного покрытия составляла 0,4 мм, его микротвердость 11000 МПа.

Определение износостойкости покрытия производилось на установке роторного типа с вращающимися образцами.

Поверхность образца, подвергаясь абразивному изнашиванию, имела площадь 12 см². Использовалась весовая методика определения величины износа. Определение массы образцов до и после испытаний производилось на аналитических весах модели ВЛА-200-М, которые обеспечивают взвешивание образцов массой до 200 г с точностью 0,0001 г.

Определялся объемный износ защитного покрытия, при этом плотность покрытия в соответствии с [1] принималась равной 3,4 г/см³.

Полученные результаты сравнивались с величиной гидроабразивного износа стали 40, принятой в качестве эталона.

Рассматривалось влияние на абразивное изнашивание факторов, которые могут привести к инверсии (изменению) ряда износостойкости. К числу последних относятся: угол взаимодействия абразивного потока с поверхностью изнашиваемого материала (α) и коэффициент твердости.

Угол взаимодействия (α) один из основных параметров, определяющих характер изнашивания. При значениях α , близких к 90°, в поверхностных слоях материала реализуются процессы, аналогичные процессам, происходящим при ударно-абразивном изнашивании. В этом случае в зависимости от характеристик материала и интенсивности внешнего воздействия преобладают полидеформационное, усталостное разрушение или выкрашивание. Когда угол α близок к 0°, гидроабразивное изнашивание аналогично изнашиванию в условиях скольжения по абразиву. При этом разрушение материала протекает преимущественно в результате микрорезания и деформирования с образованием коротких царапин.

В рассматриваемой работе величина угла α имеет значения 20 и 80°.

Коэффициент твердости представляет собой отношение твердости абразивных частиц к твердости изнашиваемого материала. Для того чтобы получить предельную характеристику износостойкости покрытия, использовался абразив, твердость которого значительно (в 1,3...1,7 раза) превышает твердость покрытия. Учитывая, что твердость покрытия составляет 11000 МПа, в качестве абразивного материала принимаем электрокорунд твердостью 18000 МПа.

Остальные факторы, определяющие интенсивность изнашивания поддерживались в процессе испытаний на постоянном уровне:

- скорость гидроабразивного потока – 52 м/мин.
- размер абразивных зерен – 0,315...0,4 мм.
- концентрация абразива в потоке – 30...35 %
- испытания проводились в нейтральной среде.

Результаты измерений и расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Объемный износ и относительная износостойкость плазменных покрытий из смеси оксидов алюминия и титана.

Содержание TiO ₂ в покрытии	Объемный износ мм ³ /час		Относительная износостойкость	
	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 80^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 80^\circ$
2 %	0,98	1,51	0,40	0,22
8 %	0,86	1,43	0,46	0,23
14 %	0,78	1,29	0,50	0,26
20 %	0,94	1,33	0,44	0,25

Наибольшей износостойкостью в обоих рассматриваемых случаях (воздействии гидроабразивного потока под углами 20° и 80°) обладает покрытие состава 86 % Al_2O_3 и 14 % TiO_2 . Следовательно, при таком соотношении компонентов формируемое покрытие обладает оптимальным соотношением наиболее важных для износостойкости свойств (твердость, пористость, когезионная прочность).

Как свидетельствуют полученные результаты, гидроабразивная износостойкость плазменных покрытий из механической смеси оксидов алюминия и титана невысока и в зависимости от условий воздействия абразивного потока составляет 0,40–0,50 при угле взаимодействия 20° и 0,22–0,26 при угле взаимодействия 80° . Этот факт определяется особенностями строения плазменного покрытия, а именно:

1. Высокой хрупкостью керамического покрытия.
2. Наличием в покрытии большого числа пор, которые уменьшают прочность материала и служат концентраторами напряжений при разрушении.
3. Высоким уровнем остаточных напряжений в материале покрытия.
4. Невысокой прочностью сцепления между частицами покрытия, так как взаимодействие между частицами покрытия вследствие скоротечности его формирования ограничивается только химическими связями.

Таким образом, покрытия данного типа не могут использоваться для эффективной защиты в условиях гидроабразивного изнашивания в случае, когда твердость абразива значительно превышает твердость защитного покрытия.

Сообщения об их применении, вероятно, относятся к изнашиванию абразивными материалами относительно невысокой твердости, либо к износу в агрессивных средах, когда помимо абразивного воздействия имеет место интенсивное разупрочняющее воздействие среды. В этом случае керамические покрытия в силу своей высокой химической стойкости может быть достаточно эффективным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов (справочник) / Ю. С. Борисов [и др.]. – К.: Наукова думка, 1987. – 544 с.
2. Мышкин, Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.

**ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ.
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ**

К ВОПРОСУ ОБ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

*Босяков М. Н.¹, Моисеенко А. Н.¹, Саханько С. А.², Нерода М. В.²,
Парфиевич А. Н.²*

- 1) Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
- 2) Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

Проблема упрочнения поверхности деталей машин, штампового и режущего инструмента хорошо известна практически на любом металлообрабатывающем производстве. В настоящее время накоплен большой опыт по применению различных методов химико-термической обработки (ХТО) материалов, когда поверхностные слои металлов подвергаются диффузионному насыщению элементами внедрения, в результате которого на поверхности изделия образуется новый, отличающийся от сердцевины слой. Одной из разновидностей ХТО является ионное азотирование, отличающееся от классического газового азотирования тем, что процесс проводится в вакууме в тлеющем разряде. В данном случае активную среду, прежде всего атомы азота, формирует тлеющий разряд вследствие процессов диссоциации молекул азота или аммиака в зоне отрицательного свечения, а также в результате диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов азота на поверхности детали-катода [1,2].

К параметрам, оказывающим воздействие на структуру и свойства азотируемых сталей, могут быть отнесены: температура, продолжительность насыщения, состав азотсодержащей среды, давление газа, электрические параметры тлеющего разряда (ток, напряжение) и др. [1, 2]. Путем регулирования данными параметрами процесса можно оптимизировать структуру и свойства нитридной и диффузионной зоны с учетом условий эксплуатации. Однако в большинстве случаев приводимые в литературе данные по процессу ионного азотирования той или иной стали присущи конкретному типу оборудования и попытки воспроизвести эти параметры на установке с другими габаритами рабочего пространства не приводят к желаемому результату.

Целью настоящей работы является анализ характерных параметров процесса ионного азотирования с точки зрения их информативности, т. е. возможности переноса данных, полученных на одном оборудовании, на другой тип оборудования для получения похожих результатов по глубине азотированного слоя и твердости поверхности.

Базовыми параметрами режима газового и ионного азотирования являются температура изотермической выдержки и ее длительность - эти параметры определяют глубину азотированного слоя и твердость поверхности. При газовом азотировании химическая активность (т. е. азотирующая способность среды в печи) определяется потенциалом азотирования или степенью диссоциации аммиака [3]; а при ионном азотировании появляются новые дополнительные параметры, характеризующие азотирующую способность разряда - газовый состав смеси, его расход, а также электрические характеристики тлеющего разряда - ток, напряжение, длительность импульса и длительность паузы между импульсами напряжения.

Для создания тлеющего разряда вокруг поверхности детали можно использовать постоянный и переменный (либо пульсирующий) ток. Азотирование в пульсирующей плазме в последнее время находит все большее применение вследствие тех преимуществ, которыми она обладает: возможности управления электрическими параметрами разряда за счет изменения скважности импульсов; отсутствию необходимости применения специальных дугогасящих устройств, так как дугообразования не происходит благодаря периодическому отключению разряда; уменьшению размеров глухих и открытых полостей, в которые проникает и стабильно горит разряд при прочих равных условиях.

Следует отметить, что тлеющий разряд при ионном азотировании должен существовать в форме аномального, характерным признаком которого является «горение» разряда по всей поверхности деталей (рис. 1а, точка А), а при увеличении прикладываемого напряжения соответственно возрастает и разрядный ток (диапазон А–Б на рис. 1а). Рабочее напряжение на стадии изотермической выдержки на установках промышленного типа составляет обычно 350–600 В. Схематично вольт-амперная характеристика тлеющего разряда представлена на рис. 1,б [4].

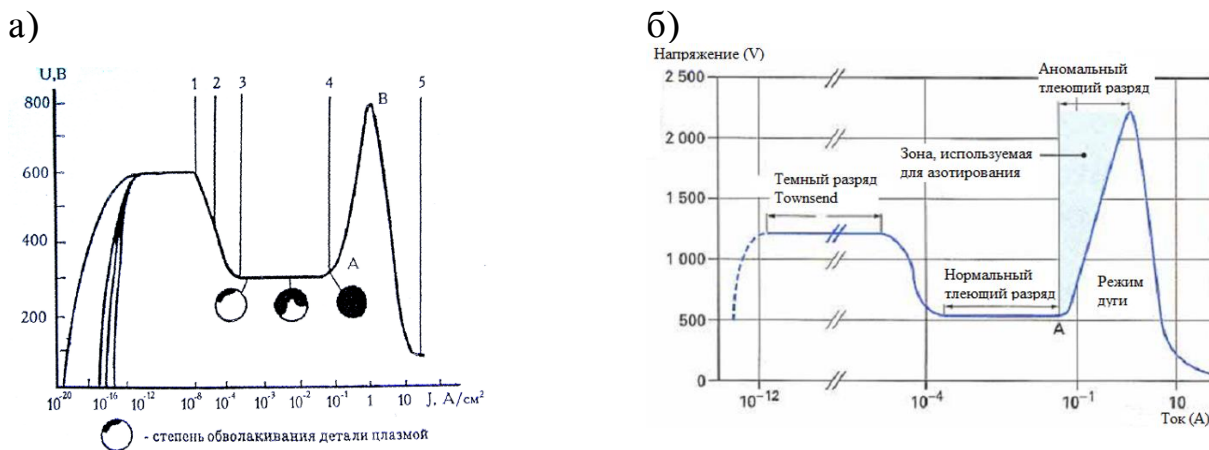
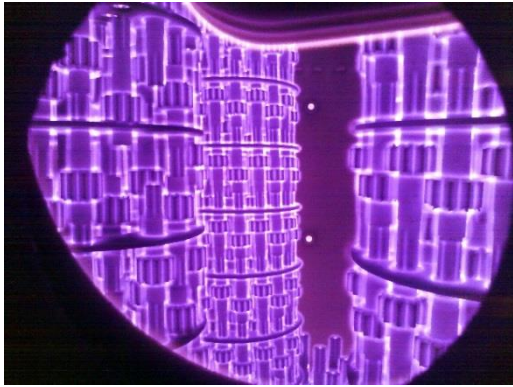


Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика тлеющего разряда

При нормальном тлеющем разряде свечением охвачена только часть катода (рис. 1, а), и при увеличении вкладываемой мощности растет лишь разрядный ток и увеличивается площадь катода, охваченная разрядом, в то время как величина катодного падения потенциала ($U_{кпп}$) остается неизменной. Это так называемое нормальное катодное падение потенциала, которое является базовым параметром тлеющего разряда. Если катод изготовлен из сплава железа, то для азота значение $U_{кпп}$ составляет 215 В, для водорода – 250 В и для аргона – 165 В [5].

Вторым базовым параметром, который позволяет разделять тлеющий разряд на нормальный и аномальный, является «нормальная плотность тока» – J/p^2 , величина которой для катода из сплава железа при температуре 300 К для азота составляет $2,26 \cdot 10^{-4}$ А/(м²·Па²), для аргона – $9,0 \cdot 10^{-5}$ А/(м²·Па²) и для водорода – $4,1 \cdot 10^{-5}$ А/(м²·Па²) [5]. Следовательно, если реальное значение плотности тока в процессе обработки при конкретном давлении и температуре будет меньше, чем значение нормальной плотности тока для азота, который является основным компонентом рабочей смеси, то разряд может быть частично нормальным, и частично аномальным, то есть на части садки разряд будет отсутствовать (рис. 2, б) [4].

а)



б)



Рисунок 2 – Варианты тлеющего разряда при ионном азотировании: аномальный (а) и нормальный на части садки при повышении давления в камере при постоянной мощности (б)

Таким образом, для описания режима азотирования важными параметрами являются давление рабочей газовой смеси на основе азота и плотность разрядного тока. Следует отметить, что лишь при измерении давления с помощью баратрона значение рабочего давления можно использовать в расчетах, поскольку оно не зависит от состава газовой смеси. Если же в качестве датчика давления используется датчик типа Пирани, значения которого существенно зависят от состава рабочей смеси, то для получения значения истинного давления необходимо использовать пересчетные формулы. Если в работе, например, отсутствует информация об используемом типе датчика давления при проведении процесса азотирования, то приводимые значения давления не могут быть использованы в качестве параметров сравнения с другими режимами обработки.

Для тлеющего разряда в различных газах существует определенная взаимосвязь параметра j/p^2 и величины катодного падения потенциала $U_{кпп}$ (рисунок 3) [5].

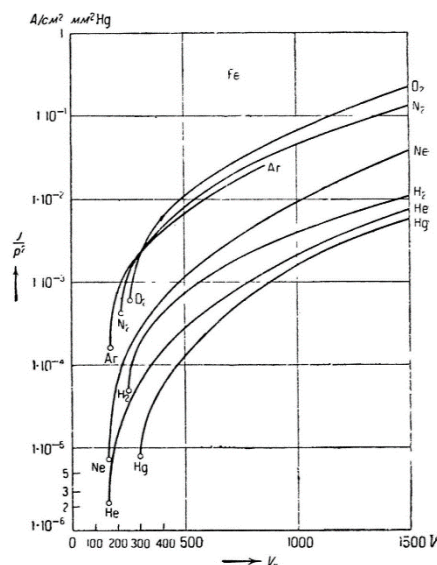


Рисунок 3 – Зависимость относительной плотности тока тлеющего разряда с железным катодом от катодного падения потенциала

Как видно из представленных данных, в достаточно большом интервале значений j/p^2 , величина катодного падения потенциала вначале незначительно от-

личается от значений нормального катодного падения (на графике это обозначено кружками), а затем наблюдается рост $U_{\text{кпп}}$. А это означает, что при определенных значениях давления и тока разряд может существовать в двух видах: аномальном и частично нормальном – т.е. увеличение прикладываемого напряжения будет приводить лишь к росту тока и, при определенных сочетаниях ток–давление на части садки разряд может вообще отсутствовать, что является недопустимым (см. рис. 2).

Таким образом, параметр j/p^2 является жестко связанным с величиной катодного падения потенциала $U_{\text{кпп}}$, а на общего напряжения $U_{\text{разр}}$ между анодом (стенками камеры) и катодом-садкой. Как правило, величина $U_{\text{кпп}}$ составляет в большинстве случаев значение от 80 до 90 % приложенного к электродам напряжения в зависимости от давления и состава плазмообразующего газа [6] и для оценки можно использовать среднее значение – 0,85. Следует отметить, что $U_{\text{кпп}}$ всегда меньше приложенного к катоду напряжения и зависит от расстояния «деталь – стенка камеры» и степени аномальности разряда, но при ионном азотировании должно превышать величину нормального катодного падения потенциала [6]. Приложенное к катоду напряжение горения разряда $U_{\text{разр}}$ равно сумме падений напряжения на отдельных участках разряда; $U_{\text{кпп}}$ – катодное падение потенциала, $U_{\text{а}}$ – анодное падение потенциала (его, как правило, принимают на уровне потенциала ионизации газа [7] и $U_{\text{ст}}$ – падение напряжения на положительном столбе разряда. Поскольку положительный столб в разряде при реальных режимах обработки практически отсутствует, то эта зона разряда классифицируется как остов, причем падение напряжения на нем составляет единицы вольт на 10 мм длины остова [7]. Это значит, что при достаточном удалении садки деталей от стенок камеры (при редкой загрузке) падение напряжения на остова может составлять десятки вольт и катодное падение потенциала может быть меньше, чем 80 %, что приведет к увеличению электрической мощности, необходимой для поддержания необходимой температуры садки по сравнению с садкой, максимально приближенной к стенкам камеры (рис. 4).

а)



б)



а) – редкая, б) – плотная

Рисунок 4 – Различная степень загрузки камеры деталями

Таким образом, информативность параметра «напряжение тлеющего разряда» для сравнительного анализа различных режимов может оказаться практически нулевой. Следует отметить, что при расчете параметра j/p^2 в качестве давления (если оно измерено баратроном или приведено пересчитанное значение для датчика Пирани) следует использовать так называемое «приведенное давление», т. е. давление с учетом нагрева газа в катодной области разряда [8]:

$$p_{\text{прив}} = p_{\text{изм}} \frac{300}{T_{\text{кат}}}, \quad (1)$$

где $p_{\text{прив}}$ – приведенное давление к температуре, Па;

$p_{\text{изм}}$ – измеряемое давление, Па; $T_{\text{кат}}$ – температура катода (деталей), К.

В большинстве работ по исследованию процесса ионного азотирования в качестве рабочего газа предлагается использовать смесь азота и водорода в пропорции 1:3 (диссоциированный аммиак), либо в другой пропорции [1–10].

Так, например, на рисунке 5 показано влияние процентного содержания азота в смеси с водородом на формирование упрочненного слоя на стали Н-13 (отечественный аналог – 4Х5МФ1С) [9].

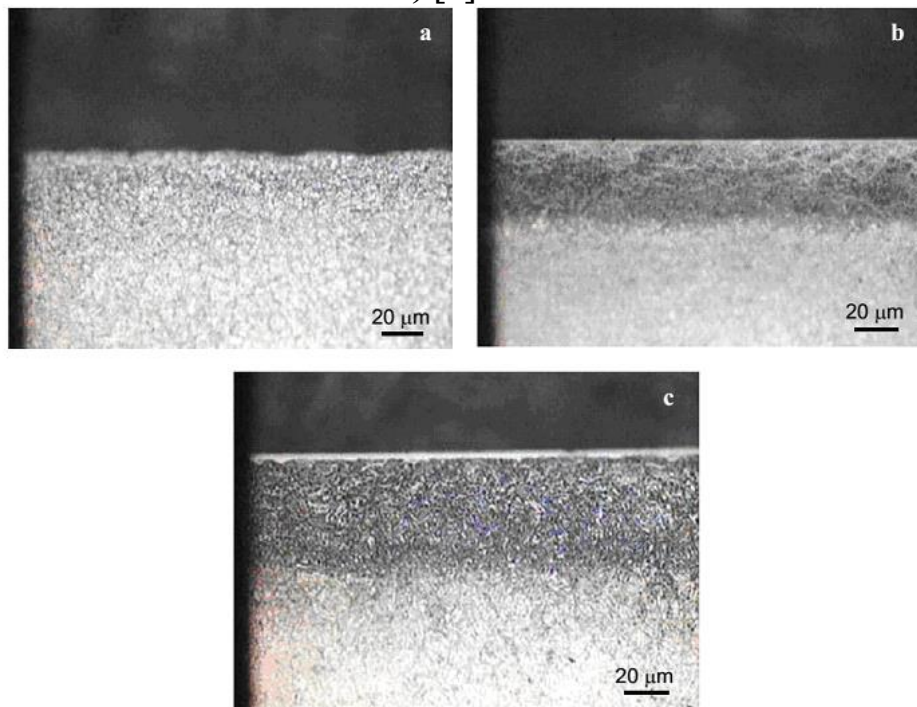
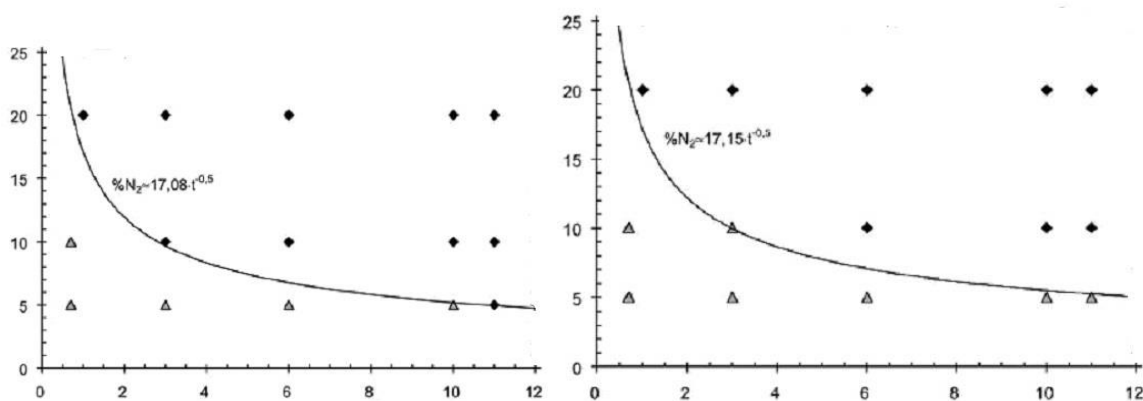


Рисунок 5 – Вид азотированного слоя на стали Н-13 после обработки в течение 3 часов при температуре 520 °С: а) 25 % азота в смеси с водородом; б) 50 % азота в смеси с водородом; в) 75 % азота в смеси с водородом

Приведенные литературные данные наглядно демонстрируют тот факт, что процентное содержание азота в газовой смеси с водородом существенно влияет как на глубину слоя, так и на образование на поверхности нитридного белого слоя.

При ионном азотировании, как и при газовом, существует также взаимосвязь между содержанием азота в смеси и временем образования нитридного слоя. Доказательством тому служат приведённые на рисунке 6 кривые «азотного потенциала» (процентного содержания азота) при азотировании сталей D-2 (отечественный аналог X12M) и уже упоминавшийся стали Н-13, характеризующие состав образующегося азотированного слоя – с белым нитридным слоем или без него.

содержание азота, %



часы

Рисунок 6 – Кривые «азотного потенциала» для сталей D-2 (слева) и H-13 (справа) при ионном азотировании в смеси $N_2 + H_2$ при 520 °С: ромбы – с образованием белого слоя, треугольники – без белого слоя [10]

К сожалению, использовать полученные в этих работах результаты для организации процесса обработки приведенных марок сталей на другом оборудовании не представляется возможным, так как в данном случае полностью отсутствует информация о параметрах тлеющего разряда, т. е. процентное содержание азота в смеси с водородом или в смеси более сложного состава не является параметром, позволяющим использовать его для воспроизведения схожих условий обработки на другом типе оборудования.

С другой стороны, имеются данные о непосредственном влиянии на процесс формирования азотированного слоя электрических параметров, прежде всего плотности тока разряда, когда при неизменном газовом составе, но при изменении плотности тока, имеются различия по кинетике формирования азотированного слоя. В таблице 1 показано влияние плотности тока разряда на глубину нитридного слоя, полученную на разных сталях.

Таблица 1 – Влияние плотности тока разряда на глубину нитридного слоя, мкм для разных марок сталей. Температура процесса – 560 °С, длительность выдержки – 5 часов, доля азота в смеси с водородом – 25 % [11]

	4,8	9,0	11,8	Плотность тока, А/м ²
16MnCr5 (18ХГТ)	3,0	3,5	5,5	
42CrMo4 (38ХМ)	3,5	4,5	7,0	
X40CrMoV51 (4Х5МФ1С)	0,5	2,5	7,5	
	1,06	1,98	2,6	Плотность потока азота, л/час*м ²

В последней строке таблицы приведены расчетные значения плотности потока азота [12]:

$$П_{N_2} \left(\frac{\text{л}}{\text{час} \cdot \text{м}^2} \right) = 0,897 \cdot j \left(\frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right) \cdot (\%N_2) . \quad (2)$$

Это выражение описывает максимальную плотность потока ионов азота на поверхность катода, в предположении, что ионизация компонентов газовой смеси в разряде происходит пропорционально их доле в общем расходе газа. Но это не значит, что все молекулярные ионы азота при диссоциативной рекомбинации дадут два атома азота, которые непременно продиффундируют в металл.

На поверхности катода-детали возможна также и гетерогенная рекомбинация образовавшихся атомов и затем их уход из катодной области разряда.

Пусть, например, плотность тока разряда при азотировании стали 18ХГТ составляет 6 А/м^2 , и по требованиям КД глубина нитридного слоя должна быть на уровне 5–6 мкм, тогда, согласно данным таблицы 1, процентное содержание азота в составе смеси, например, с водородом и аргоном должно быть - $\%N_2 = (2,6 \text{ л/час} \cdot \text{м}^2) : 0,897 : 6 = 0,48$ и, если суммарный расход газовой смеси составляет, например, 50 л/час, то расход азота должен быть $G_{N_2} = 0,48 \cdot 50 = 24 \text{ л/час}$.

Если, например, обрабатываемая площадь составляет 15 м^2 , то расход азота должен быть $G_{N_2} = 2,6 \text{ л/час} \cdot \text{м}^2 \cdot 15 \text{ м}^2 = 39 \text{ л/час}$, а общий расход газовой смеси $G_{\Sigma} = 39 \text{ л/час} : 0,48 = 81 \text{ л/час}$.

Таким образом, чтобы использовать литературные данные по режиму ионного азотирования той или иной марки стали, полученные на одном типе оборудования для получения схожих результатов на другом, нужно, помимо температуры выдержки и ее длительности, знание следующих параметров процесса:

- плотности тока разряда;
- давления;
- суммарного расхода газа;
- доли азота в составе этой смеси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Берлин, Е. В. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Е. В. Берлин, Н. Н. Коваль, Л. А. Сейдман. М. : Техносфера, 2012. – 464 с.
2. Пастух, И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
3. Лахтин, Ю. М. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин. – М. : «Металлургия», 1991. – 320 с.
4. Босьяков, М. Н. Исследование и оптимизация параметров процессов плазменной химико-термической обработки изделий машиностроения / М. Н. Босьяков [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. научных трудов: В 2 кн. Кн. 1: Новые технологии и материалы. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2021. – С. 81–104.
5. Энгель А. Физика и техника электрического разряда в газах / А. Энгель. – ОНТИ-НКТП, 1936. – Т. 2. – 384 с.
6. Marciniak, A. Non-uniform Heating Effects During Treatment in a Glow Discharge / A. Marciniak // Thin Solid Films. – 1988. – Vol.156. – P. 337–344.
7. Капцов, Н. А. Электрические явления в газах и вакууме / Н. А. Капцов. – М. : ОГИЗ, 1947. – 810 с.
8. Голубев, В. С. Тлеющий разряд повышенного давления / В. С. Голубев, С. В. Пашкин. – М. : Наука, 1990. – 335 с.
9. A.R.Franco Jr., C.M.Garzon Ospina, A.P.Tschiptschin. Analise numerica e experimental da cinetica de nitretacao a plasma de acos-ferramenta. Revista ABM, Sao Paulo, v.1, № 1, p.6-11.
10. Parucker, M. L. Estudi of the gas atmosphere in plasma nitriding of AISI H13 / M. L. Parucker [et al.] // Proceedings of COBEM 2005 18th International Congress of Mechanical Engineering, 6–11 November 2005 / Ouro Preto, MG. – P. 215–219
11. В. Edenhofer. Fortschritte in der Prozessregelung beim Plasmaaufkohlen und Plasmanitrieren. HTM, 44, 1989, s. 339-346.
12. Bosyakov M.N., Kozlov A.A., Pobol I.L Nitrogen transfer during ion nitriding // Surface Engineering. – 2015. – Vol. 3. – P. 3–10.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОУГЛЕРОДНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ САМОФЛЮСУЮЩЕГОСЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПГ-СР4, ОПЛАВЛЕННОГО ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

Ванюк Э.А.¹, Соколов И.О.², Куис Д.В.³, Раковец А.С.³, Кришталь С.А.¹

¹ Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

² УО «Республиканский институт профессионального образования»

³ УО «Белорусский государственный технологический университет»

Введение. Постоянное повышение скоростей и нагрузок различного оборудования серьезно ужесточает требования к качеству узлов и механизмов машин, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях, в том числе к свойствам рабочих поверхностей деталей. Использование легированных сталей, обеспечивающих высокие физико-механические свойства деталей? весомо отражается на расходах предприятий из-за их высокой стоимости, кроме того являющихся статьей импорта для предприятий республики.

Значительно сократить расходы таких материалов позволяют технологии газотермического нанесения покрытий на рабочие поверхности деталей, обеспечивающие физико-механические свойства и эксплуатационные показатели поверхностей деталей из конструкционных сталей на уровень специальных сталей и сплавов.

Технология газотермического напыления позволяет получать функциональные защитные, в том числе композиционные покрытия за счет усовершенствованного технологического оборудования с программным обеспечением. Вместе с развитием оборудования непрерывно развиваются и материалы для газотермического напыления.

Для создания конкуренции на рынке необходимо постоянно совершенствовать как оборудование для газотермического напыления, так и материалы, используемые для нанесения покрытий. В связи с этим экономически и технически целесообразно развивать принципиально новый подход к выбору материалов уже на стадии проектирования. Одно из таких направлений — это модифицирование порошковых материалов различными наноуглеродными добавками. В качестве таких добавок целесообразно использовать фуллерены (фуллерен — молекулярное соединение, представляющее собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из трёхкоординированных атомов углерода).

Фуллерены были открыты в 1985 году и вызвали большой интерес в научном сообществе по всему миру [1]. После получения в 1996 году Нобелевской премии за эту разработку, научный интерес к фуллеренам стал ослабевать за счет их высокой стоимости (от 15 у. е. до 300 у. е. в зависимости от степени очистки). Получают фуллерены из фуллереносодержащей сажи, которая образуется на стенках камеры при сгорании графитовых электродов под низким давлением в среде гелия [2]. В такой саже содержание фуллеренов в пределах 10–12 % от

общего объема [2], а стоимость ее на порядок ниже стоимости чистых фуллеренов. Однако сегодня недостаточно исследовано влияния фуллереновой сажи на физико-механические свойства газотермических покрытий.

Анализ работ [3, 4] показал, что введение нанокремниевых компонентов в виде ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза (УДА) в электрохимические покрытия насыщает покрытия сверхтвердыми частицами, а также способствует диспергированию кристаллов осаждаемого металла. В результате повышаются такие показатели покрытий, как износостойкость, микротвердость, адгезия покрытий и их коррозионная стойкость существенно повышаются.

В связи с этим было выдвинуто предположение, что при модифицировании самофлюсующихся порошковых материалов для газотермического напыления нанокремниевыми компонентами фуллереновой сажи, микротвердость покрытий увеличится.

Цель. Исследование влияния нанокремниевых модификаторов на микротвердость самофлюсующегося покрытия ПГ-СР4, оплавленного лазерным лучом.

Материалы. Для проведения исследований была выбрана порошковая композиция ПГ-СР4 (хим. состав основа Ni; 13–17 %Cr; 0,6–1 % C; 3–5 % Si; 2,5–4 % В; 4 %Fe), которую перед нанесением покрытия модифицировали 1% ед.масс. компонентами фуллереновой сажи. Для сравнения результатов также производилась модификация ПГ-СР4 1 % ед.масс. обычным графитом и использовалось покрытие без нанокремниевых модификаторов. Смешивание порошковых композиций осуществлялось в лопастной механической мельнице.

Нанесение покрытий. Покрытия наносились газопламенным напылением с использованием газотермической установки мод. ТРУ-2.1.Р, разработанной на базе отраслевой научно-исследовательской лаборатории плазменных и лазерных технологий БНТУ (давление воздуха 0,2 МПа, давление воздуха кислорода 0,3 МПа, давление МАФ 0,18 МПа, толщина покрытия при газопламенном напылении $h \approx 0,4$ мм). Оплавление сформированного слоя покрытия осуществлялось на лазерной установке (плотность лазерного пучка $P = 1$ кВт; развертка 400x050; расстояние от сопла до поверхности образца $l = 350$ мм; ширина пятна лазерного луча $b = 5$ мм; скорость перемещения лазерного луча $v = 300$ мм/мин).

На рисунке 1 представлено фото экспериментальных образцов ПГ-СР4 (без нанокремниевых компонентов) после лазерного оплавления.



Рисунок 1 – фото экспериментальных образцов ПГ-СР4 (без нанокремниевых компонентов) после лазерного оплавления

Методика исследований. Подготовка микрошлифов осуществлялась по стандартной методике на специализированном оборудовании для материаловграфической пробоподготовки твердых материалов датской фирмы Duramin Struers.

Микротвердость определялась по методу Виккерса на микротвердомере Duramin Struers с нагрузками 10–2000 г. Измерение микротвердости производилось по 25 точкам.

Результаты исследований. Для определения влияния нанокремниевых модификаторов на микротвердость исследования производились у покрытий из ПГ-СР4 модифицированного 1 масс.% компонентами фуллереновой сажи, ПГ-СР4 модифицированного 1 масс.% обычным графитом, а также ПГ-СР4 без модифицирующих компонентов.

Результаты определения микротвердости приведены на рисунках 2–4.

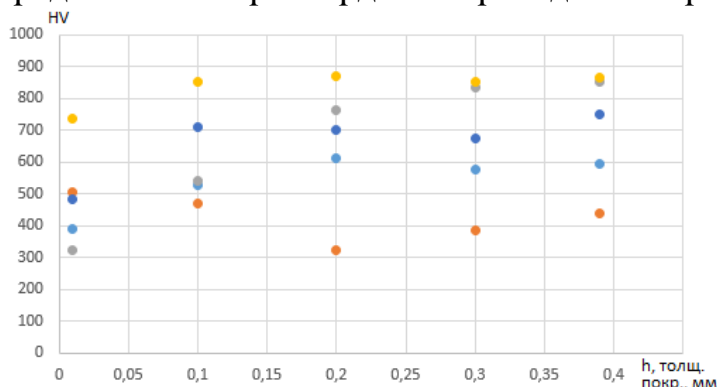


Рисунок 2 – Результаты определения микротвердости покрытия ПГ-СР4 без нанокремниевых модификаторов

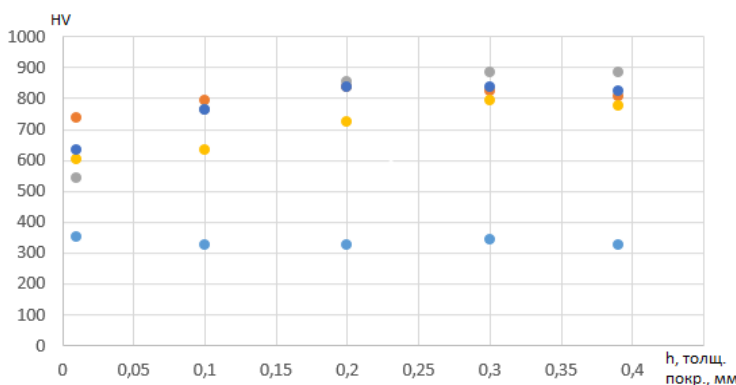


Рисунок 3 – Результаты определения микротвердости покрытия ПГ-СР4 модифицированного 1 масс. % графита

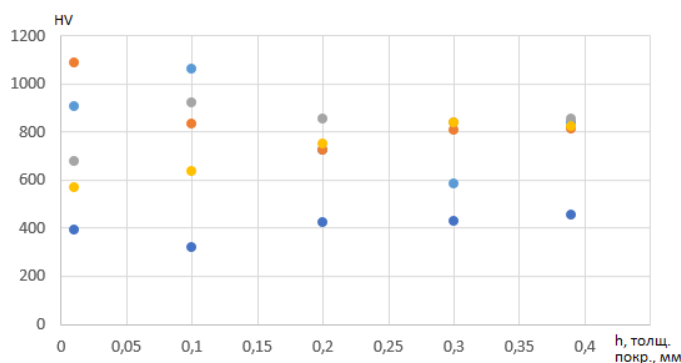


Рисунок 4 – Результаты определения микротвердости покрытия ПГ-СР4, модифицированного 1 масс.% компонентами фуллереновой сажи

На рисунке 5 представлена гистограмма средних значений микротвердости самофлюсующихся покрытий ПГ-СР4, оплавленных лазерным лучом.

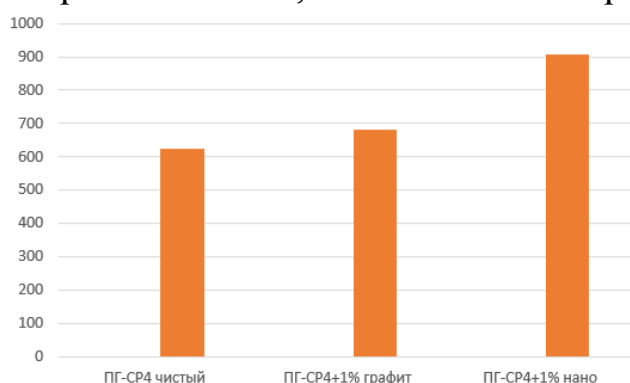


Рисунок 5 – гистограмма средних значений микротвердости самофлюсующихся покрытий ПГ-СР4, оплавленных лазерным лучом (ПГ-СР4 чистый 626 HV, ПГ-СР4 +1% графит 681 HV и ПГ-СР4 +1% нано 907 HV)

Заключение. Анализ результатов выполненных исследований позволил установить, что модификация нанокремнеземными компонентами фуллереновой сажи порошковых композиций самофлюсующихся покрытий ПГ-СР4 обеспечивает повышение микротвердости покрытий в 1,4 раза по сравнению с аналогичными без нанокремнеземных модификаторов, а также в 1,3 раза по сравнению с покрытиями из ПГ-СР4 модифицированных 1 масс.% графитом. Кроме того, подобная модификация может способствовать не только повышению износостойкости покрытий, но и снижению коэффициента трения [5].

Таким образом модификация самофлюсующихся порошковых смесей нанокремнеземными компонентами при формировании газотермических покрытий газопламенным напылением с последующим лазерным оплавлением способствует повышению эксплуатационных характеристик, обеспечивающих увеличение ресурса быстроизнашивающихся деталей, а следовательно, уменьшает затраты на изготовление запасных частей и ремонтно-восстановительные работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грузинская, Е. А. Фуллереновая сажа электродугового синтеза / Е. А. Грузинская [и др.] // Наносистемы: физика, химия, математика, 2012. – 3 (6). – С. 83–90.
2. Горелик, О.П. Кластерная структура частиц фуллереносодержащей сажи и порошка фуллеренов C₆₀ / О.П. Горелик [и др.] // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, вып. 11, – С. 118–125.
3. Тимошков, Ю. В. Свойства композиционных никелевых покрытий с различными типами ультрадисперсных алмазных частиц / Ю. В. Тимошков [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности, 1999, т.7, № 2, с. 20-25.
4. Ващенко, С.В. Электроосаждение износостойких хромовых покрытий из электролитов с ультрадисперсными алмазными порошками / С. В. Ващенко, З. А. Соловьева // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1992. – № 5–6. – С. 45 – 48.
5. Леванцевич, М. А. / Исследование коэффициента трения газотермических покрытий, модифицированных нанокремнеземными компонентами на основе фуллереновой черни / М. А. Леванцевич, И.О. Соколов, Э.А. Ванюк // Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.). – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 33. – С. 50–55.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБИВКИ ОТВЕРСТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ПУАНСОНОМ

Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Хвусевич В.М., Сосновский А.А.

Брестский государственный технический университет;
г. Брест, Республика Беларусь

Пробивка отверстий на штампах при серийном и массовом производстве является высокопроизводительным методом [1]. Надёжная, стабильная и долговечная работа штампов напрямую зависит от его рабочих органов: пуансонов и матриц, так как они воспринимают значительные усилия и напряжения. Задача определения прикладываемых усилий и возникающих напряжений при пробивке отверстий пуансонами заслуживает особого внимания. Зная напряжения и деформации можно подобрать оптимальный материал пуансона, а также метод его упрочнения для увеличения срока службы.

Трудности проведения экспериментальных исследований по непосредственному определению причин выхода пуансонов из строя и напряжений при пробивке отверстий в листовом металле пуансонами цилиндрической формы привели к необходимости теоретического исследования напряжённо-деформированного состояния, т.е. разработки модели учитывающей особенности технологического процесса пробивки отверстий.

Решение данной задачи возможно при помощи вычислительного комплекса *ANSYS Workbench*, который позволяет создать геометрическую модель штампа, задать свойства материала рабочих органов, заготовки, смоделировать процесс пробивки отверстия, исследовать напряжённо-деформированное состояние в процессе пробивки, а также изменять характеристики материалов и параметры технологического процесса. В *ANSYS Workbench 2019 R2* для твёрдотельного динамического анализа используется среда *ANSYS Explicit Dynamics*, которая позволяет проводить расчёты быстропротекающих высоконелинейных процессов в постановках Лагранжа и Эйлера и предоставляет возможность решать все основные задачи явной динамики и быстропротекающих процессов. Программа проводит расчёты при помощи решателей *ANSYS Autodyn*, но в отличие от него использует тот же графический пользовательский интерфейс, что и широко распространённый решатель *ANSYS Mechanical* и другие аналитические системы платформы *ANSYS Workbench*. *Explicit Dynamics* является частью лицензии *ANSYS Mechanical Enterprise* [2].

Моделирование проводилось с учётом реальных условий процесса пробивки отверстия в листовом металле цилиндрическим пуансоном на кривошипном прессе марки КД2128. Пробивку производят в штампах, рабочими органами которых являются пуансон и матрица (рисунок 1), между которыми устанавливают определённый зазор z . Лист или полосу устанавливают на матрицу, а пуансон, опускаясь вместе с верхней частью штампа, внедряется в лист, при этом происходит относительное смещение металла листа в матрицу, которое заканчивается

разрушением металла в зазоре, т. е. пробивкой. Отделенная часть листа проваливается в отверстие матрицы, а отход при ходе пуансона вверх снимается с пуансона съёмником [3].

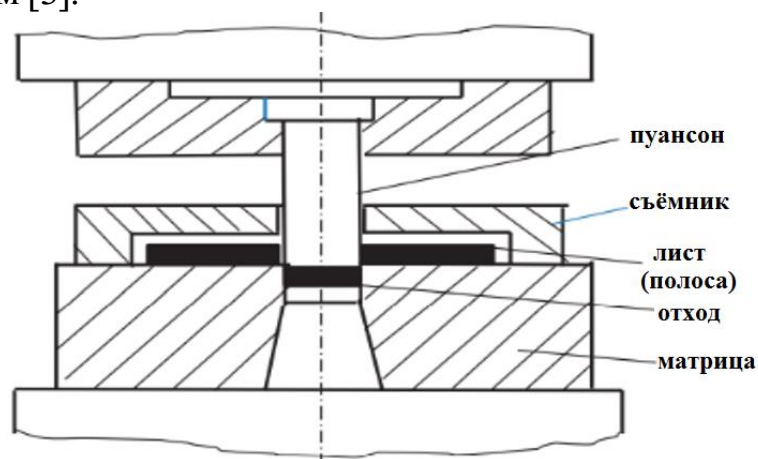


Рисунок 1 – Штамп для пробивки

Схема используемого пуансона представлена на рисунке 2.

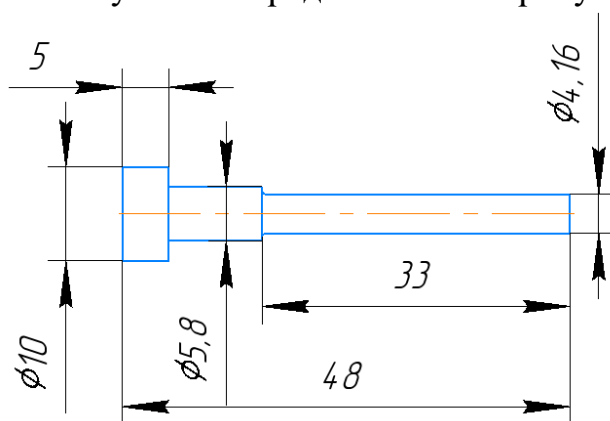


Рисунок 2 – Схема цилиндрического пуансона

На основании технологического процесса пробивки отверстий в разделе «Geometry» вычислительного комплекса ANSYS создаём геометрическую модель штампа (рисунок 3а). Зазор между пуансоном и матрицей варьировался в пределах 5–1 % от толщины пробиваемого металла на сторону. При моделировании толщина листа принималась равной $t = 4$ мм, материал – сталь 20 ГОСТ 1050-88. Материал пуансона – сталь X12МФ ГОСТ 5950-2000, твёрдость 57–60 HRC.

Одной из причин выхода из строя пуансонов является потеря ими продольной устойчивости, вследствие чего создается опасность потери их прямолинейной формы. Пуансон можно рассматривать как стержень, имеющий закрепленный конец и подвергающийся осевому сжатию. Как известно, такое напряженное состояние представляет продольный изгиб. При определенном значении приложенной силы пуансон приобретает состояние неустойчивого равновесия. Эта сила является критической. Если сжимающая сила больше критической (при значениях $(0,5-0,6) < d$), то пуансон изгибается и получает необратимую деформацию в наиболее опасном сечении. На практике при ориентации пуансона на поверхности изделия имеет место его перекося, к тому же сжимающая сила действует, как правило, не строго по оси. Вследствие этого пуансон может иметь

некоторое начальное продольное искривление оси. Таким образом, в действительности пуансон находится в сложном напряженном состоянии, подвергаясь одновременно сжатию и изгибу.

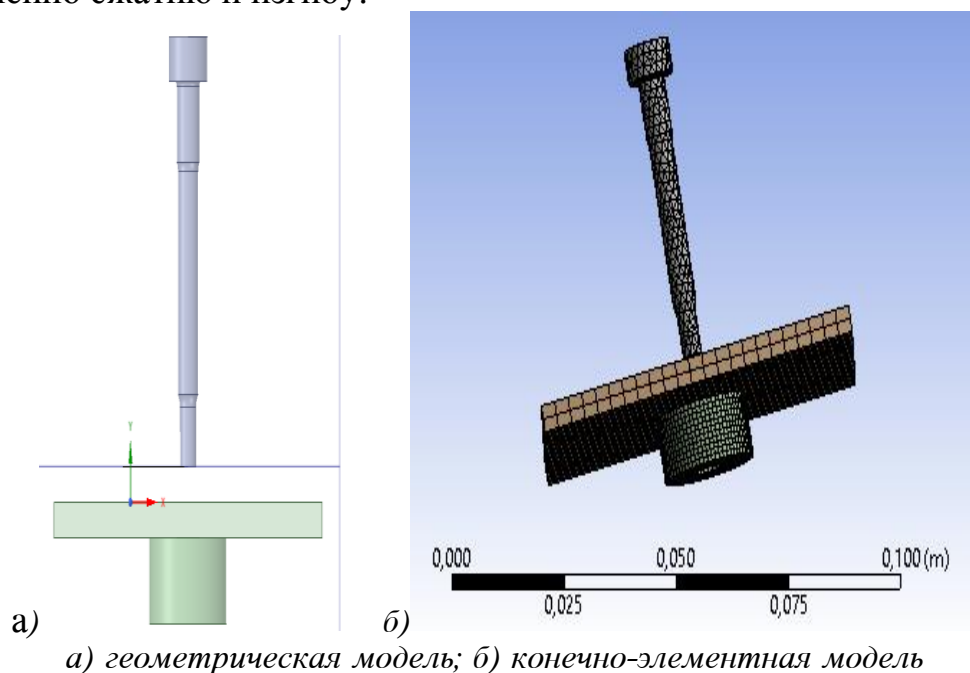


Рисунок 3 – Расчётная модель штампа

В разделе «*Model*» на основе геометрической модели штампа создаём её конечно-элементную модель, которую закрепляем по нижней цилиндрической части матрицы (рисунок 3б).

В разделе «*Engineering Data*» задаём свойства материала пуансона и листа. Скорость движения пуансона задается исходя из размеров пробиваемого отверстия и пуансона, а также времени движения.

В разделах «*Setup*» и «*Solution*» комплекса *ANSYS Workbench* запускаем компьютерную модель штампа с заданными параметрами и характеристиками, производим расчёт.

В разделе «*Result*» получаем итог моделирования пробивки отверстий в листовом металле пуансонами цилиндрической формы. С помощью данной модели можно анализировать возникновение и изменение с течением времени в процессе проникновения пуансона в металл компонент перемещений, напряжений и деформаций (рисунки 4–7).

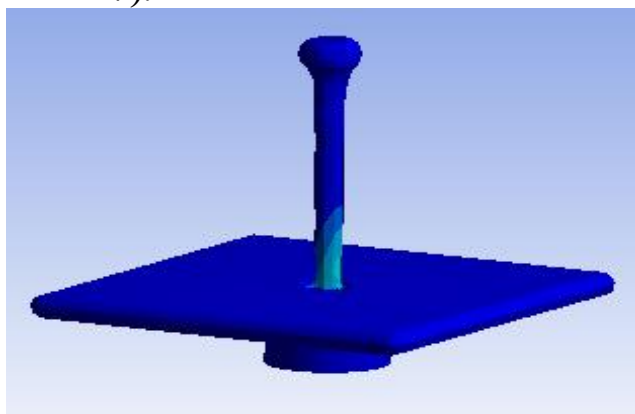


Рисунок 4 – Промежуточное состояние процесса пробивки отверстия

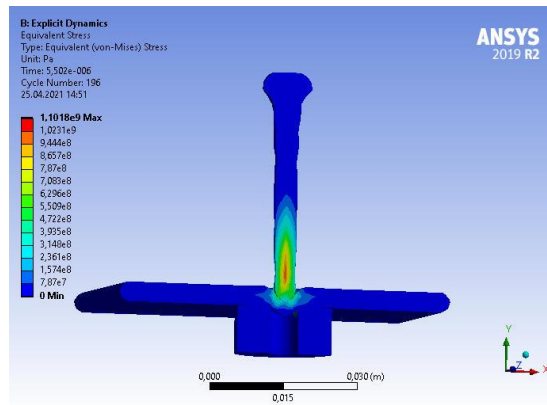
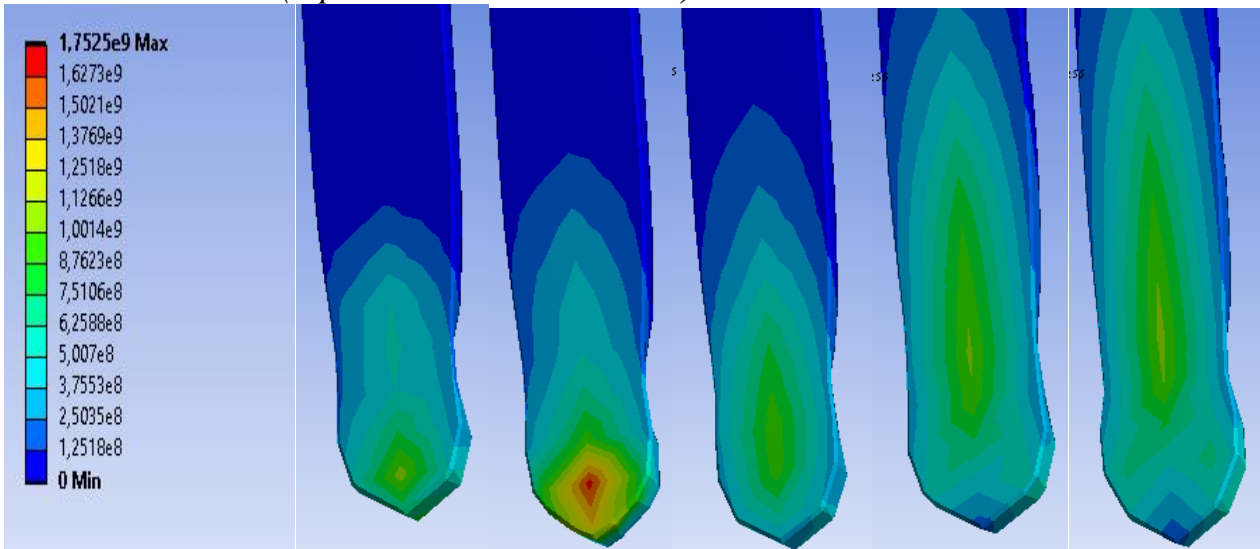


Рисунок 5 – Типичное распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (Equivalent von Mises Stress) в сечении системы



$t = 3,16e-04$ c $t = 3,69e-04$ c $t = 4,22e-04$ c $t = 5,27e-04$ c $t = 6,32e-04$ c
Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в сечении пуансона в различные моменты времени при $v = 15$ м/с

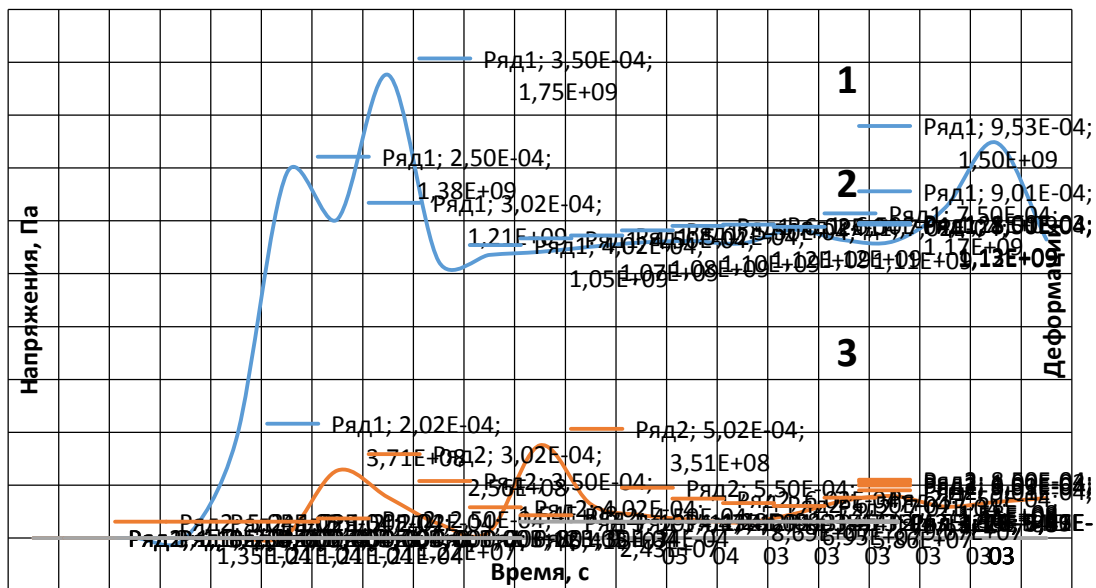


Рисунок 7 – Зависимость суммарных деформаций (Total Deformation) (1), эквивалентных напряжений по Мизесу (2) и нормальных напряжений (Normal Stress) (3) в пуансоне от времени при $v=15$ м/с

Выполнен расчёт предельно допускаемой нагрузки в зависимости от длины рабочей части пуансона. Установлена предельная длина рабочей части, при которой возможно осуществлять процесс пробивки. Исследовано влияние скорости движения пуансона на возникающие в нём напряжения. Моделирование пробивного пуансона с изменённой формой рабочей части не выявило существенных скачков напряжений по длине инструмента в процессе пробивки, что свидетельствует о том, что изменения в конфигурации пуансона не окажут негативного воздействия на его прочность [4].

Проведённые исследования позволяют оптимизировать форму и размеры рабочей зоны пуансона, зазор между матрицей и пуансоном в зависимости от их материалов и толщины листа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Металлообработка в современном машиностроении [Электронный ресурс] : Пробивка отверстий. – Режим доступа : <http://metall-work.ru/obr-met/38.html>. – Дата доступа : 29.05.2021.
2. Мухутдинов, А. Р. Основы применения ANSYS Autodyn для решения задач моделирования быстропротекающих процессов: учебное пособие / А. Р. Мухутдинов. – Казань: КНИТУ, 2016. – 244 с. – ISBN 978-5-7882-2115-1.
3. Бурдуковский, В. Г. Технология листовой штамповки : учебное пособие / В. Г. Бурдуковский. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 224 с.
4. Веремейчик, А. И. Напряженно-деформированное состояние цилиндрического пуансона при пробивке отверстия / А. И. Веремейчик // Перспективные материалы и технологии : материалы международного симпозиума, Минск, 23–27 августа 2021 г. / под ред. чл.-корр. НАН Беларуси В. В. Рубаника. – Минск : Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации. – 2021. – С. 379–381.

УДК 539.3

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДКРЕПЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВНЕШНЕМУ ДАВЛЕНИЮ

Игнатюк В. И.

Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Тонкостенные цилиндрические элементы, являющиеся по своей работе оболочками, находят широкое применение в элементах машиностроительных конструкций. Учитывая высокую прочность оболочечных конструкций, несущую способность таких элементов при действии внешнего давления определяет чаще всего их способность сохранять исходную форму, то есть их устойчивость. Повышение устойчивости таких элементов возможно путем их подкрепления ребрами жесткости. При этом следует стремиться к наиболее рациональному варианту подкрепления, отвечающему наименьшему расходу материала элемента.

Подкрепленный цилиндрический элемент рассматривается как ребристая круговая тонкостенная цилиндрическая оболочка, которая представляет собой

систему, состоящую из тонкой обшивки и жестко с ней соединенных по линиям контакта продольных (стрингеры) и поперечных (шпангоуты) ребер (рисунок 1).

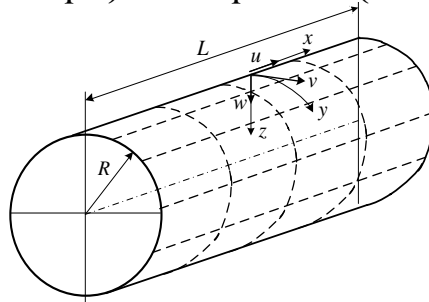


Рисунок 1 – Расчетная схема подкрепленного цилиндрического оболочечного элемента

Элемент может быть нагружен осевым сжатием и внешним давлением.

Для расчета обшивки используется линейная теория тонких упругих оболочек, а для расчета ребер – теория криволинейных стержней. При этом гипотеза прямолинейного недеформируемого элемента принимается справедливой как для обшивки, так и в целом для системы «обшивка-ребро» (в местах наличия ребер). Учитываются дискретность расположения ребер и их несимметричность относительно обшивки.

Решение задачи устойчивости выполняется энергетическим методом [1], который связан с выбором аппроксимирующих выражений для функций перемещений, описывающих деформированное состояние подкрепленного оболочечного элемента при потере устойчивости и удовлетворяющих граничным условиям его опирания. Будем считать, что обеспечены условия шарнирного опирания и что до потери устойчивости оболочка сохраняет свою первоначальную (цилиндрическую) форму. Выражение полной потенциальной энергии системы через перемещения срединной поверхности оболочки получено [2] в виде:

$$\begin{aligned}
 U = & \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi R} \left\{ C_{11} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2C_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} \right) + C_{22} \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} \right)^2 + C_{66} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + D_{11} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \right. \\
 & + 2D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 4D_{66} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \sigma_x h \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \sigma_y h \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{w}{R} \right) w \left. \right\} dx dy + \\
 & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \int_0^L \left\{ E_c F_c \left[\frac{\partial u}{\partial x} + h_c \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right]^2 + E_c J_{yc} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + G_c J_{kr c} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \right. \\
 & - \sigma_x F_c \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \left. \right\} \Big|_{y=y_i} dx + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k_1} \int_0^{2\pi R} \left\{ E_u F_u \left[\frac{\partial v}{\partial y} + h_u \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{w}{R} \right]^2 + \right. \\
 & + E_u J_{xu} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{w}{R^2} \right)^2 + G_u J_{kr u} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{h_u}{R} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \right]^2 + \sigma_y F_u \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{w}{R^2} \right) w \left. \right\} \Big|_{x=x_j} dy.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь обозначено: u, v, w – перемещения точек срединной поверхности в направлениях осей x, y, z ; C_{jk}, D_{jk} – жёсткости обшивки, определяемые выражениями: $C_{jk} = 2B_{jk} h$; $D_{jk} = 2B_{jk} h^3$,

$$\text{где: } B_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}; \quad B_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}; \quad B_{12} = B_{21} = -\frac{\nu_{12}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}};$$

E_1, E_2 – модули Юнга для материала обшивки соответственно по направлениям x и y ; ν_{12}, ν_{21} – коэффициенты Пуассона материала обшивки; E_c, G_c и E_u, G_u – модули упругости и сдвига материалов стрингеров и шпангоутов; A_c, J_{yc}, J_{krc} и A_u, J_{xu}, J_{kpu} – площади поперечных сечений, моменты инерции и кручения сечений соответственно стрингеров и шпангоутов; h – толщина обшивки; h_c, h_u – эксцентриситеты стрингеров и шпангоутов.

Расположив начало координат в торце элемента на оси одного из стрингеров, примем выражения для аппроксимирующих функций перемещений, описывающих деформированное состояние ребристого цилиндрического оболочечного элемента при потере устойчивости и удовлетворяющих граничным условиям, в виде:

$$\begin{aligned} u &= \cos \frac{\pi mx}{L} \left[a_1 \cos \frac{ny}{R} + a_2 \sin \frac{ny}{R} \right]; \\ v &= \sin \frac{\pi mx}{L} \left[b_1 \sin \frac{ny}{R} + b_2 \cos \frac{ny}{R} \right]; \\ w &= \sin \frac{\pi mx}{L} \left[c_1 \cos \frac{ny}{R} + c_2 \sin \frac{ny}{R} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где: m – число полуволн вдоль образующей обшивки (вдоль оси x); n – число полуволн вдоль окружности обшивки; a_{mn}, b_{mn}, c_{mn} – неизвестные параметры перемещений.

Критическую нагрузку определяем методом Ритца, используя свойства экстремальности полной потенциальной энергии упругих систем в состоянии равновесия. Необходимое условие экстремальности полной потенциальной энергии в виде равенства нулю частных производных по всем параметрам перемещений a_{mn}, b_{mn}, c_{mn} приводит к системе однородных линейных алгебраических уравнений. Потере устойчивости элемента соответствует нетривиальное решение этой системы уравнений, что возможно лишь в случае, когда ее определитель равен нулю. Это условие приводит к уравнению, минимальный корень которого и является расчетным параметром критической нагрузки.

Оценка эффективности подкрепления. Для оценки оптимальности подкрепления введем коэффициент относительной эффективности подкрепления при статическом нагружении $\mu_{ст}$, равный отношению статической критической нагрузки подкрепленного оболочечного элемента к статической критической нагрузке гладкого оболочечного элемента, равного по весу рассматриваемому ребристому. При этом, естественно, предполагается, что радиус R и длина L сравниваемых оболочечных элементов одинаковы. Гладкий оболочечный элемент равного веса получается из ребристого путем замены ребер эквивалентными им по весу слоями с плотностью материала, равной усредненной плотности материалов слоев обшивки.

Величина коэффициента относительной эффективности подкрепления при статическом нагружении в соответствии с приведенным определением будет

$$\mu_{ст} = q_{кр} / q_{окр}, \quad (3)$$

где $q_{кр}$ – статическое критическое давление для ребристого оболочечного элемента, $q_{окр}$ – соответствующее значение критического давления для гладкого оболочечного элемента равного веса.

Тогда для ребристого оболочечного элемента будем иметь

$$q_{кр} = Eh^2 \bar{q} / R^2 \quad (4)$$

Толщину гладкого оболочечного элемента, равного по весу рассматриваемому ребристому, найдем, приравняв вес ребристого оболочечного элемента

$$Q = \pi RLh\rho_o \left(1 + \frac{A_c k \rho_c}{\pi Rh \rho_o} + \frac{A_u k_1 \rho_u}{Lh \rho_o} \right) \quad (5)$$

весу гладкого оболочечного элемента, плотность которого принята равной плотности обшивки ребристого оболочечного элемента ρ_o

$$Q = \pi RLh_o \rho_o, \quad (6)$$

получим:

$$h_o = h(1 + \gamma_c + \gamma_u). \quad (7)$$

Статическое критическое давление для такого оболочечного элемента будет:

$$q_{окр} = \frac{Eh^2 \bar{q}_o}{R^2} (1 + \gamma_c + \gamma_u)^2 \quad (8)$$

$$\text{где: } \gamma_c = \frac{A_c k \rho_c}{\pi Rh \rho_o}; \quad \gamma_u = \frac{A_u k_1 \rho_u}{Lh \rho_o};$$

$$\bar{q} = \frac{R^2}{Eh^2} q_{кр}; \quad (9)$$

$q_{кр}$, \bar{q} , $q_{окр}$, \bar{q}_o – статические критические давления и их безразмерные параметры соответственно для ребристого и гладкого оболочечных элементов равного веса; γ_c – отношение веса стрингеров к весу обшивки; γ_u – отношение веса шпангоутов к весу обшивки.

Подставляя (4) и (8) в (3), получим выражение для коэффициента относительной эффективности при статическом нагружении ребристого оболочечного элемента в виде:

$$\mu_{ст} = \frac{\bar{q}}{\bar{q}_o} \frac{1}{(1 + \gamma_c + \gamma_u)^2}. \quad (10)$$

Осевое сжатие. Для случая осевого сжатия: $q_{кр}$ – сжимающее осевое статическое критическое давление, приведенное к распределенному по площади торцов ($A_m = \pi R^2/2$), для ребристого оболочечного элемента, а $q_{окр}$ – соответствующее значение осевого критического давления для гладкого оболочечного элемента равного веса.

При заданной величине расчетного осевого статического давления q_{cm} вес ребристого цилиндрического оболочечного элемента определенным образом связан с коэффициентом относительной эффективности. Выразим из зависимостей (3) и (8) толщину ребристого цилиндрического оболочечного элемента через q_{cm} и μ_{cm} :

$$h = \frac{R}{(1 + \gamma_c + \gamma_{uu})} \sqrt{\frac{q_{cm}}{\mu_{cm} \bar{q}_o E}} \quad (11)$$

Подставляя это выражение в формулу для веса ребристого цилиндрического оболочечного элемента (5), получим

$$Q = \pi R^2 L \rho_o^* \sqrt{\frac{q_{cm}}{\bar{q}_o E \mu_{cm}}}, \quad (12)$$

то есть вес ребристого цилиндрического оболочечного элемента при статическом нагружении осевым сжатием обратно пропорционален $\sqrt{\mu_{cm}}$.

Таким образом, при статическом нагружении осевым сжатием минимуму веса ребристого цилиндрического оболочечного элемента соответствует максимум μ_{cm} .

Равномерное внешнее давление. Для удобства получения зависимости толщины ребристого цилиндрического оболочечного элемента h от заданного внешнего статического давления q_{cm} и коэффициента относительной эффективности подкрепления при статическом нагружении μ_{cm} введем безразмерный параметр критического давления, не зависящий от толщины обшивки:

$$\bar{q}_o = q_o \left(\frac{R}{h_o} \right)^{0.5}, \quad (13)$$

где \bar{q}_o – безразмерный параметр статического критического внешнего давления для гладкого оболочечного элемента, введенный в соответствии с соотношением (9) и зависящий от h_o/R .

Теперь из (3) с учетом (8) будем иметь:

$$h = \frac{R}{1 + \gamma_c + \gamma_{uu}} \left(\frac{q_{cm}}{E \bar{q}_o \mu_{cm}} \right)^{0.4} \quad (14)$$

Подставляя это выражение в формулу для веса ребристого цилиндрического оболочечного элемента (5), получим:

$$Q = \pi R^2 L \rho_o^* \left(\frac{q_{cm}}{E \bar{q}_o \mu_{cm}} \right)^{0.4} \quad (15)$$

Таким образом, вес ребристого цилиндрического оболочечного элемента при статическом нагружении внешним давлением обратно пропорционален $(\mu_{cm})^{0.4}$ и минимуму веса рассматриваемых оболочечных элементов, как и в случае статического осевого сжатия, соответствует максимум μ_{cm} . При

постоянном же весе оболочечного элемента величина $\mu_{ст}$ здесь также прямо пропорциональна статическому критическому давлению.

Заключение. Таким образом, при статическом нагружении осевым сжатием, внешним давлением ребристых цилиндрических оболочечных элементов при постоянном весе величина $\mu_{ст}$ прямо пропорциональна статическим критическим нагрузкам, а при постоянной заданной величине нагрузки – обратно пропорциональна их весу, и значит минимуму веса ребристых оболочечных элементов и соответственно их оптимальному подкреплению отвечает максимум коэффициента относительной эффективности подкрепления $\mu_{ст}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амиро, И. Я. Теория ребристых оболочек / И. Я. Амиро, В. А. Заруцкий // Методы расчета оболочек: в 5 т.. – К. : Наук. думка, 1980. – 368 с.
2. Заруцкий, В. А. Устойчивость при действии импульсных нагрузок ортотропных цилиндрических оболочек, предварительно нагруженных статическими нагрузками // В. А. Заруцкий, В. И. Игнатюк // Сопротивление материалов и теория сооружений : респ. межвед. науч.-техн. сб. – К., 1989. – Вып. 54. – С. 124–128.

УДК 620.178.7

МЕХАНИЗМЫ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ЛОПАТОК РОТОРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МАШИН

Крупич Б.¹, Барсуков В.Г.², Хвисевич В.М.³, Илькевич М.А.², Онысько С.Р.³

1) Белостокский политехнический университет;

г. Белосток, Республика Польша;

2) Гродненский государственный университет имени янки Купалы;

г. Гродно, Республика Беларусь

3) Брестский государственный технический университет;

г. Брест, Республика Беларусь

Устройства центробежного типа, называемые также центробежными ускорителями, или турбомашинами, широко распространены в различных областях техники и технологии. Они являются рабочими органами вентиляторов систем пневмотранспорта, центробежных сепараторов и классификаторов, центробежно-ударных измельчителей, оборудования для подачи мелкодисперсного топлива в виде измельченного каменного угля и др. Одной из важнейших проблем при эксплуатации таких машин является газообразное изнашивание деталей ротора, называемое также в ряде стран эрозией. Опыт эксплуатации показывает, что нарастающее во времени разрушение поверхности рабочих (разгонных) лопастей сопровождается изменением основных характеристик оборудования, в том числе заметным уменьшением коэффициента полезного действия, а также увеличением динамических нагрузок на валы и подшипники вследствие развивающегося дисбаланса ротора [1-3]. При этом, несмотря на достигнутый прогресс в конструировании, производстве и использовании таких устройств,

теоретические и конструкторско-технологические вопросы обеспечения их износостойкости изучены недостаточно, что обусловлено сложностью протекающих в рабочей зоне контактных динамических явлений [1,3,4].

Цель работы – с позиций механики микроконтактного взаимодействия частиц с лопастью проанализировать параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) и связанные с ними доминирующие механизмы разрушения поверхностных слоев материала лопасти.

При анализе НДС материала лопасти в зонах ударного и фрикционного скользящего контакта исходили из того, что имеющиеся аналитические решения, основанные на теории Герца, справедливы только для низких скоростей динамического взаимодействия. При средних и высоких скоростях удара необходимо учитывать возможность развития упругопластического процесса контактного нагружения.

Для упрощенных оценочных расчетов примем для частиц абразива форму сферы. Используя энергетическую теорию удара, найдем усилие F , возникающее при столкновении частицы массой m , движущейся со скоростью V , с поверхностью детали, моделируемой упругопластическим полупространством. Кинетическая энергия E_k частицы

$$E_k = \frac{mV^2}{2} \quad (1)$$

преобразуется в работу деформирования A :

$$A = \int_0^{\delta_{\max}} F(\delta) d\delta = \int_0^{F_{\max}} F(\delta) \frac{d\delta}{dF} dF, \quad (2)$$

где: F, F_{\max} – соответственно текущее и максимальное значение усилия, возникающего в зоне контакта;

δ – сближение центров контактирующих тел.

Известно, что между сближением центров контактирующих тел δ и усилием прижатия F существует взаимосвязь вида [5]:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{9F^2}{16RE^2}}, \quad (3)$$

где: R – приведенный радиус кривизны контактирующих тел, численно равный для контакта сферы с плоскостью радиусу сферы;

E – эффективный модуль упругости.

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}, \quad (4)$$

где: ν_1, ν_2, E_1, E_2 – соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости контактирующих тел.

Найдя из (3) $\frac{d\delta}{dF}$ и подставив его значение в (2), после интегрирования с учетом (1) получаем

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{2}{5} \sqrt[3]{\frac{9F_{\max}^5}{16RE^2}},$$

откуда значение максимального усилия в зоне контакта, возникающего в результате ударного взаимодействия частицы с деталью

$$F_{\max} = \sqrt[5]{\left(\frac{5mV^2}{4}\right)^3 \frac{16RE^2}{9}} \quad (5)$$

Масса частицы m может быть вычислена как произведение плотности материала частицы γ на объем сферы радиуса R

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 \gamma$$

Максимальное значение контактных напряжений p_0 можно определить по формуле Герца [5]

$$p_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{6F_{\max} E^2}{R^2}} \quad (6)$$

Эквивалентные напряжения в наиболее опасной точке приповерхностного слоя составляют приблизительно 0,62 от величины наибольших контактных давлений [5].

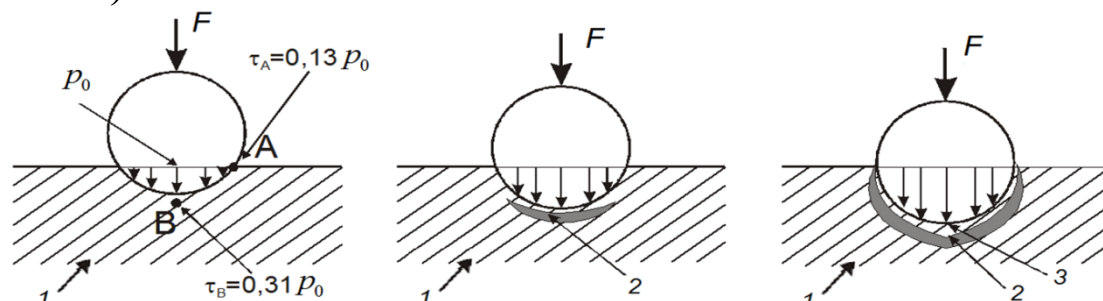
Подставив значения F_{\max} и m в (6), найдем максимальные контактные напряжения, возникающие при ударе:

$$p_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{6F_{\max} E^2}{R^2}} = 0,837 \sqrt[5]{E^4 \gamma V^2} \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), в области упругого деформирования контактные напряжения не зависят от радиуса, но зависят от модулей упругости контактирующих тел и скорости соударения, а также плотности γ материала частицы. Из формулы (7) можно получить выражение для определения скорости V частицы, обеспечивающей создание давления p_0 :

$$V = \sqrt{\frac{p_0^5}{(0,837)^5 E^4 \gamma}} = 1,56 \sqrt{\frac{p_0^5}{E^4 \gamma}} \quad (8)$$

Выполненные ранее исследования показали [4], что при статическом и динамическом взаимодействии твердых частиц с поверхностью детали возможны три следующих вида деформирования (рисунок 1): идеально упругое (рисунок 1а); стесненное упругопластическое (рисунок 1б); свободное упругопластическое (рисунок 1в).



а) б) в)

1 – упругая зона; 2 – пластическая зона; 3 – ядро (зона затрудненной деформации).
Рисунок 1 – Стадии деформирования материала при контактном взаимодействии со сферической частицей

После выхода зоны текучести на поверхность дальнейшее повышение скорости взаимодействия частицы с деталью будет сопровождаться ростом размеров лунки подобно опытам Бринелля.

Теоретически вопрос упругопластического деформирования при ударном нагружении и фрикционном скользящем контакте исследован недостаточно и основным способом изучения повреждения поверхности является эксперимент.

Для зоны фрикционного скользящего контакта в формулу (6) в качестве прижимающей силы необходимо подставить силу Кориолиса F_C , зависящую от угловой скорости вращения ротора, массы частицы и скорости скольжения относительно лопасти ротора.

Рассмотрим динамику движения частицы под действием разгоняющей центробежной силы инерции F_u и тормозящей силы трения F_{mp} . Центробежная сила инерции F_u направлена вдоль радиуса от центра вращения и вызывает ускоренное движение частицы. Ее величина равна произведению массы частицы m на центростремительное ускорение

$$F_{mp} = m\omega^2 r, \quad (9)$$

где: ω – угловая скорость вращения ротора;
 r – расстояние от центра ротора до частицы.

Для расчета контактных напряжений необходимо знать силу Кориолиса F_C , которая равна произведению массы частицы m на Кориолисово ускорение (удвоенное произведение угловой скорости ω вращения ротора на скорость V_r скольжения частицы относительно лопасти)

$$F_C = m \cdot 2\omega r V_r = 2m\omega r \dot{r} \quad (10)$$

Сила трения F_{mp} от прижатия частицы к лопасти силой Кориолиса может быть вычислена с использованием закона трения Амонтона - Кулона

$$F_{mp} = fF_C = 2mf\omega r \dot{r} \quad (11)$$

где: f – коэффициент трения частицы о лопасть ротора.

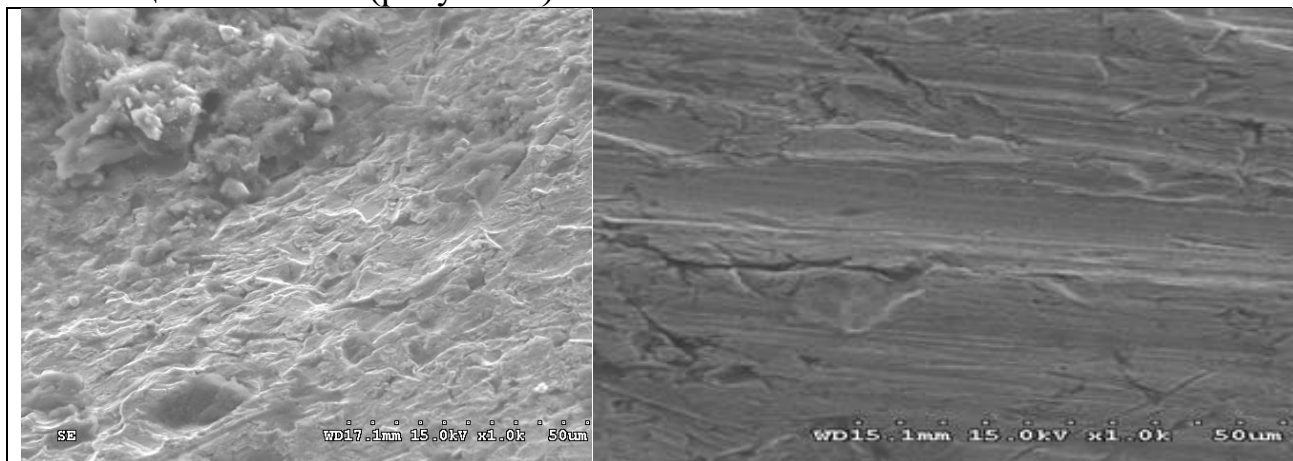
В результате выполненных теоретических исследований получены аналитические зависимости, позволяющие определять скорость движения частицы в любой точке лопасти ротора и действующую силу Кориолиса, а также осуществлять численное моделирование влияния физико - механических свойств контактирующих тел (модули упругости, коэффициенты Пуассона), коэффициента трения и угловой скорости вращения ротора на величину контактных напряжений, возникающих в серединной и концевой частях лопасти ротора при скольжении относительно ее частиц сферической формы.

В качестве модельного абразивного материала при оценочных расчетах принят кварц со следующими показателями механических свойств: модуль упругости $E_q = 50,3$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_q = 0,23$, плотность $\gamma_q = 2650$ кг/м³. Выбор кварца обусловлен тем, что он широко применяется в виде измельчаемого сырья на предприятиях стекольной промышленности. Кроме того, в виде абразивных примесей он может присутствовать в дисперсных материалах, перемещаемых с использованием систем технологического пневмотранспорта. Для стальной лопасти модуль упругости принят $E_s = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_s = 0,3$. Эффективный модуль упругости для такого сочетания материалов, рассчитанный по формуле (4), составляет $E_s = 42773$ МПа.

Результаты выполненных расчетов показали, что при ударном взаимодействии, а также при фрикционном скользящем контакте для удаленных от оси вращения точек лопасти такие эквивалентные напряжения, рассчитываемые по энергетической теории прочности, во многих случаях составляют сотни мегапаскалей. Например, для напорных вентиляторов систем пневмотранспорта при вращении ротора диаметром $D = 2000$ мм с угловой скоростью $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$ максимальные значения контактных напряжений, обусловленные действием силы Кориолиса на частицу примеси кварца диаметром $d = 1$ мм, составляют в середине радиальной лопасти $p_0 = 500,1$ МПа, а на конце – $p_0 = 629,9$ МПа. При этом эквивалентные напряжения в подповерхностном слое в точке B (рисунок 1а), рассчитанные по энергетической теории прочности, составляют $\sigma_{эВ} = 310$ МПа, а на конце лопасти – $\sigma_э = 390,6$ МПа.

Применительно к центробежно-ударным измельчителям при вращении роторов диаметром $D = 1000$ мм с угловой скоростью $\omega = 450 \text{ с}^{-1}$ при скольжении такой же частицы кварца диаметром $d = 1$ мм вдоль разгонной лопасти расчетные значения контактных и эквивалентных напряжений составляют: – в середине лопасти $p_0 = 825,2$ МПа, $\sigma_{эВ} = 511,6$ МПа; на конце лопасти $p_0 = 1039,5$ МПа, $\sigma_э = 644,5$ МПа. С увеличением диаметра частиц контактные и эквивалентные напряжения возрастают.

Как видно из этих данных, эквивалентные напряжения в зоне контакта превышают пределы текучести конструкционных сталей и неизбежно вызывают эрозионное разрушение поверхностных слоев лопасти. Причем доминирующими являются два механизма разрушения: многократное пластическое деформирование с наклепом и растрескиванием поверхности в зоне ударного нагружения и пластическое пропахивание поверхностных слоев в зоне фрикционного скользящего контакта (рисунок 3).



а) зона ударного изнашивания б) зона фрикционного изнашивания

Рисунок 3 – Микрофотографии поверхностей лопасти в характерных зонах

Разработана комплексная методика расчетной оценки контактных напряжений, возникающих при ударном и фрикционном скользящем контакте грубодисперсных частиц с рабочими лопастями роторов центробежных машин. Показано, что при ударном взаимодействии, а также при фрикционном скользящем контакте для удаленных от оси вращения точек лопасти эквивалентные напря-

жения, рассчитываемые по энергетической теории прочности, во многих случаях превышают пределы текучести конструкционных сталей и неизбежно вызывают эрозионное разрушение поверхностных слоев лопасти. Доминирующими являются два механизма разрушения: многократное пластическое деформирование с наклепом и растрескиванием поверхности в зоне ударного нагружения и пластическое пропахивание поверхностных слоев в зоне фрикционного скользящего контакта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chmielniak, T. Erozja pyłowa w maszynach przepływowych. Przegląd Zagadnień. / T. Chmielniak // Zagadnienia eksploatacji maszyn. – 1988. (76), № 4, С 339–458.
2. Войтехович, П. Е. Определение основных параметров ударного взаимодействия абразивных частиц с лопастями ротора-ускорителя центробежной мельницы / П. Е. Войтехович, Д. Н. Боровский, А. В. Тоболич, П. С. Гребенчук. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018, № 3, С. 12–15.
3. Крупич, Б. Проблемы обеспечения износостойкости деталей систем пневмотранспорта // Трение и износ. – 2002 (23), № 5, С. 477–482.
4. Крупич, Б. Моделирование микроконтактных взаимодействий при газоабразивном изнашивании сталей с учетом деформационного упрочнения / Б. Крупич, В. Г. Барсуков, А. И. Свириденко // Трение и износ, 2019, Том 40, № 6, С. 644–653.
5. Свириденко, А. И. Механика дискретного фрикционного контакта. / А. И. Свириденко, С. А. Чижик, М. И. Петроковец – Минск : Наука и техника, 1990. – 272 с.

УДК 621.7

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ

Мищурок О. М., Нерода М. В., Веремейчик А. И.

Брестский государственный технический университет;

г. Брест, Республика Беларусь

С 70-х годов XIX века сталь является основным конструкционным материалом. Сталь обладает высокими прочностью, вязкостью разрушения, температурой плавления и низкой теплопроводностью. Но самым важным достоинством стали как конструкционного материала является возможность улучшения ее эксплуатационно-технических свойств за счет применения термической обработки.

В настоящее время широкое распространение в промышленном и ремонтном производствах получили упрочняющие технологии, позволяющие повышать эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин и экономить материальные и трудовые ресурсы. Как правило, данные технологии ориентированы на придание повышенных физико-механических характеристик поверхностному слою при сохранении неизменными свойств основного металла детали [1].

Изменить эксплуатационные свойства поверхности в необходимом направлении можно различными способами и эти способы можно разделить на два вида:

- нанесение на поверхность нового материала с необходимыми свойствами;
- изменение состава поверхностного слоя металла, обеспечивающего изменение свойств [2].

На предприятиях РБ и стран СНГ в последние годы для изменения эксплуатационных свойств используются традиционные виды термической обработки металлов [3], которые являются энергоемкими и продолжительными процессами, осуществляемыми на дорогостоящем оборудовании. Традиционным методам термической обработки характерны: существенное коробление упрочняемых изделий; увеличение твердости поверхности с одновременным уменьшением вязкости материала и понижением сопротивляемости ударным нагрузкам; ограниченные возможности управления структурой материалов [4].

Возрастающая конкуренция и повышение требований к выпускаемой продукции вынуждают современные предприятия искать новые технологии и материалы для решения проблемы повышения срока службы изделий.

Выбор метода термической обработки зависит от многих факторов, таких как условия эксплуатации изделия, а также возможность применения данных методов, исходя из специфики применяемых материалов, подлежащих упрочнению. В каждом случае для принятия решения об использовании того или иного метода упрочнения необходимо учитывать все факторы.

Высокий уровень эксплуатационных характеристик достигается при использовании таких новых методов обработки, как плазма, ионные пучки, электронные и лазерные лучи для поверхностной обработки металлов и сплавов с целью увеличения срока службы и надежности машин и механизмов, а также придания металлическим изделиям специальных свойств [5, 6].

В настоящее время лазерные технологии поверхностной обработки зарекомендовали себя в качестве замены традиционных методов термической обработки. Применение технологических лазеров на производстве обусловлено преимуществами сфокусированного лазерного излучения: бесконтактность и локальность теплового воздействия, минимальная зона термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, сведение к минимуму коробления, повышение дисперсности структуры и т. д. [3].

Главной особенностью лазерного термического упрочнения является процесс высокоскоростного нагрева поверхности материала и его дальнейшее охлаждение со сверхкритической скоростью при окончании теплового воздействия за счет отвода тепла в окружающий материал [7].

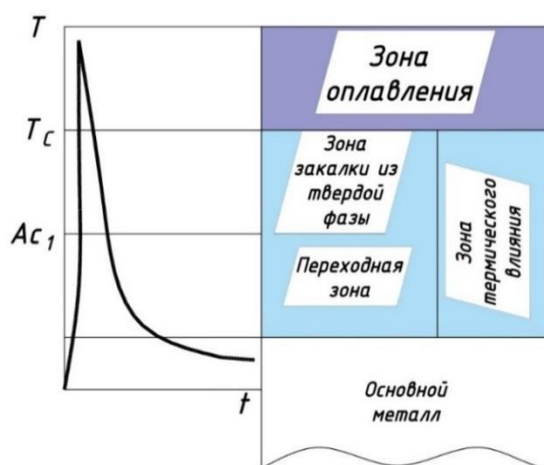


Рисунок 1 – Строение зоны лазерного воздействия

Сверхскоростной нагрев и малое время влияния температуры оказывают влияние на процессы образования и формирования структур. При лазерном термоупрочнении сталей, как и при обычных видах закалки, на этапе нагрева материала происходит формирование структуры аустенита и дальнейшее превращение ее в мартенситную структуру на этапе охлаждения. В процессе лазерной закалки поверхностные слои металла нагреваются до различных температур. Это объясняет слоистое строение зоны лазерного воздействия (ЗЛВ). При лазерном упрочнении на поверхности обрабатываемого металла формируются три зоны (рисунок 1):

- Зона оплавления – формируется при закалке из жидкого состояния. Строение – ячеисто-дендритное, кристаллы – вытянутые по направлению теплоотвода. Основная структура – мартенсит, отличающийся большей дисперсностью, чем при упрочнении объемной закалкой. При лазерном упрочнении без оплавления данная зона отсутствует.

- Зона закалки из твердого раствора – образуется при закалке без оплавления. В данной зоне есть структура как полной, так и неполной закалки – нижняя граница зоны определена нагревом до критической точки A_{c1} . В этом слое наблюдается неоднородность по глубине: ближе к поверхности есть мартенсит и остаточный аустенит, а ближе к основному материалу – мартенсит и фазы исходной микроструктуры: феррит в доэвтектоидной стали и цементит в заэвтектоидной стали.

- Зона отпуска (переходная зона) – при нагреве ниже критических температур. Если материал прошел предварительную объемную термообработку, то в этом слое наблюдается снижение микротвердости [8].

Авторы работы [9] считают, что лазерно-упрочненному слою помимо высокой твердости характерна и высокая вязкость, повышающая способность материала сопротивляться усталостным разрушениям и разрушениям при перегрузках. Разрушению слоистой структуры лазерно-упрочненного поверхностного слоя характерны три максимума нагрузки (рисунок 2). Первый и второй максимумы (P_1 , P_2) нагрузки соответствуют моментам зарождения трещины в поверхностном упрочненном слое и зоне отпуска. Третий максимум (P_3) нагрузки наблюдается при образовании трещины в подслоной зоне металла с исходной структурой. Появление трех максимумов нагрузки свидетельствует о замедлении роста трещины при ее распространении в структурно-неоднородных зонах металла. Это подтверждают и экспериментальные исследования.

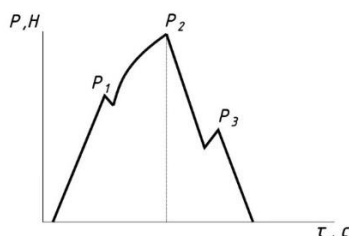


Рисунок 2 – Оциллограмма процесса разрушения при ударном нагружении образцов после лазерного упрочнения

При использовании лазерного излучения для поверхностной обработки с целью упрочнения материалов возможно протекание одного из трех основных процесса нагрева:

- нагрев поверхности материала до температуры выше температуры критических точек, но не выше, чем температура плавления, выдержка при заданной температуре и дальнейшее охлаждение материала;

- нагрев материала до температур выше, чем температура плавления, его дальнейшая кристаллизация и охлаждение расплава;
- нагрев материала свыше температуры его испарения, пластическая деформация за счет ударной волны, нагрев поверхностного слоя плазмой, образующейся при взаимодействии лазерного излучения с материалом [10, 11].

По мнению авторов [8] эти процессы лазерного нагрева и сопровождающие их физико-химические процессы в материале являются основой для исследования методов поверхностного упрочнения. Важнейшим показателем, который определяет тот или иной процесс, является температурное поле в зоне лазерного излучения. По данному показателю возможно осуществить оценку текущей температуры в разных точках зоны термического влияния (ЗТВ) в различные моменты времени, скорости нагрева и охлаждения, а по итогу микроструктуру и фазовый состав поверхностного слоя обрабатываемого материала. Для осуществления оценки теплового состояния материала при лазерном облучении широко применяются методы математического моделирования процесса теплопередачи.

Увеличив точность определения входных параметров (мощности лазерного излучения, подаваемого непосредственно на обрабатываемый материал, площади и формы пятна фокусирования лазерного излучения, зона распределения интенсивности по пятну фокусирования, поглощательной способности обрабатываемой поверхности), можно повысить эффективность применения этих методов при управлении процессом лазерного упрочнения.

У лазерного поверхностного упрочнения есть две различные схемы, это излучение импульсами или сериями импульсов (импульсная закалка) и закалка путем непрерывного излучения.

При импульсной закалке средняя глубина упрочненного слоя на сталях 0,08–0,15 мм, достигается при плотности мощности несколько ниже критической (происходит легкое оплавление). Если же импульсную закалку проводить при плотности мощности $2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ Вт/см² (с оплавлением), то глубина лазерного упрочнения в сталях увеличивается до 1 мм.

Схемы непрерывного излучения имеет значительно более высокую производительность процесса. При данной схеме идет перемещение облучаемой детали относительно луча с постоянной линейной скоростью. При этом на изделии получают поверхностные зоны в виде полос шириной от 0,5 до 10 мм. При этом максимальная глубина упрочненного слоя при излучении без оплавления на сталях достигает 0,5–2,0 мм. При обработке с оплавлением глубина становится больше, но заметно ухудшается качество поверхности, а на некоторых марках сталей происходит снижение твердости [8].

Возможности современной лазерной техники позволяют увеличить срок службы изделий и снизить себестоимость упрочнения, благодаря исключению характерных традиционным методам термообработки существенного коробления упрочняемых деталей, возможности улучшения структуры материала, применению менее дорогостоящих материалов и сокращению времени обработки. Эффективность лазерного упрочнения зависит от тщательности исследований и проработки технологии упрочнения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нерода, М. В. Исследование механических и пластических свойств стали марки 10КП с покрытиями, сформированными методом ионно-плазменного азотирования. / М. В. Нерода [и др.] // Вест. Брест. гос. техн. ун-та. – 2019. – № 4 : Машиностроение. – С. 2–4.
2. Лахтин, Ю. М. Химико – термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
3. Голубев, В. С. Использование лазерных технологий упрочнения в сельскохозяйственном машиностроении / В. С. Голубев [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / Гос. науч. учреждение "Физико-технич. ин-т НАН Беларуси" ; редколлегия: А. В. Белый (главный редактор) [и др.]. – Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – Минск, 2018. – Кн. 2. – С. 58–65.
4. Девойно, О. Г. Эффективность использования лазерной закалки для увеличения прочности зубчатых колес / О. Г. Девойно [и др.] // Лучевые технологии в сварке и обработке материалов : сб. трудов восьмой междунар. конф., Киев, 11–15 сентября 2017 г. / Международная Ассоциация «Сварка». – Киев, 2017. – С. 83–86.
5. Андрияхин, В. М. Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью технологических СО₂-лазеров непрерывного действия / В. М. Андрияхин, В. С. Майоров, В. П. Якунин // Поверхность: Физика, химия, механика. – 1983. – № 6. – С. 140–147.
6. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвиевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки : междунар. сб. науч. тр. / Бел. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.
7. Чудина, О. В. Механизмы упрочнения железа при лазерном легировании и азотировании / О. В. Чудина, Л. Г. Петрова // Металловедение и термическая обработка металлов – 2002. – № 4. – С. 21–26.
8. Братухин, А. В. Повышение износостойкости инструментальных сталей при изготовлении авиационного крепежа с использованием лазерного термического упрочнения : дис. кандидата техн. наук : 05.16.01 / А. В. Братухин – Нижний Новгород, 2020. – 160 л.
9. Тескер, Е. И. Современные методы повышения несущей способности высоконагруженных зубчатых передач трансмиссий и приводов / Е. И. Тескер, С. Е. Тескер // Теория и практика зубчатых передач – 2014 : Междунар. симпозиум. – Ижевск, 2014 г. – С. 316–323.
10. Семенцев, А. М. Повышение эффективности лазерной обработки деталей из железоуглеродистых сплавов, основанное на установленном механизме массопереноса легирующих элементов в зоне лазерного воздействия: дис. кандидата техн. наук / А. М. Семенцев – Брянск: Изд-во БГТУ, 2008. – 235 л.
11. Великих, В. С. Влияние лазерной закалки на механические свойства стали / В. С. Великих, В. К. Гончаренко, А. В. Романенко – М. : Металлургия, 1986. – 215 с.

УДК 621.92

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЗЕРЕН ЭЛЕКТРОШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Нерода М.В., Холодарь Б.Г.

Брестский государственный технический университет; г. Брест, Республика Беларусь

Одним из перспективных процессов механической обработки является шлифование электропроводящим абразивным кругом, при котором в зону резания

вносится дополнительная тепловая энергия, выделяющаяся в стружке при замыкании цепи между материалом детали и основой круга.

Неоднородность частиц абразива по размерам и форме, неравномерность их распределения по объему круга вызывают целесообразность разработки математических моделей, позволяющих оценить роль отдельных характеристик инструмента и режимов резания с точки зрения их влияния на качество и производительность обработки. Ниже представлены результаты такого моделирования для круга, состоящего из параллельных слоев равномерно распределенных в них зерен, выполненных в виде правильных гексаэдров – двух соединенных основаниями пентаэдров, у которых диагональ квадратного основания расположена в плоскости слоя [1].

Каждый слой в своей плоскости представляет собой шесть одинаковых прилегающих друг к другу секторов по 60° каждый, причем их структура является симметричной относительно высоты сектора. Зерна, лежащие на границе секторов, будем называть нулевыми, а зерна, выступающие за основу круга и расположенные между нулевыми, – промежуточными. Их вершины выступают за основу круга меньше, чем вершины нулевых зерен. Между заготовкой и основой круга имеет место зазор, величина которого может варьироваться. Толщина снимаемого поверхностного слоя заготовки принята равной $T = 50$ мк. Сечение зерна в плоскости круга показано на рисунке 1. На любом из зерен длина участка ребра от вершины зерна до поверхности обрабатываемой детали равномерно поделена точками ($0 \leq i \leq 10$) на десять слоев. Угол между высотой зерна и его ребром равен $\gamma = \arctg(0.8) \approx 38.66^\circ$, при этом двугранный угол на режущей кромке составляет $2\psi \approx 104.03^\circ$. Скорость вращения круга обозначена далее через n (об/мин), скорость встречной продольной подачи через V_p (мм/мин).

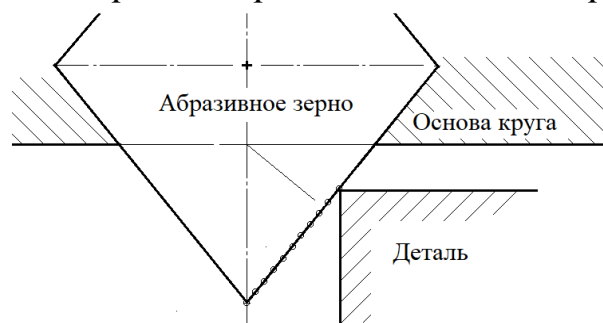


Рисунок 1 – Абразивное зерно и обрабатываемая деталь

В процессе торцевой обработки заготовки шлифовальным кругом имеют место различные варианты взаимодействия абразивных частиц с материалом заготовки, в частности, такими случаями являются внедрение зерна с торца заготовки и внедрение внутрь следа от предыдущих зерен. В первом случае материал заготовки движется параллельными струйками от режущего ребра “назад” к боковым ребрам зерна, а во втором – от боковых ребер “вперед” в сторону режущей кромки, образуя то, что и принято называть стружкой.

К решению первой задачи применена схема проникновения абсолютно-жесткого клина в идеально-пластическое тело. В зависимости от глубины проникновения ребра в деталь последовательность внедрения зерна в торец складывается из нескольких этапов (рисунок 2).

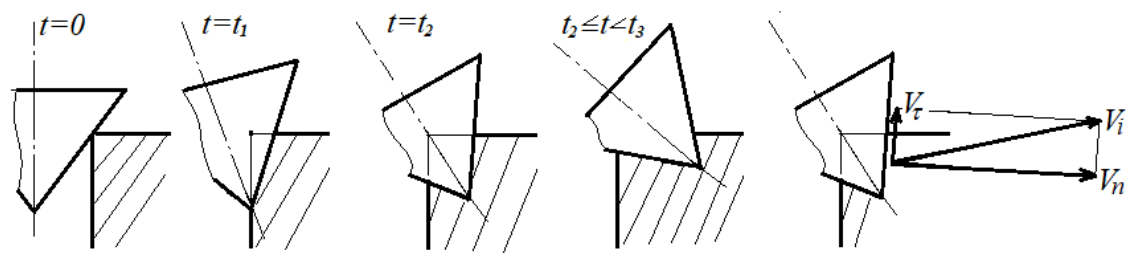


Рисунок 2 – Схема движения зерна при внедрении в материал заготовки

Для промежутка $0 \leq t \leq t_1$ использовано решение, приведенное в [2], для последующих моментов времени построены более сложные схемы взаимодействия зерна и заготовки [1] и найдены соответствующие геометрические параметры этих схем в зависимости от глубины проникновения. Во всех случаях определена геометрия выдавливаемого из заготовки материала, найдено время начала и конца его контакта с основой круга в предположении, что материал течет одинаково в объеме струек, заключенных между соседними выделенными точками на ребре зерна. Между двумя последовательными моментами времени форма новообразованного участка струйки принималась в виде усеченной пирамидки, размеры которой непрерывно изменяются. После контакта струйки с основой круга ее дальнейшее внедрение в круг становится невозможным из-за ее излома или расплавления материала. Отсюда следует, что длина возникшего электропроводящего столбика остается далее неизменной вплоть до момента выхода точек режущего ребра из материала заготовки.

Использованная схемой дает возможность определить электрическое сопротивление токопроводника, мощности и выделяющейся энергии. При этом сопротивление отдельной струйки определялось по правилам последовательного соединения участков токопроводника с учетом переменности их сечения, общее сопротивление выдавливаемого материала – по правилам параллельного соединения. Характер изменения сопротивления R во времени для внедряющегося нулевого зерна показан на рисунке 2.

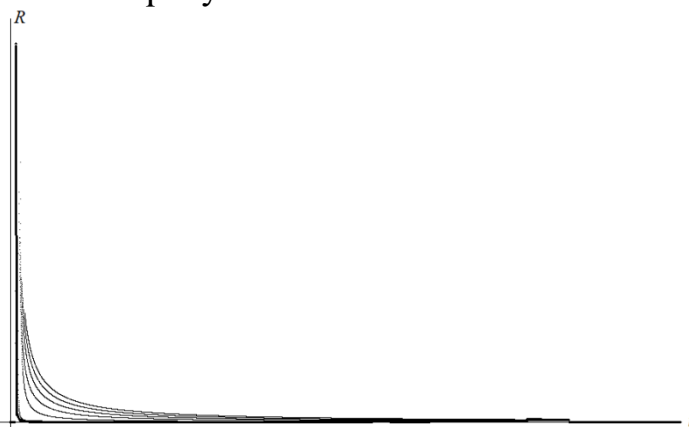


Рисунок 3 – Сопротивление слоев (тонкие линии) и общее сопротивление зоны контакта

Положение всех промежуточных зерен сектора можно упорядочить по моменту входа в соприкосновение с совокупным следом, образовавшимся от действия предыдущих зерен. В данной работе ранжирование проведено более упрощенно – по углу входа вершин зерен внутрь снимаемого при обработке слоя (номера зерен – 1, 2, ..., 122). Конкретное число зерен, участвующих в процессе обработки, зависит от кинематики движения круга.

Для зерен, следующих за исходным нулевым, резание заготовки примыкающей к вершине частью зерна также имеет место, но достигаемое этими зернами углубление царапины незначительно и только на участке вблизи конечной точки следа от предыдущих зерен оно возрастает. Однако возможная длина такого участка до момента выхода зерна из заготовки мала сравнительно с полной длиной зацепления между зерном и деталью. Поэтому процесс выдавливания материала привершинной зоной промежуточных зерен в дальнейшем рассмотрение не включен. Основную роль в съеме материала играет увеличение ширины следа.

Таким образом, для промежуточных зерен использована следующая расчетная схема: снимаемый с боковой поверхности следа материал движется по передней грани зерна до момента встречи с таким же слоем, идущим по смежной грани, после чего два этих потока начинают двигаться совместно в сторону основы круга так, что плоскость их движения остается неизменной. Как и для нулевого зерна полагается, что после встречи с основой стружка либо ломается, либо расплавляется, так что в целом общая длина участка сопротивления стружки остается фиксированной при непрерывно изменяющейся площади ее сечений. Для некоторых точек режущих кромок длина возникшей стружки может оказаться недостаточной для замыкания цепи.

Просчитаны случаи: $V_p=1000$ и 10000 мм/мин, $n=250, 500, 1000, 2000$ об/мин. Пример развития процесса на зернах сектора показан на рисунке 4.

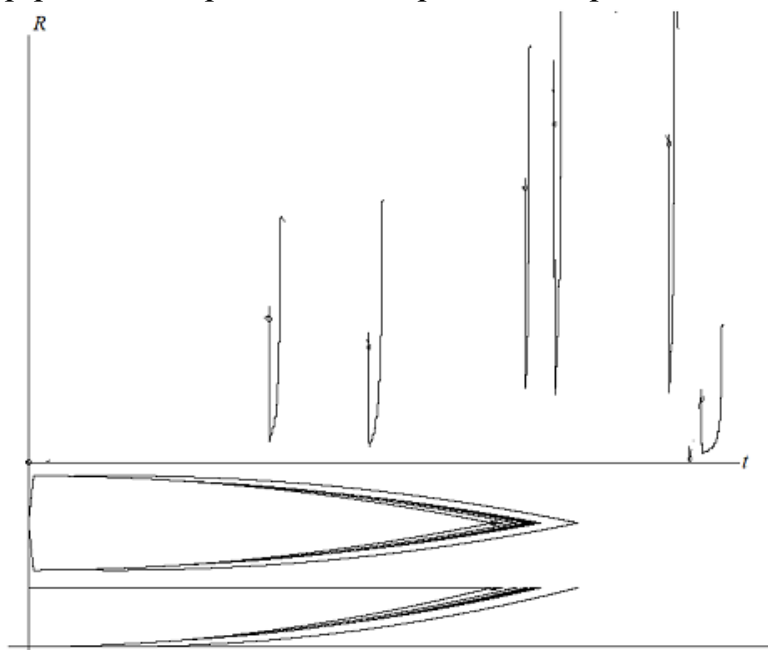


Рисунок 4 – Горизонтальные и вертикальные проекции следов от режущих зерен и сопротивление стружки для режима $n=250$ об/мин, $V_p=1000$ мм/мин

Используя далее формулы для электрической мощности $W(t)=U^2/R(t)$ и сопротивления проводника $R(t)$, можно определить уровень энергии, выделяемой токопроводящим участком стружки за время электроконтакта (U – электрический потенциал между деталью и основой круга). Удельное сопротивление материала принято равным $7.3 \cdot 10^{-5}$ ом·м. Результаты расчетов указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры стружкообразования на различных режимах работы абразивного круга

Режим	Режущие зерна	Время конца зацепления, сек·10 ²	Длина следа, мм	Объем удаленного материала, м ³ ·10 ¹³	Выделение энергии на нулевом и остальных зернах сектора, Дж/вольт ²
n=250 V _p =1000	0, 52, 71, 92, 97, 117, 122	0.107982	3.554770	V ₀ =18.82614	Q ₀ =1.511614
		4.107993	4.221442	V _C =15.550003	ΔQ _{сум} =50.04158·10 ⁻³
n=500 V _p =1000	0, 52, 71, 122	0.053993	3.545872	V ₀ =18.77814	Q ₀ =0.753825
		2.053993	3.712562	V _C =8.142092	ΔQ _{сум} =11.46178·10 ⁻³
n=1000 V _p =1000	0, 122	0.026997	3.541424	V ₀ =18.75414	Q ₀ =0.376445
		1.026997	3.708096	V _C =3.974066	ΔQ _{сум} =3.56761·10 ⁻³
n=2000 V _p =1000	0, 122	0.013498	3.539199	V ₀ =18.74214	Q ₀ =0.188106
		0.513497	3.580595	V _C =1.961258	ΔQ _{сум} =0.92333·10 ⁻³
n=1000 V _p =10000	0, 52, 71, 92, 97, 110, 117, 122	0.026996	3.581820	V ₀ =18.97013	Q ₀ =0.380817
		10.26996	5.248492	V _C =37.813936	ΔQ _{сум} =27.44746·10 ⁻³
n=2000 V _p =10000	0, 52, 71, 92, 97, 117, 122	0.013498	3.559218	V ₀ =18.85014	Q ₀ =0.189194
		5.134976	4.392558	V _C =19.202304	ΔQ _{сум} =7.66504·10 ⁻³

Из таблицы видно, что в зависимости от кинематических параметров режимов обработки (n и V_p) и исходных данных по размерам и положению промежуточных зерен имеет место большая вариация результатов, но для одного и того же зерна при заданном V_p суммарное время электрического контакта между деталью и основой круга тем больше, чем меньше отношение n/V_p . Ожидаемое выделение тепла при внедрении исходного нулевого зерна в заготовку на порядки превосходит тепло, выделяемое при образовании стружки последующими зернами, что связано с большой разницей в толщинах материала, извлекаемого при этом из заготовки. Рост скорости продольной подачи заметно увеличивает выделение тепла стружкой, но незначительно влияет на тепло, выделяемое при внедрении исходного нулевого зерна в заготовку.

Приведенные выше результаты показывают сложный характер развития процессов резания и электропроводимости между обрабатываемой деталью и основой абразивного круга. Так как при этом изменяется и течение сопутствующих тепловых процессов, то для выбора материала и конструктивных параметров круга, а также оптимизации режимов обработки конкретных деталей целесообразно проведение предварительных расчетов на соответствующих моделях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Нерода, М. В. Моделирование процесса абразивного резания упрочняющего покрытия кругом с ориентированными зернами в форме гексаэдра при магнитно-электрическом шлифовании (мэш) / М. В. Нерода, Б. Г. Холодарь // Вестник БрГТУ. – 2020. – № 4: Машиностроение. – С. 13–17.
2. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качалов. – М., Наука, 1969 г. – 420 с.

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Овчинников Е. В.¹, Хвусевич В. М.², Эйсымонт Е. И.¹, Веремейчик А. И.², Лявшук И. А.¹

- 1) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь
- 2) Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

В современных конструкциях машин и механизмов широко применяют композиционные триботехнические материалы, из которых изготавливают детали узлов трения и покрытия для деталей трения. Такие материалы разработаны на основе термопластичных полимерных матриц и содержат в качестве функциональных добавок сухие смазки, смазочные масла, легкоплавкие полимеры, порошки политетрафторэтилена, силикаты и т. п. [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Содержание функциональных модификаторов составляет от 1 % мас. до 40 % мас., что позволяет в широких пределах регулировать служебные характеристики композиционных материалов. Однако введение в состав матрицы значительных количеств наполнителей затрудняют их переработку и способность формировать из композита однородные малодефектные покрытия на металлических изделиях. При малом содержании модификаторов и наполнителей не обеспечивается требуемый технический эффект.

Разработан композиционный материал для триботехнических материалов на основе модифицированного полиамида 6, включающий гранулят или криогенно измельченный порошок ПА 6 и смесь частиц алмазоподобной и графитоподобной модификаций углерода [2]. Данные материалы обладают повышенными физико-механическими характеристиками, однако частицы УДА и УДАГ при агломерировании формируют области с повышенным коэффициентом трения.

Известен композиционный материал для триботехнических покрытий на основе полиамида, содержащий углеродный наполнитель и полимерный модификатор – полиэтилен [1]. При повышении нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации полиолефин плавится и образует на поверхностях трения пленку, выполняющую функцию смазки. Недостатком покрытия из такого материал является сравнительно высокий коэффициент трения при «мягких» режимах эксплуатации.

Применяется композиционный триботехнический материал, содержащий гранулят или порошок полиамида 6, полимерный модификатор и сухую смазку [5]. В данном композиционном материале в качестве полимерного модификатора используют частицы полиамида 11 в смеси с политетрафторэтиленом, а в качестве сухой смазки используют слоистый силикатсодержащий минерал (каолинит, бентонит, монтмориллонит). Покрытия из данного композиционного материала обладают высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения, в т. ч. при эксплуатации узла без подвода внешней смазки. Существенным недостатком аналога является необходимость тщательного сепарирования компонентов для обеспечения гомогенности покрытия.

Известен композиционный материал на основе модифицированного полиамида, содержащий углеродный наполнитель, представляющий собой смесь графита, углеводородного волокна и нанодисперсного углерода [1]. Модифицирование полиамида 6 полиолефином обеспечивает снижение коэффициента трения при повышенных эксплуатационных режимах вследствие плавления полиолефина, а введение в состав композиции сухой смазки повышает стабильность триботехнических характеристик. Недостатком покрытия является сравнительно высокий коэффициент трения при «мягких» режимах эксплуатации, при которых температура в зоне трения не достигает температур плавления модификатора (393 – 413 К).

Предлагаемым составом наноконпозиционного материала, в том числе и для триботехнических покрытий, является состав, содержащий гранулят или порошок полиамида 6, сухую модифицированную углеродную смазку, обработанную во фторсодержащей среде [5]. В данном композиционном материале в качестве полимерного модификатора используют порошок нанодисперсных углеродных частиц, обработанных в растворе фторсодержащего соединения с молекулярной массой от 1500 а. е. м. до 2800 а.е.м.

В качестве компонентов углеродного наполнителя использовали промышленный продукт марки УДА, выпускаемый ЗАО «Синта».. Дисперсность наночастиц продукта УДА составляла $2 \div 12$ нм.

В качестве фторсодержащих олигомеров использовали продукты с общей структурной формулой R_f-R_1 , где R_f – фторсодержащий радикал, R_1 – функциональная группа: OH, COOH, CF₃. Молекулярная масса таких олигомеров, выпускаемых под торговыми марками «Фолеокс», «Эпилам», составляют 2000–2200 ед.

Полученные образцы исследовали по истечении 24 часов, по общепринятым методикам. Триботехнические испытания проводили по схеме «палец-диск» при скорости скольжения 1 м/с и нагрузкой $5 \div 10$ МПа. Покрытие наносили на торцевую часть металлического образца из стали 45. Испытания проводили без смазки и со смазкой маслом И-20А, которую подавали в зону трения с помощью фитиля.

Таблица 1 – Составы композиционных материалов для триботехнических материалов

Компонент	Содержание в материале, мас.%								
	Прото-тип [5]	Заявляемые составы							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1. Полимерная матрица -полиамид 11 (Rilsan) – полиамид 6	99,0 -	- 99,6	- 99,0	- 98,0	- 97,5	- 95,0	- 95,0	94,0 -	97,0 -
2. Углеродный наполнитель -графит - алмазо-подобная модификация углерода УДА	1,0 -	- 0,2	- 0,5	- 1	- 1	- 2	- 3	- 4	- 0,1
3. Фторсодержащий олигомер	-	0,2 (фо- леокс) Ф-1	0,5 (фо- леокс) Ф-1	1 (фо- леокс) Ф-1	1,5 (фо- леокс) Ф-1	3,0 (фо- леокс) Ф-1	2,0 (фо- леокс) Ф-1	2,0 (эпи- лам)	2 (фо- леокс)

Триботехнические и прочностные характеристики композиционных материалов, полученных из представленных по прототипу и заявленным составам, приведены в таблицах 1–2. Как следует из данных таблиц 1–2, заявленные составы

в заявленном соотношении компонентов (составы II-VI) превосходит прототип по прочностным и триботехническим характеристикам. Превышение заявленного содержания (состав VII) не дает дальнейшего дополнительного эффекта, а уменьшение содержания (состав I) приводит к снижению эффекта. Модифицирование функционализированными углеродными наноразмерными частицами полиамидной матрицы на основе полиундеканамида приводит к возрастанию прочностных и триботехнических характеристик, однако данные значения ниже чем для полиамида 6, что обусловлено более низкими физико-механическими характеристиками базовой матрицы полиамида 11 по сравнению с полиамидом 6. Предварительная обработка нанодисперсных частиц алмаза фторсодержащими олигомерами приводит к формированию на поверхности полимер-олигомерной органической оболочки, что способствует более высокому термодинамическому совмещению низкоразмерных частиц алмаза в полимерной матрице.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики функционализированных нанокomпозиционных материалов.

Характеристика	Показатель для материала								
	Аналог [5]	Заявляемый состав							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1. Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	55	70	75	80	85	90	87	45	59
2. Твердость по Бринеллю, МПа	70	76	79	81	83	82	81	55	69
3. Адгезионная прочность, н/м									
– исходная	1,5	1,9	2,1	2,2	2,6	2,7	2,5	1,6	1,8
– после одного часа кипячения в воде	0,8	1,6	1,9	2,1	2,2	2,3	2,2	1,3	1,4
4. Коэффициент трения									
– без смазки									
при P=5 МПа	0,20	0,14	0,14	0,14	0,17	0,17	0,16	0,20	0,17
P=10 МПа	0,25	0,13	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,13	0,12
– со смазкой									
при P=5 МПа	0,15	0,13	0,12	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	0,12
P=10 МПа	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,10	0,10	0,10

В процессе трения, в результате наличия на поверхности углеродных частиц полимер-олигомерной фторированной оболочки, происходит образование разделительного слоя между трущимися поверхностями, содержащего фторированные компоненты. Наличие фторсодержащих соединений в третьем теле приводит к снижению коэффициента трения (составы I-VI). Таким образом показано, что концентрация функционализированных частиц в полимерной матрице, находящаяся в пределах от 0,5 % мас. до 2 % мас. позволяет обеспечить необходимый коэффициент трения для металлополимерных пар трения, значения которого находятся в пределах от 0,16 – 0,25 и предела прочности при растяжении нанокomпозиционного полимерного материала от 60 МПа до 90 МПа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 RU 2219212 C1, 2003.
- 2 RU 2223304 C1, 2004.
- 3 Довгяло, В. А. Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров / В. А. Довгяло, О. Р. Юркевич. – Минск: Наука и техника, 1992. – 256 с.
- 4 Песецкий, С. С. Исследование литевых адгезионных соединений полиамидов с металлами: Автореф. дис. ...канд. техн. наук / С. С. Песецкий. – Рига, 1980. – 16 с.
- 5 BY 10391 C1, 2006.
- 6 Rilsan. Проспект фирмы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Atofina. www.atofina.com. – Дата доступа 20.05.2020.

УДК 621.961

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПУАНСОНА В ПРОЦЕССЕ ПРОБИВКИ

Онысько С.Р.¹, Чекап Н.М.², Мартиновская О.В.¹

1) Брестский государственный технический университет;

г. Брест, Республика Беларусь

2) Физико-технический институт НАН Беларуси;

г. Минск, Республика Беларусь

При изготовлении инструмента, работающего в условиях интенсивных ударных нагрузок, применяется высокохромистая сталь марки X12M. Анализ литературных источников [1-4] показывает, что срок службы деталей штампового оборудования зависит от степени проявления двух процессов, приводящих к разрушению торцевой поверхности инструмента – изнашивания и проявления усталости металла, в основе которых лежит многократная деформация поверхностного слоя, вызывающая постепенное нарастание наклепа на рабочей поверхности и охрупчивания последней, с последующим отделением частиц износа (изношенного материала). В связи с этим используемые для изготовления пробивного инструмента стали должны иметь рационально подобранное сочетание двух во многом противоположных свойств: достаточной твёрдости и повышенной вязкости [1].

При взаимодействии пробивного инструмента с обрабатываемой деталью нагрузка на пуансон должна распределяться равномерно по всему торцевому сечению (рисунок 1а) и равняться технологическому усилию пробивки. Однако при получении отверстий небольших диаметров возможно такое нагружение, когда с одного края рабочей кромки действующая нагрузка практически равна нулю, а к другому краю она линейно возрастает (рисунок 1б). Такой вид нагружения может приводить к искривлению пуансона [5] и появлению недопустимых изгибающих моментов. Основной причиной их возникновения является внецентренное приложение ударной нагрузки, вызванное рядом различных факторов (неточность изготовления инструмента, стабильность работы самого пресса, состояние поверхности листового материала и т.п.).

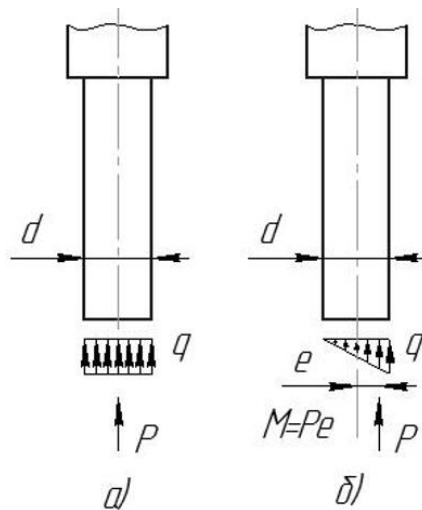


Рисунок 1. – Схема нагружения пробивного инструмента

Возникающие максимальные нормальные сжимающие и растягивающие напряжения при пробивке отверстия рассчитываются по формуле:

$$\sigma_{\max} = -\sigma_N \pm \sigma_M, \quad (1)$$

где: σ_N – напряжение от продольного сжатия, МПа;

σ_M – напряжение от изгиба, МПа.

Подставляя в формулу (1) значения напряжений получаем:

$$\sigma_{\max} = -\frac{P}{A} \pm \frac{M}{W_x} = -\frac{P}{\frac{\pi d^2}{4}} \pm \frac{Pe \frac{d}{2}}{\frac{\pi d^4}{64}} = -\frac{P}{\frac{\pi d^2}{4}} \pm \frac{P \frac{d}{2}}{\frac{\pi d^4}{64}} = \frac{P}{A} \left(-1 \pm \frac{4}{3}\right), \quad (2)$$

где: M – изгибающий момент, Нм;

W_x – осевой момент сопротивления, м³.

Таким образом, максимальные напряжения сжатия в инструменте достигнут значения минус $2,3P/A$, что может повлиять на изменение геометрии торцевой поверхности, ухудшение качества пробиваемого отверстия и в итоге – выход из строя оснастки вследствие изнашивания штампового инструмента [5].

Данный недостаток может быть устранен за счет уменьшения длины рабочей части инструмента, так как при этом происходит снижение гибкости, что положительно сказывается на его работе, исключает искривление оси и потерю устойчивости в технологическом процессе.

Как было установлено в процессе экспериментальных исследований [6] во время работы пробивного пуансона, на его торцевую рабочую поверхность воздействует значительная нагрузка и процесс пробивки в большинстве случаев сопровождается внецентренным приложением нагрузки P (рисунок 2) которая может привести к искривлению или поломке длинной рабочей части, поэтому нельзя пренебрегать боковыми деформациями инструмента [6], которые могут быть определены по формуле:

$$y = \frac{e}{\cos kl} (1 - \cos kz). \quad (3)$$

где: y – горизонтальное отклонение произвольной точки на оси пуансона, мм.
 e – величина эксцентриситета приложения нагрузки, мм;
 k – коэффициент учитывающий жесткость инструмента;
 z – произвольное сечение перпендикулярное оси пуансона.

В соответствии с имеющимся подходом к теории расчета внецентренно нагруженного элемента, важным параметром является точка приложения действующей нагрузки, величину смещения которой от центра инструмента, можно определить при помощи эллипса деформаций.

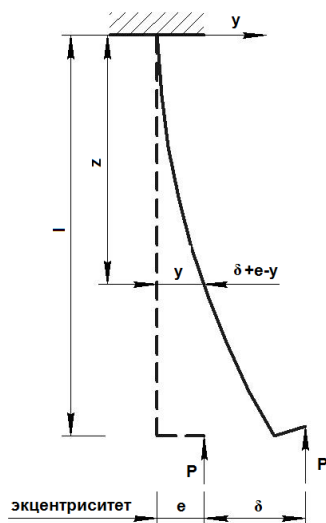


Рисунок 2. – Схема для расчета внецентренно-сжатого инструмента

В работе [7] при помощи тензометрического комплекса «ТИССА» было определено перемещение приповерхностных слоев пробивных пуансона. Так, после снятия сигналов фиксировалось различие в перемещениях, поэтому полученные значения в трех точках и заданные углы между ними однозначно определяют эллипс деформаций, построенный в полярных координатах (рисунок 3), где радиусы-векторы a , b , c , начало координат которых располагается в одной из точек фокуса эллипса (F_1), определяют величину деформаций, фиксируемую каждым соответствующим датчиком.

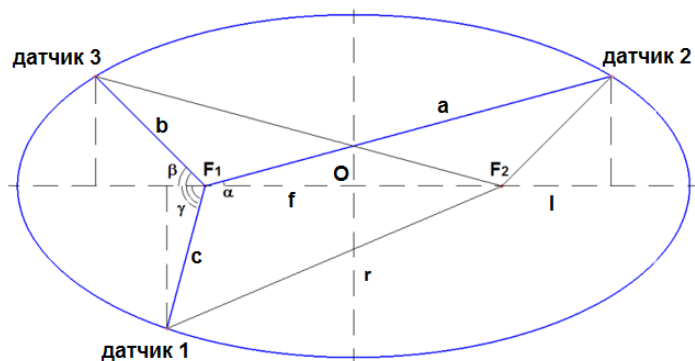


Рисунок 3. – Эллипс деформаций при несоосном нагружении пуансона

Для построенного эллипса большая его полуось l и расстояние от центра до фокуса f связаны между собой соотношениями:

$$\begin{aligned}
\sqrt{a^2 \sin^2 \alpha + (a \cos \alpha - f)^2} + a &= l \\
\sqrt{(b \cos \beta + f)^2 + b^2 \sin^2 \beta} + b &= l, \\
\sqrt{(c \cos \gamma + f)^2 + c^2 \sin^2 \gamma} + c &= l
\end{aligned} \tag{4}$$

где: углы $\beta = 60 - \alpha$, $\gamma = 60 + \alpha$.

Система уравнений (4) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} -2as \cos \alpha + f^2 = l^2 - 2al \\ 2bs \cos \beta + f^2 = l^2 - 2bl \\ 2cs \cos \gamma + f^2 = l^2 - 2cl \end{cases}, \tag{5}$$

из которого может быть получена длина большой полуоси l .

$$l = \frac{a \cos \alpha + \frac{1}{2} b \cos \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} b \sin \alpha}{a - b}. \tag{6}$$

Величина эксцентриситета эллипса деформаций, характеризующая его протяженность, определяется отношением:

$$e = \frac{f}{l} = \frac{a - b}{a \cos \alpha + b \cos \beta}, \tag{7}$$

где углы α и β рассчитываются по формулам:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{3} a \frac{c - b}{ab - 2bc + ac}, \tag{8}$$

$$\cos \beta = \cos(60 - \alpha) = \frac{1}{2} \cos \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha. \tag{9}$$

Подставляя в уравнение (7) значения электрических сигналов, пропорциональных деформациям от датчиков после испытаний пуансона во время пробивки отверстия, получаем величину эксцентриситета эллипса деформаций, которая в данном эксперименте составляет $0,42$ и является характерной для серии испытаний, проведенных с другими пуансонами.

Так как величина эксцентриситета для эллипса всегда находится в пределах от нуля до единицы, то согласно схемы внецентренного нагружения (рисунок 1б), точка приложения нагрузки на пуансон в процессе экспериментов составила $0,21d$, что при диаметре пуансона $4,16$ мм, соответствует расстоянию $0,87$ мм от центра инструмента.

На основании данных, полученных при проведении испытаний по определению относительной деформации, и вычисленных значений действующей нагрузки на пуансон, было определено поперечное смещение

рабочей кромки пробивного инструмента, получаемого при отсутствии точного центрирования. Результаты проведенных расчетов показаны на рисунке 4.

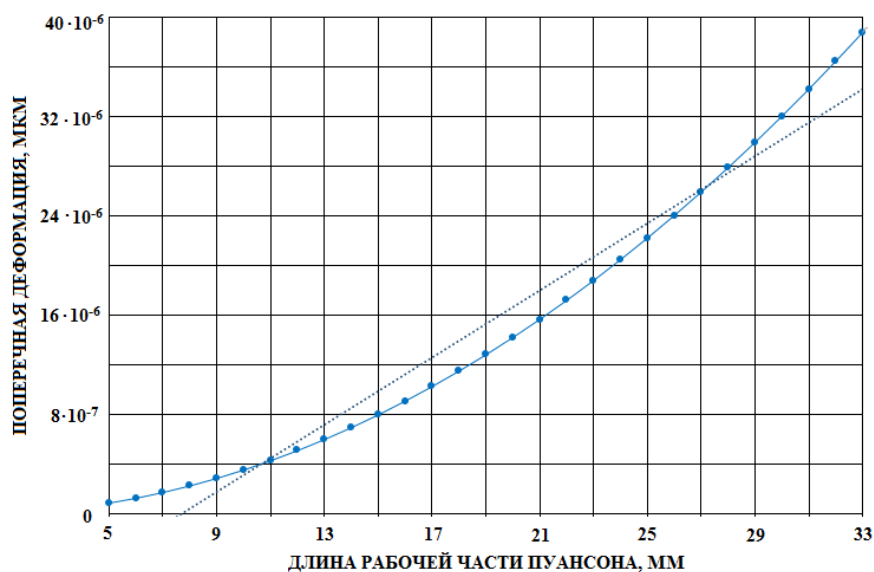


Рисунок 4 – Характер зависимостей поперечной деформации пуансона от длины рабочей части

Расчеты бокового смещения показывают, что максимальная деформация возникает в инструменте и она нелинейно снижается при уменьшении длины рабочей части пуансона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Околович, Г. А. Штамповые стали для холодного деформирования металлов : монография / Г. А. Околович ; Алтайский государственный технический университет им. И/ И. Ползунова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2010. – 202 с.
2. Сорокин, Г. М. Виды износа при ударном контактировании поверхностей / Г. М. Сорокин // Машиноведение. – 1974. – № 3. – С. 89–94.
3. Виноградов, В. Н. Изнашивание при ударе / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, А. Ю. Албагачиев. – М. : Машиностроение, 1982. – 192 с.
4. Георгиев, М. Н. Роль трещиностойкости в изнашивании гетерофазных штамповых сталей при вырубке / М. Н. Георгиев, Г. С. Фукс-Рабинович // Физико-химическая механика материалов. – 1987 – Т. 23, № 3. – С. 63–66.
5. Повышение эксплуатационных свойств цилиндрических пуансонов путем оптимизации их геометрических параметров / С. Р. Онысько, В. М. Хвисевич, Н. М. Чекан, Н. Н. Пушко // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия «Машиностроение», 2017. – № 4. – С. 6–11.
6. Онысько, С. Р. Определение усилий упрочненных цилиндрических пуансонов и их относительной деформации в технологических процессах пробивки отверстий / С. Р. Онысько, В. М. Хвисевич, И. . Томашев // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия «Машиностроение», 2018. – № 4. – С. 39–42.
7. Онысько, С. Р. Технология нанесения упрочняющих покрытий на основе карбонитрида циркония на пробивные пуансоны катодно-дуговым методом : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / С. Р. Онысько. – Минск, 2020. – 160 л.

ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТА

*Сазонов М. И.¹, Ессипчук А. М.², Овчинников Е. В.³, Хвисевич В. М.¹,
Онысько С. Р.¹, Веремейчик А. И.¹, Хеук М. В.¹, Аббасов К. Т.¹*

- 1) Брестский государственный технический университет;
г. Брест, Республика Беларусь
- 2) Universidade Estadual Paulista «JЪLIO DE MESQUITA FILHO»;
г. Сан-Паулу, Бразилия
- 3) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы;
г. Гродно, Республика Беларусь

Известно, что поверхностное плазменное упрочнение сталей является перспективным, но недостаточно изученным процессом термообработки [1–5]. Особый интерес представляют исследования температурных полей в зоне нагрева, скоростей нагрева и охлаждения металла при движущемся локальном источнике тепла. Согласно [1] воздействие высококонцентрированных источников нагрева на поверхность стальных изделий приводит к структурным, фазовым и аллотропическим превращениям в металле. В этой связи изучение влияния тепловых процессов на формирование упрочненного поверхностного слоя с целью получения оптимальных прочностных и износостойких свойств, обусловленных этими превращениями, представляет важную задачу. Для анализа теплофизических параметров в поверхностном слое металла необходимо подобрать оптимальные режимы процесса упрочнения, которые зависят главным образом от характеристик генератора плазмы: тока и напряжения дуги, вида защитного и плазмообразующего газов, расстояния от среза сопла плазматрона до поверхности детали, скорости движения источника.

Для получения исходных данных для расчета и разработки плазматронов проведены исследования напряженности электрического поля дуги, горящей в потоке различных газов [6, 7]. Кроме того, проводились исследования дуги в различных чистых газах при помощи плазматрона с фиксированной длиной дуги и геометрически подобными электроразрядными камерами, причем внутренним электродом-катодом служил графитовый или вольфрамовый стержень длиной 10 мм и диаметром (3–6) мм, заделанным заподлицо в медную обойму. Величины напряженности электрического поля вдоль дуги E_H определены методом измерения потенциалов изолированных друг от друга секций [8]. Напряженность электрического поля дуги определялась по наклону кривой распределения потенциала вдоль оси z .

Установлено, что в исследованном диапазоне параметров зависимость напряженности электрического поля от тока – падающая, а вдоль дуги – практически постоянная.

Для сравнения электрического поля вдоль дуги в вихревых потоках различных газов на рисунке 1 приведены вольтамперные характеристики дуги при

$d = 10$ мм, $G = 4$ г/с. Эти результаты показывают, что наиболее эффективно нагрев газа дугой происходит в гелии.

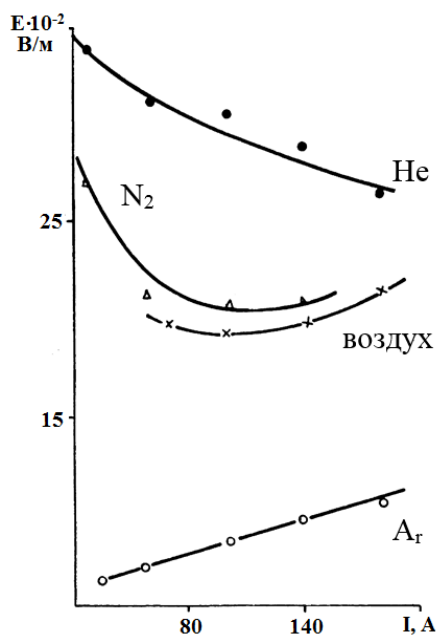


Рисунок 1 – Напряженность электрического поля дуги для различных газов

На основе теории подобия разработана методика расчета плазматронов для нагрева различных газов. Учитывая особенности горения дуги в различных газах, обобщенную зависимость напряженности электрического поля E_H от определяющих критериев для гелия на падающем участке можно представить следующим образом [6]:

$$E_H d = 560 \times \left(\frac{G}{d}\right)^{0,06} \times \left(\frac{d}{I}\right)^{0,37}, \quad (1)$$

и для аргона [7]:

$$E_H d = 4,2 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{G}{d}\right)^{0,11} \cdot \left(135 + 10^{-2} \frac{I}{d}\right) \cdot \left(0,9 + 1,6 \cdot 10^{-4} \frac{z}{d}\right), \quad (2)$$

где G – расход газа, d – диаметр разрядной камеры.

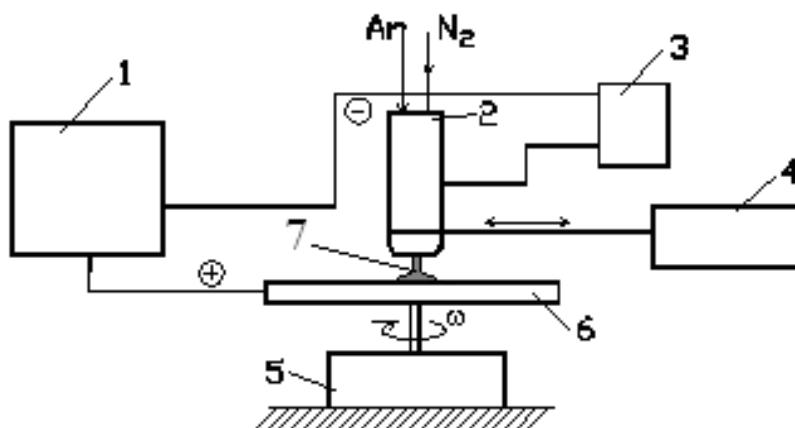
Для разработки методики поверхностного упрочнения стальных изделий при помощи движущейся плазменной дуги разработаны плазматрон и экспериментальная установка (рисунок 2), необходимая для оценки влияния параметров плазменной дуги на поверхность образцов, оптимизации этих параметров, определения влияния режимов упрочнения на физико-механические свойства и износостойкость поверхностного слоя, изучения теплофизических процессов, происходящих в сталях в результате воздействия плазменной дуги, исследования микрорельефа поверхностного слоя в зависимости от параметров процесса упрочнения.

Установка, схема которой приведена на рисунке 3, состоит из силового источника питания дуги 1, плазматрона постоянного тока 2, устройства ВЧ-поджига дуги 3, а также систем газоснабжения плазматрона аргоном и азотом, системы водоохлаждения плазматрона. Кроме того, создана система устройств,

реализующая плоскопараллельное движение упрочняемой детали относительно плазмотрона. Силовой источник питания обеспечивает горение дуги при напряжениях (14-35) В и при токах до 30 А.



Рисунок 2 – Фрагмент экспериментальной установки для поверхностного плазменно-дугового упрочнения стальных изделий



1 – силовой источник питания; 2 – плазмотрон; 3 – высокочастотный генератор;
4, 5 – манипуляторы; 6 – упрочняемая деталь; 7 – плазменная дуга
Рисунок 3 – Схема установки для плазменно-дуговой закалки

Поджиг дуги производится при помощи высоковольтного ВЧ-генератора 3, который подключен одним полюсом к катоду плазмотрона, другим – к его соплу. Перед запуском плазмотрона устанавливаются заданные расходы рабочего газа аргона и защитного газа азота. Кроме того, задается определенная скорость перемещения плазмотрона на основе предварительно проведенных экспериментов по упрочнению на образцах. Затем на плазмотрон подается напряжение от силового источника и включается ВЧ-генератор, который обеспечивает пробой газового зазора между катодом и соплом. В этот момент сопло служит поджигающим электродом. По образовавшемуся искровому каналу развивается дежурная дуга между катодом и соплом. Ток дуги ограничивается переменным сопротивлением R , которое включено в электрическую цепь между соплом и анодом, устанавливается в пределах (4–6) А и регулируется изменением величины R . Под действием потока аргона через плазмотрон слаботочная дуга выдувается из

плазмотрона и замыкается на анод-деталь. Приложенное напряжение к плазмотрону от силового источника обеспечивает загорание основной дуги между катодом и анодом, а дежурная дуга автоматически отключается.

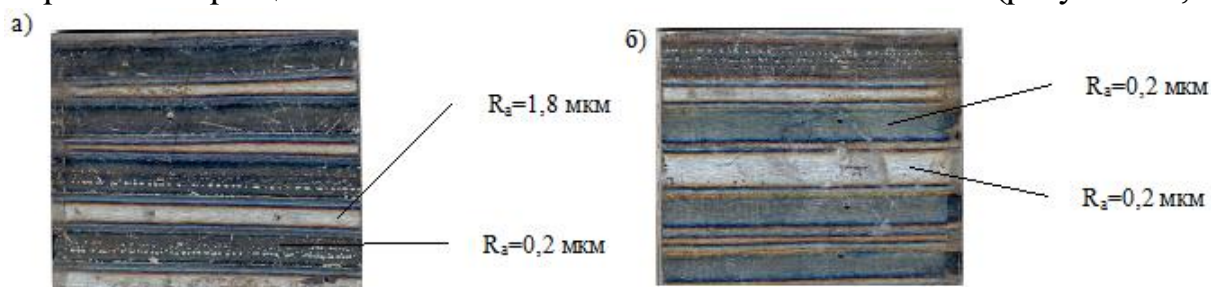
Проведены исследования вольт-амперных характеристик дуги при токах (7–30) А, при этом напряжение дуги составляет (14–35) В в зависимости от соотношения расходов аргона и азота. Аргон и азот в плазмотрон подаются из баллонов высокого давления через редукторы и вентили. Измерение расходов аргона и азота осуществляется с помощью ротаметров РМ–0.63 ГУЗ. Измерения расхода воды с целью определения теплового КПД плазмотрона производились при помощи мерного сосуда и секундомера, а температура холодной и нагретой в плазмотроне воды ртутным термометром. Для перемещения плазмотрона относительно закаливаемой детали используется манипулятор 4 (рисунок 3) с двигателем и магнитным роликом, который приводится во вращательное движение ротором. В свою очередь ролик катится по торцу модели закаливаемой детали 6. Кроме того, разработан и изготовлен специальный манипулятор 5, который непосредственно вращает упрочняемую деталь с заданной скоростью, причем угловая скорость детали может изменяться в пределах (0,5–180) об/мин при помощи разработанной электронной системы управления двигателем.

Для отработки методики процесса ППЗ в качестве материала для образцов выбрана сталь 45, свойства которой достаточно изучены при обработке лазером, микроплазменной дугой и другими методами [1, 2]. Этот факт позволяет оценить достоверность результатов поверхностного плазменно-дугового упрочнения с помощью разрабатываемого метода. Кроме стали 45, испытания проводились на образцах из хромистых сталей: конструкционной легированной 40Х и коррозионностойкой жаропрочной 14Х17Н2, и чугуна ВЧ100.

Для исследования свойств упрочненного поверхностного слоя применялись металлографический, фазовый, рентгеноструктурный анализы. Шероховатость *Ra* поверхностного слоя определялась с помощью измерительного комплекса с лазерным сканированием *Mistral 070705* фирмы *Brown&sharpe* с программным обеспечением *PC-dmis PRO Software*, позволяющего производить контроль в 3D с предоставлением протоколов контроля (точность измерения 0,003 мм). Исследования проводились на плоских образцах. Для определения влияния плазменной дуги на микроструктуру и свойства стали выполнен металлографический анализ для образцов с нанесенной плазменной дорожкой в форме параллелепипеда. Выделение образца осуществляли сечением перпендикулярно нанесенной дорожке.

Эксперименты показали, что поверхностное упрочнение сталей высококонцентрированным источником нагрева можно осуществлять с оплавлением и без оплавления поверхности (рисунок 4). Воздействие плазменной дуги на поверхность образца приводит к изменению микрогеометрии поверхности. При упрочнении в твердой фазе закалка металла происходит без оплавления и шерохова-

тость поверхности остается такой же, как и при механической обработке в исходном состоянии. С помощью системы *Mistral 070705* построена топография поверхности образцов из стали 45 без оплавления и с оплавлением (рисунок 4 а, б).

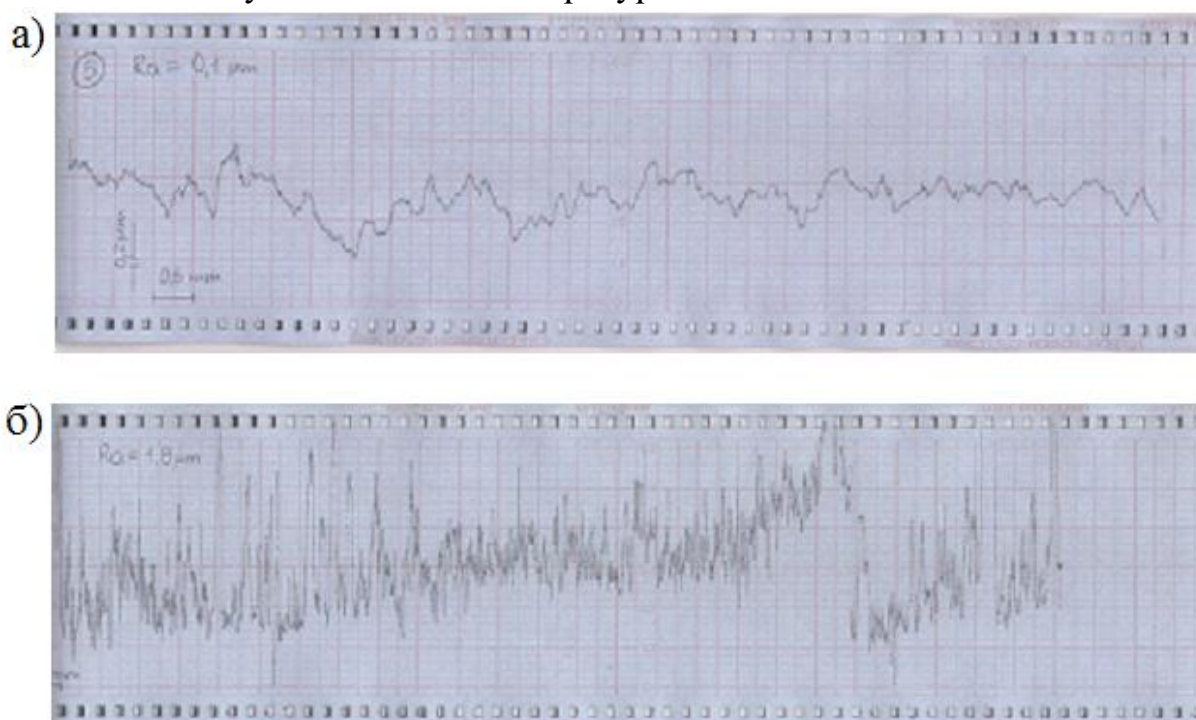


а) с оплавлением поверхности; б) без оплавления поверхности

Рисунок 4 – Микрогеометрия поверхности образцов после термообработки

Анализируя профилограммы, можно заключить, что шероховатость поверхности $R_a = 0,1 \text{ мкм}$ после механической обработки образцов сохраняется такой же и после обработки плазменной дугой.

Как видно из рисунка 5, поверхность образца с оплавлением имеет сложный рельеф, обусловленный системой впадин и гребней. По результатам экспериментальных исследований установлено, что при закалке поверхности в твердой фазе целесообразно применить аргон в качестве защитного газа, который в меньшей степени, чем азот, обжимает дугу. В результате снижается плотность потока энергии, которую поглощает поверхность, и температура поверхностного слоя металла получается ниже температуры его плавления.



а) без оплавления поверхности; б) с оплавлением поверхности

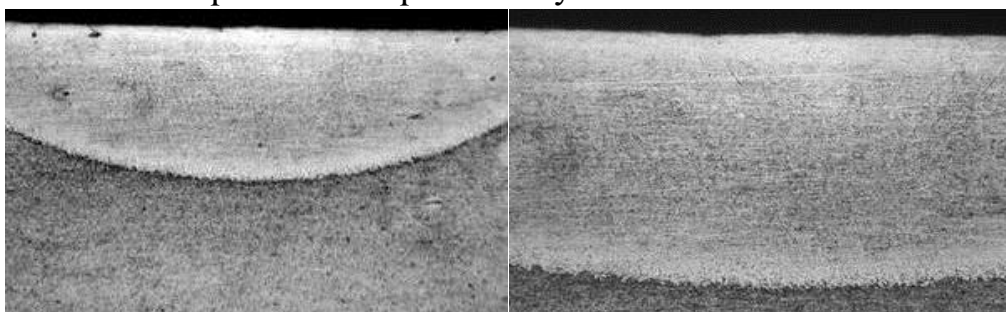
Рисунок 5 – Профилограмма поверхности образцов после термообработки

Согласно [5] плазменная закалка сталей без оплавления поверхности является наиболее распространенной, так как обеспечивает сохранение необходи-

мых качеств поверхности изделия (шероховатость), которые получены механической обработкой. В этом случае процесс ППЗ используется как финишная операция. Необходимые значения твердости, размеры зоны воздействия дуги и другие параметры можно регулировать в широких пределах. В случаях, когда для детали необходимо получить особенные эксплуатационные свойства или к шероховатости рабочей поверхности, не предъявляются высокие требования, используют ППЗ с оплавлением поверхности.

Большое влияние на изменение шероховатости поверхности оказывает ток дуги, скорость движения источника и объемы расхода газов. Эксперименты показали, что шероховатость поверхности в диапазоне (0,1–20) мкм для образцов из сталей 45, 40Х, 14Х17Н2 можно получать, варьируя процентным соотношением смеси защитных газов аргон-азот. Установлено, что при 30 % содержании азота и 70 % аргона в смеси термообработка происходит без оплавления поверхности, повышение же процентного содержания азота приводит к оплавлению поверхности (технологические параметры процесса: ток дуги $I = 26$ А, скорость перемещения источника $v = 11,7$ мм/с). Оплавление поверхности можно получить также, изменяя скорость движения источника при постоянстве других технологических параметров. Установлено, что наименьшая шероховатость поверхности $Ra = 0,1$ мкм получается при воздействии дуги в защитной 100 % среде аргона при $v = 11,7$ мм/с, $I = 26$ А.

Выполнен микроструктурный анализ сталей при термообработке образцов с использованием аргона и азота в качестве защитных газов. Типичная микроструктура поверхностного слоя стали 45 при термообработке в защитной среде аргона приведена на рисунке 6. Зона влияния плазменной дуги имеет форму сегмента (рисунок 6а) и по своему строению аналогична зоне влияния при термообработке стали лазером и электронным лучом.



а) зона влияния плазменной дуги, $\times 45$, б) микроструктура зоны нагрева, $\times 180$

Рисунок 6 – Микроструктура поверхностного слоя стали 45 при термообработке в защитной среде аргона

Анализ фотографий микроструктуры упроченного приповерхностного слоя стали 14Х17Н2 показал, что при малой мощности плазмотрона $P = 440$ Вт зона упрочнения просматривается незначительно. При большем увеличении участка (рисунок 7) поверхностного слоя видна зона столбчатых кристаллов, ориентированных в направлении источника нагрева.

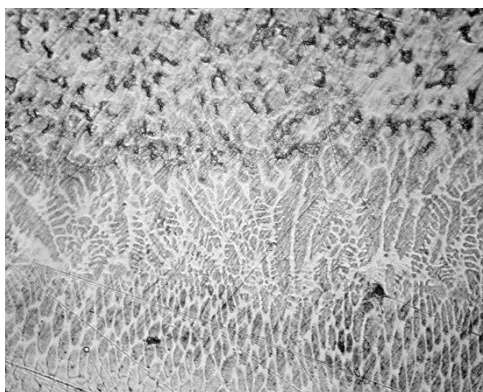
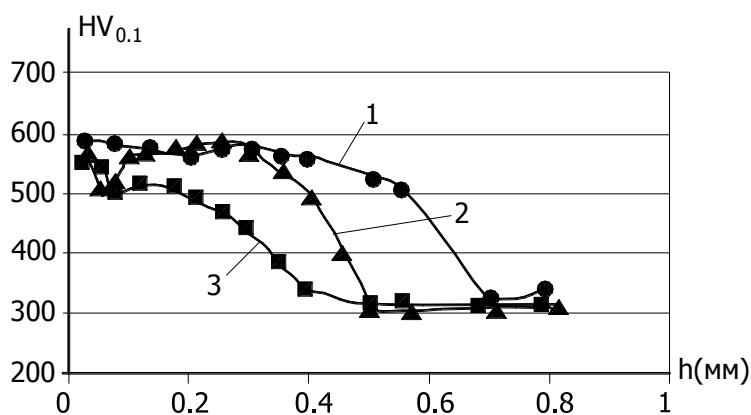


Рисунок 7 – Микроструктура стали 14X17H2 при термообработке в защитной среде аргона ($I = 15 \text{ A}$, $\times 765$)

Исследованы микротвердость поверхностного слоя образцов из различных сталей в зависимости от расхода аргона, тока дуги, скорости перемещения плазмодрона. На рисунке 8 представлено типичное распределение микротвердости по глубине.



1 – $P = 540 \text{ Вт}$, $I = 16 \text{ А}$; 2 – $P = 510 \text{ Вт}$, $I = 15 \text{ А}$; 3 – $P = 440 \text{ Вт}$, $I = 13 \text{ А}$
 Рисунок 8 – Распределение микротвердости упрочненного слоя по глубине

По результатам проведенных экспериментов микротвердость составила (560–600) HV_{0.1}. Толщина упрочненного слоя может изменяться в зависимости от скорости упрочнения от 0,5 мм до 0,7 мм.

Таким образом, варьируя технологическими параметрами процесса поверхностного плазменно-дугового упрочнения, можно получить различную шероховатость поверхности с требуемыми характеристиками поверхностного слоя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов – Минск : Вышэйшая школа, 1988. – 155 с.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Легцинский [и др.]. – Киев : Техника, 1990. – 107 с.
3. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвиевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки : междунар. сб. науч. тр. / Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.

4. Davis, J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics // ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. – 319 p.
5. Сафонов, Е. Н. Плазменная закалка деталей машин : монография / Е. Ф. Сафонов / М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 116 с.
6. Веремейчик, А. И. Исследование электрической дуги в потоке гелия в сильноточном плазмотроне / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, Д. Л. Цыганов // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 5. – С. 99–102.
7. Батрак, В. В. Исследование электрической дуги в потоке аргона / В. В. Батрак, А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 4 : Машиностроение. – С. 26–28.
8. Даутов, Г. Ю. Напряженность электрического поля в стабилизированной вихрем дуге / Г. Ю. Даутов, М. И. Сазонов // ПМТФ. – 1967. – № 4. – С. 127–131.

УДК 621.926

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНЫХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОВАЛКОВОГО АГРЕГАТА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СИЛЬВИНИТА

Сотник Л. Л., Дремук В. А., Винничек К. С.

Барановичский государственный университет,
Барановичи, Республика Беларусь

Введение. Внедрение вибротехники в промышленности осуществляется достаточно высокими темпами, так как существующие средства механизации оказались неконкурентоспособными с новой вибрационной техникой [1, 2].

В вибрационных машинах параллельно идут процессы деформирования при знакопеременном или пульсационном нагружении и перемещения в условиях периодических силовых воздействий [1].

Большое значение имеет равномерное распределение материала по ширине рабочих органов. В связи с наличием различных по величине и форме кусков материала объем рабочего пространства в валковых агрегатах используется не в полной мере. При создании вибрационного воздействия материал занимает рабочее пространство более равномерно, повышая тем самым производительность агрегата.

Вибрация разрушает или ослабляет связи в дисперсных средах: под воздействием вибраций различных интенсивностей дисперсные среды переходят в состояние псевдооживления и так называемого виброоживления. При воздействии вибрации легче преодолеваются силы сухого и вязкого трения, снижаются предел пластического деформирования и вязкость [1].

При динамическом нагружении материала возникающие в нем напряжения вдвое больше, чем при статическом [3]. При ударе сила сжатия возникает в определенном сечении так быстро, что трещина образуется до того, как в частице материала устанавливается равновесное распределение энергии, результатом

чего является уменьшение количества энергии, необходимое для осуществления разрыва [4].

Исследования в области дробления материала показывают, что оценку эффективности процесса дробления можно вести по различным отдельным силовым и энергетическим характеристикам [1]. При циклическом воздействии сжимающей нагрузки разрушающие напряжения снижаются примерно в 1,5 раза.

Таким образом, используя реологические свойства измельчения пород и подбирая для них режимы циклического (вибрационного) нагружения, можно обеспечить накопление разрушений, снизить уровень разрушающих нагрузок и повысить эффективность процесса разрушения.

Основная часть. Результаты теоретических исследований и поисковых экспериментов по изучению закономерностей процесса измельчения материалов в вибровалковом измельчителе свидетельствуют о целесообразности реализации в нем раздавливающе-сдвигового и вибрационного деформирования [5]. Такой вид воздействия возможно осуществить за счет установки одного из валков на эксцентриковом валу с эксцентриситетом e и приданием ему определенной угловой скорости [5]. Дополнительное сдвиговое воздействие можно осуществить, придав валкам разную угловую скорость. Данные факторы оказывают влияние на выходные показатели процесса измельчения сильвинита [5].

Экспериментальные исследования проводились на опытном образце вибровалкового измельчителя (КД ВВИА.613242.001) (рисунок 1).

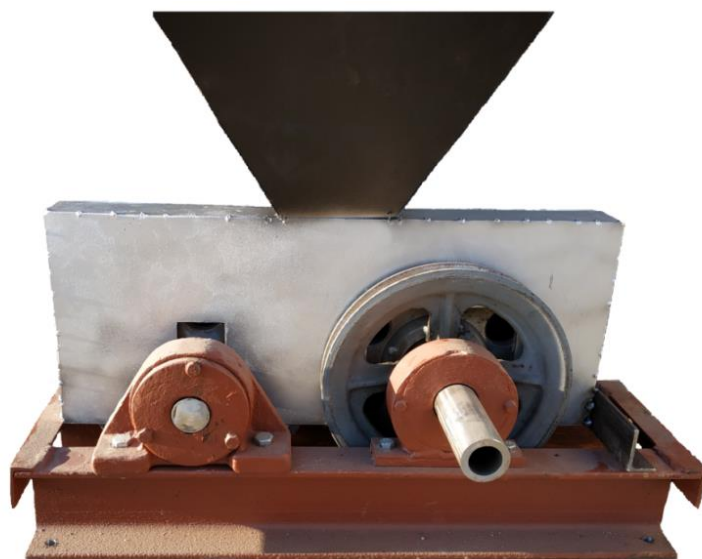


Рисунок 1 — Вибровалковый измельчитель

С целью поиска оптимальных параметров процесса измельчения материала проведены экспериментальные исследования влияния раздавливающе-сдвигового и вибрационного деформирования на выходные показатели:

$$Q_{\text{пр}}, N, q = f(n_{\text{эк}}, e), \quad (1)$$

где $n_{\text{эк}}$ — частота эксцентрикового вала, об / мин;

e — эксцентриситет (амплитуда), мм.

Удельный расход электроэнергии на измельчение минерального сырья с различной структурой определяется:

$$q = f(Q_{\text{пр}}, N), \quad q = \frac{N}{Q_{\text{пр}}} \frac{\text{кВт} \times \text{ч}}{\text{т}} \quad (2)$$

В качестве исследуемого материала был принят сильвинит. Физико-механические характеристики сильвинита представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Физико-механические характеристики сильвинита

Материал	Плотность ρ_0 , кг / м ³	Прочность при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$, МПа	Коэффициент анизотропии $k_{\text{ан}}$	Твердость по шкале Мооса
Сильвинит	1700...2100	50...80	1,2	2

Фракционный состав сильвинита представлен в таблице 2.

Таблица 2 — Фракционный состав сильвинита

Материал	Весовое содержание фракций в %, при размере зерен (мм)				
	3...5	5...7	7...10	10...15	15...25
Сильвинит	4	19	22	37	18

После проведенных экспериментов и обработки их результатов на ПЭВМ были получены следующие уравнения регрессии [5]:

$$Q_{\text{пр}} = 4,64 \cdot 10^{-4} n_{\text{ЭК}} - 1 \cdot 10^{-7} n_{\text{ЭК}}^2 + 0,064e - 0,425; \quad (3)$$

$$N = 5397 - 1,91n_{\text{ЭК}} - 237e + 0,228n_{\text{ЭК}}e + 5,44 \cdot 10^{-4} n_{\text{ЭК}}^2 + 46e^2. \quad (4)$$

Анализ влияния частоты вращения эксцентрикового вала на процесс измельчения. Ранее проведенные теоретические и поисковые исследования [5] позволили установить, что на величину выходных параметров процесса измельчения материалов с различными физико-механическими характеристиками и структурой существенное влияние оказывает частота вращения эксцентрикового вала, создающая вибрационное воздействие на материал.

Вибрационное деформирование частиц осуществляется за счет эксцентрикового вала, вращающегося с различной частотой вращения $n_{\text{ЭК}}$. На рисунке 2 показано влияние частоты вращения эксцентрикового вала на производительность и энергоемкость процесса измельчения.

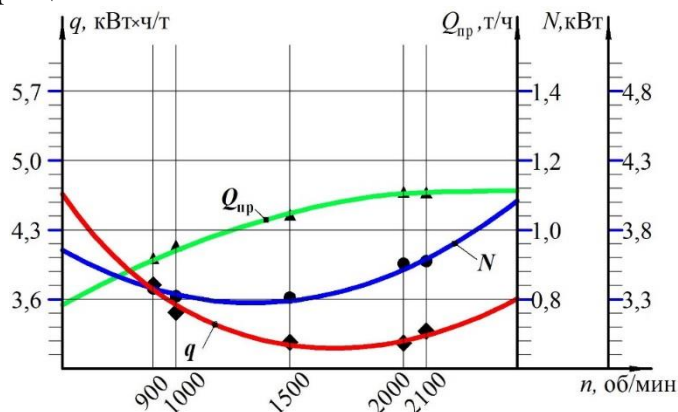


Рисунок 2 — Влияния частоты вращения эксцентрикового вала на процесс измельчения

Как видно из графической зависимости (рисунок 2) варьирование частотой вращения эксцентрикового вала $n_{\text{ЭК}}$ меняет качественные и количественные параметры процесса измельчения.

Так при увеличении $n_{\text{ЭК}}$ с нижнего ($n_{\text{ЭК}} = 1000$ об / мин) уровня варьирования до верхнего ($n_{\text{ЭК}} = 2000$ об / мин) происходит изменение выходных параметров процесса [5]: приведенная производительность возрастает на 17,4 %; потребляемая мощность привода возрастает на 5,3 %. Это приводит к уменьшению удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на осуществление процесса измельчения на 10,3 %.

Таким образом, изменение частота вращения эксцентрикового вала $n_{\text{ЭК}}$ позволяет создать вибрационное воздействие на измельчаемый материал и тем самым повысить эффективность их измельчения [5].

Анализ влияния величины эксцентриситета на процесс измельчения. Проведенные теоретические исследования и поисковые эксперименты показали, что величина эксцентриситета при создании вибраций в вибровалковом измельчителе является амплитудой процесса. На рисунке 3 показано влияние амплитуды колебаний на процесс измельчения.

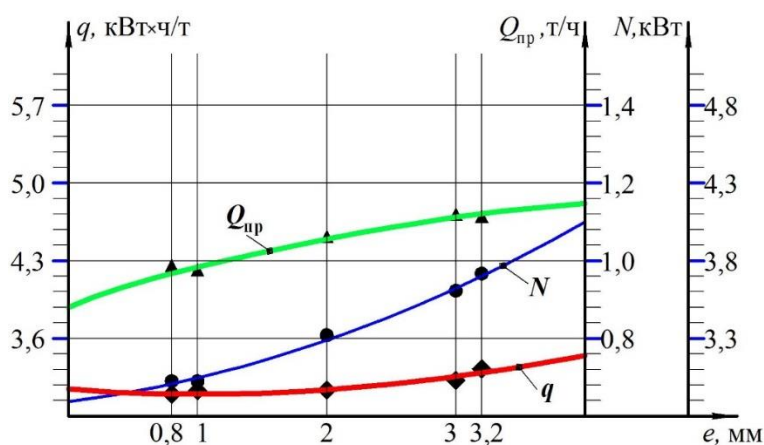


Рисунок 3 — Влияния амплитуды колебаний на процесс измельчения

Как видно из графической зависимости, варьирование величиной эксцентриситета e изменяет качественные и количественные параметры процесса измельчения.

Так при увеличении величины эксцентриситета e с нижнего ($e = 1$ мм) уровня варьирования до верхнего ($e = 3$ мм) происходит изменение качественных и количественных параметров процесса: приведенная производительность возрастает на 13 %.

Создание сдвигового деформирования приводит к совершению большей работы, на что указывает рост потребляемой мощности привода на 19 %. Это приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на осуществление процесса измельчения на 5,3 %.

Таким образом, можно сделать следующий вывод, что применение вибровалкового измельчителя позволяет реализовать объемно-сдвиговое деформирова-

ние измельчаемых материалов. Изменение величины эксцентриситета в диапазоне от 1 до 3 мм приводит к повышению эффективности измельчения материалов за счет увеличения объемно-сдвигового деформирования их частиц [5].

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования по изучению процессов измельчения сильвинита в вибровалковом измельчителе подтвердили теоретически полученные результаты и свидетельствуют о целесообразности реализации раздавливающе-сдвигового и вибрационного деформирования сильвинита.

Согласно уравнениям регрессии, с увеличением частоты вращения эксцентрикового вала, производительность процесса измельчения возрастает на 15...25 %, при этом энергоемкость процесса снижается до 12 %.

Величина эксцентриситета увеличивает производительность процесса измельчения 10...18 %, при этом энергоемкость процесса возрастает на 5...10 %.

Наиболее оптимально процесс измельчения происходит при величине эксцентриситета равном $e = (2...3) \cdot 10^{-3}$ м, на что указывает минимальное значение удельной энергозатраты, выраженное экстремумом функции и равное $q = 3,1$ кВт · ч / т.

Построенные по полученным уравнениям регрессии графические зависимости адекватно отражают процессы измельчения в вибровалковом измельчителе и подтверждают проведенный ранее теоретический анализ и поисковые эксперименты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гончаревич, И. Ф. Вибротехника в горном производстве / И. Ф. Гончаревич. – М. : Недра, 1992. – 319 с.
2. Богданов, В. С. Процессы в производстве строительных материалов / В. С. Богданов, А. С. Ильин, И. А. Семикопенко. – Белгород : Вевелита, 2007. – 512 с.
3. Гутьяр, Е. М. К объемной теории дробления / Е. М. Гутьяр // Изв. Моск. с.-х. акад. им. Тимирязева. – 1961. – Вып. 4. – С. 163–166.
4. Kraus, W. Grinding technique / W. Kraus // *Chemise – Ingenues – Technique*, – 1980. – Vol. 36, № 10. – P. 1053–1060.
5. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. монография / Л. А. Сиваченко [и др.] ; под науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. – Барановичи : БарГУ, 2020. – 359 с.

УДК 621.793:66.088

КРИОГЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Хвисевич В. М.¹, Чекап Н. М.², Веремейчик А. И.¹, Овчинников Е. В.³,
Акула А. П.²*

- 1) Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь
- 2) Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
- 3) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь

Нанесение покрытий – один из наиболее широко используемых способов изменения морфологии поверхности, износостойкости, адгезии и усталостной

прочности материала подложки без существенного изменения геометрических размеров материала. Классическими методами повышения триботехнических характеристик являются следующие: термическое напыление; технологии, основанные на физическом получении вакуумных покрытий; получение покрытий при воздействии потока ионов, радиочастотное магнетронное распыление и электроосаждение, формирование покрытий из газовой среды. Современные методы нанесения материалов на поверхность субстрата открывают новые возможности, а также интенсифицируют исследования в области создания новых химических соединений для формирования покрытий, имеющих улучшенные характеристики такие, как электрические, механические, термические, антифрикционные.

Основными методами нанесения износостойких покрытий в вакууме являются: катодное распыление, термическое напыление и ионное осаждение [1–7]. Высокую износостойкость имеют покрытия TiC, TiN, отличающиеся высокой твердостью и относительно невысокими коэффициентами трения. Качество нанесения покрытия зависит от давления, расхода газа, вида и состава газовой среды, температуры в камере и других факторов. В ряде работ показано, что структура, свойства покрытий нитрида и карбонитрида титана, циркония и параметры процесса их осаждения связаны сложным образом [1, 3, 4].

Покрытия TiC и TiN имеют высокую износостойкость при адгезионном и абразивном изнашивании. В то же время в условиях эрозионного изнашивания эти покрытия приобретают хрупкость. Покрытие TiN применяют в парах трения, работающих в агрессивных средах, в вакууме, в условиях низких и высоких температур, в узлах возвратно-поступательного движения в вакууме и в среде инертных газов. Нанесение TiN обеспечивает увеличение износостойкости на один-два порядка; износ контртела увеличивается при этом не более чем в 2–3 раза [1].

Изнашивание азотированных образцов меньше, чем необработанных и имплантированных ионами азота, объясняется различием химического состава и микрорельефом, способным создавать резервуары для смазочного масла [1, 4].

В последнее время все большее применение находят комбинированные покрытия, так, например, в работе [1, 5] было исследовано покрытие TiN и мультислойное полосчатое покрытие $(Cu+TiN)_x$. Авторами работ [1, 5] на основании проведенных исследований было предложено в трибоузлах, работающих без смазки, покрытие нитрид титана осаждают на обе детали пары трения. Процесс изнашивания в этом случае носит абразивно-усталостный характер. При трении поверхности образцов с покрытием по контртелу из закаленной стали имеет место интенсивное окислительное изнашивание контртела, сопровождающееся значительными колебаниями величины момента и коэффициента трения, поэтому оптимальными для этого класса пар трения являются мультислойные полосчатые покрытия $(Cu+TiN)_x$. Процесс изнашивания упрочненных деталей определяется видом и толщиной покрытия, жесткостью материала подложки и ее исходной шероховатостью [1].

На структуру формируемых вакуумных покрытий существенное влияние оказывает предистория субстрата, на котором формируется вакуумное покрытие. Связи с этим применяют различные методы активации подложек перед формированием различного типа покрытий. Одним из перспективных направлений является обработка субстрата в криогенной жидкости перед формированием покрытий. Обычно вакуумные покрытия формируются на металлических (в большинстве случаев стальных) изделиях, что позволяет существенно увеличить

эксплуатационный ресурс. Обработка металлических подложек в криогенной жидкости может приводить к существенным изменениям в структуре и физико-механических характеристиках.

Согласно современным представлениям основные физико-механические характеристики материалов, в том числе и металлов, могут быть существенно изменены за счет создания нанокристаллического состояния [8–10]. Поскольку при криогенной обработке нанокристаллические структуры могут возникать естественным путем, одним из перспективных способов и энергосберегающих способов поверхностного наноструктурирования сплавов на основе железа является обработка при температурах, близких к абсолютному нулю. Криогенная обработка приводит к превращению остаточного аустенита в высокодисперсный (наноструктурированный) мартенсит деформации, а также выражается в положительном влиянии аустенита на вязкость разрушения. Процентное содержание углерода в мартенсите деформации соответствует концентрации углерода в высокоуглеродистом аустените. Таким образом, получаемый мартенсит является неотпущенным мартенситом, что обуславливает высокую твердость и износостойкость [8].

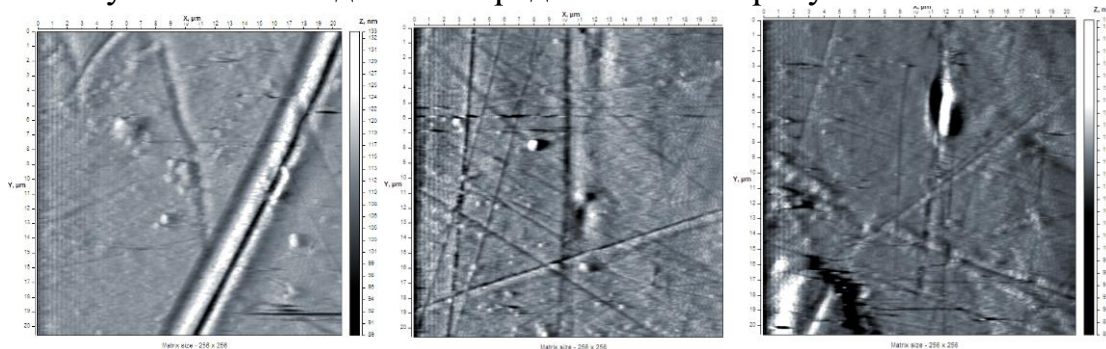
Образование наноструктур в металлической подложке может приводить к образованию зарядовой мозаики на поверхности металла, что, в свою очередь, будет оказывать влияние на кинетику формирования вакуумных покрытий [8–10]. Проведено исследование влияния предварительной обработки в криогенной жидкости на физико-механические характеристики металлической подложки, изготовленной из стали 08кп, а также вакуумных покрытий, сформированных на активированном субстрате [8–10].

В ходе проведенных исследований определяли микротвердость исходных субстратов, в том числе после обработки в жидком азоте при различных временах выдержки (таблица 1) [8–10].

Таблица 1 – Значения микротвердости стали 08 кп, подвергнутой воздействию криогенных температур

Вид обработки	Исходный материал	Выдержка в течение 60 мин в жидком азоте	Выдержка в течение 24 ч в жидком азоте
Н, ГПа	0,4	0,45	0,47

Также были проведены исследования по изучению изменений в структуре поверхностных слоев углеродистой стали типа 08кп при воздействии криогенных температур. Исследования проводились методом атомно-силовой микроскопии. Результаты исследований представлены на рисунке 1.



а

б

в

20.6 × 20.6 μm
A = 282.3 nm
Ra = 19.8 Rq = 29.0

20.6 × 20.6 μm
A = 177.7 nm
Ra = 16.4 Rq = 20.1

20.6 × 20.6 μm
A = 101.1 nm
Ra = 12.0 Rq = 15.5



д

е

ж

а – в – морфология, д – ж – фазовый анализ, а, д – исходная поверхность, б, е – обработка в жидком азоте в течение 3 ч, в, ж – обработка в жидком азоте в течение 24 ч. Площадь сканирования 20x20 мкм

Рисунок 1 – Атомно-силовое изображение поверхностных слоев углеродистой стали 08кп после криогенной обработки

Исходя из полученных данных видно, что происходит уменьшение параметров шероховатости при криогенной обработке покрытий при временах экспозиции 180 мин. Дальнейшая выдержка исследуемых образцов приводит к возрастанию параметров шероховатости. Это может свидетельствовать о структурных перестройках при проведении низкотемпературной обработки.

Определены значения удельной поверхностной энергии стали 08кп до и после проведения криогенной обработки (таблица 2).

Таблица 2 – Значения удельной поверхностной энергии стали 08 кп, после проведения криогенной обработки

Параметр	Образец		
	исходный	подвергнутый воздействию криогенных температур	
Время выдержки в криогенной жидкости	–	60 мин	1440 мин
Угол смачивания вазелинового масла, град	22°30'	19,20	14,70
Угол смачивания водой, град	62°50'	34,50	75,10
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	57,72	58,33	59,02
Работа адгезии воды, мДж	104,74	131,26	90,46
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	10,58	44,24	1,26
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	89,52	183,37	49,96
Поверхностная энергия, мДж/м ²	100,10	227,61	51,23

Согласно данным таблицы 5 обработка в криогенной жидкости приводит к активации поверхностных слоев субстрата, что в свою очередь сказывается на прочностных характеристиках вакуумных покрытий, формируемых на стальных подложках (таблицы 3–5).

Таблица 3 – Значения микротвердости покрытий нитрида титана, сформированных на активированных стальных субстратах стали 08 кп, подвергнутой воздействию криогенных температур

Вид обработки	Исходный материал+TiN	Выдержка субстрата в течение 60 мин в жидком азоте+TiN	Выдержка субстрата в течение 24 ч в жидком азоте+TiN
Н, ГПа	3,1	3,9	4,7

Таблица 4 – Значения микротвердости покрытий нитрида титана, сформированных на активированных криогенной средой стальных субстратах стали 08 кп с последующей обработкой при криогенных температурах

Вид обработки	Исходный материал+TiN+ обработка в жидком азоте в течение 60 мин	Выдержка субстрата в течение 60 мин в жидком азоте+TiN+ обработка в жидком азоте 60 мин	Выдержка субстрата в течение 60 мин в жидком азоте+TiN+ обработка в жидком азоте в течение 24 ч
Н, ГПа	3,8	4,5	4,6

Таблица 5 – Значения микротвердости покрытий нитрида титана, сформированных на активированных криогенной средой стальных субстратах стали 08 кп с последующей обработкой при криогенных температурах

Вид обработки	Исходный материал+TiN+ обработка в жидком азоте в течение 24 ч	Выдержка субстрата в течение 24 ч в жидком азоте+TiN+ обработка в жидком азоте 60 мин	Выдержка субстрата в течение 24 ч в жидком азоте+TiN+ обработка в жидком азоте в течение 24 ч
Н, ГПа	3,9	5,2	5,4

Таким образом, предварительная обработка стальных подложек в криогенной жидкости приводит к возрастанию прочностных характеристик вакуумных покрытий. Данный эффект обусловлен скорее всего изменением зарядовой мозаики на поверхности металлического субстрата, что оказывает существенно влияние на размер образуемых кристаллитов в формируемом вакуумном покрытии. Дополнительная обработка в жидком азоте покрытий, сформированных на активированных стальных подложках, приводит к дальнейшему возрастанию значений прочностных характеристик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Щерба, В. Я. Особенности формирования тонкопленочных вакуумных покрытий из композиционных материалов на поверхностях трения машиностроительных изделий / В. Я. Щерба // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – 2013. – № 3. – С. 102–106.
- Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М., 1986. – 113 с.
- Щадричев, Е. В. Изучение износостойкости инструментальных материалов с ионно-плазменными покрытиями нитрида титана / Е. В. Щадричев // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 4. – С. 660–666.
- Щадричев, Е. В. Изучение износостойкости инструментальных материалов с ионно-плазменными покрытиями нитрида титана / Е. В. Щадричев // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 4. – С. 660–666.
- Мрочек Ж.А. Триботехнические характеристики вакуумно-плазменных покрытий / Ж. А. Мрочек, С. А. Иващенко, И. С. Фролов // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 3. – С. 305–310.
- Попов, А. Н. Повышение износостойкости поверхностей трения путем нанесения многослойных покрытий / А. Н. Попов [и др.] // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 3. – С. 317–321.
- Бецофен, С. Я. Структура и свойства ионно-плазменных покрытий / С. Я. Бецофен [и др.] // Изв. АН СССР. Металлы. – 1990. – № 3. – С. 20–26.
- Овчинников, Е. В. Криогенная технология повышения прочностных характеристик сталей пониженной прокаливаемости / Е. В. Овчинников [и др.] // Веснік ГрДУ, Сер. 6. – 2012. – № 3 (137). – С. 49–58.
- Приходько, И. Ю. Актуальные области использования криогенных технологий в прокатном производстве / И. Ю. Приходько, П. В. Крот // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – № 1. – С. 10–16.
- Овчинников, Е. В. СВЧ-модифицирование алмазоподобных покрытий / Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт, Н. М. Чекан // Горная механика и машиностроение. – 2011. – № 3. – С. 84–93.

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОКРЫТИЯ AlCrN

*Чекан Н. М.¹, Акула И. П.¹, Горельчик А. Н.¹, Макаров А. В.²,
Кузнецов В. П.³*

1) Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

2) Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

3) Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Покрытия нитрида хрома широко используются в металлообработке благодаря своим хорошим механическим и трибологическим свойствам, а также коррозионной и температурной стойкости [1,2]. Требования промышленности, связанные с повышением эффективности и скорости процессов обработки, делают проблему долговечности и надежности режущего инструмента чрезвычайно важной. Не все материалы упрочняющих покрытий соответствуют этим требованиям. Среди прочих покрытий CrN применяется для защиты рабочих поверхностей режущего инструмента, но его твердость и стойкость к окислению не всегда является достаточной для удовлетворения требований современной механической обработки.

Существуют разные способы улучшения механических и трибологических свойств покрытий. Одним из методов является добавление металлических или неметаллических элементов, таких как Ti, Si, Ta, Al, Nb, C, B в состав покрытия CrN. Известно, что получение покрытия с лучшими характеристиками существенно зависит от его уникальной микроструктуры.

Одной из наиболее перспективных тройных систем является AlCrN. AlCrN особенно привлекателен из-за его превосходной стойкости к окислению, отличных механических свойств, а также химической стабильности [3]. AlCrN обладает хорошей износостойкостью благодаря постоянному образованию оксидных слоев на изнашиваемых поверхностях. Наличие алюминия в таком покрытии повышает износостойкость при высоких температурах [4].

В настоящей работе приводятся результаты исследования тонкопленочных покрытий AlCrN, осажденных на нержавеющую сталь для повышения эксплуатационных характеристик изделий из нее, работающих в условиях повышенных нагрузок и температур.

Покрытие AlCrN формировалось методом катодно-дугового осаждения в вакууме на промышленной установке УВНИПА-1-001 с использованием катода специального состава Al 70 ат.% + Cr 30 ат.%. Катод изготавливался методом горячего прессования в вакууме смеси порошков металлов в требуемой пропорции. Совмещение прессования и спекания в одной операции позволило реализовать наблюдаемое при повышении температуры увеличение текучести материалов и получить фактически беспористые (99,9 %) изделия из материалов, для которых применение других методов затруднительно. В качестве основы использовались образцы из полированной (Ra 0,032–0,05 мкм) аустенитной стали 12X18H10T, 03X16H14M3T и пластины полированного кремния.

Перед нанесением покрытия поверхность образцов обрабатывалась ионами аргона в течение 30 минут для удаления остатков загрязнений, которые могли остаться после предварительной очистки (этиловый спирт, бензин). Ток горения катодной дуги составлял 110 А. Давление азота изменялось в пределах (7,5–

18) 10^{-3} Па. В процессе формирования покрытия на подложку подавалось отрицательное напряжение смещения 70 В. Время осаждения составило 10 минут на поверхность стали и 3 минуты на поверхность кремния. Покрытия осаждались отдельно на сталь и отдельно на кремний.

Толщина сформированных покрытий AlCrN определялась с помощью беззотного энергодисперсионного спектрометра X-MAX (Oxford Instruments), а также интерферометрического микроскопа МИИ-4 и составила порядка (1,0-1,2) мкм на кремнии и (3,0-3,5) мкм на стали. На покрытиях, осажденных на сталь, выполнялось исследование фазового состава, адгезии и коэффициента трения. На покрытиях, осажденных на кремний, исследовалась твердость, морфология поверхности.

Для анализа фазового состава сформированных покрытий в настоящей работе использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-3 (излучение $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 0,1540$ нм) в геометрии Брэгга-Брентано. Твердость покрытий определялась методом индентирования с использованием наконечника Кнупа при нагрузке 20 г в течение 10 секунд. Исследования трибологических характеристик проводилось на трибометре типа «палец – плоскость диска» при следующих условиях: палец (контртело) – шарик из стали ШХ15 диаметром 5,5 мм и твердостью 63 HRC; радиус траектории трения 8 мм; нагрузка на образец 1 Н; частота вращения диска 80 об/мин⁻¹. Исследование адгезионной прочности композиционных покрытий к основе из коррозионностойкой стали проводилось на скретч-тестере JLST022 (Южная Корея), оборудованном датчиком акустической эмиссии (АЭ), который позволяет определить момент начала растрескивания материала под индентором и динамику развития трещин. Для адгезионных исследований в качестве индентора использовался алмазный наконечник Роквелла конической формы с радиусом закругления при вершине 0,2 мм. Нагрузка на наконечник возрастала линейно от 1 Н до 70 Н в течение 1 минуты. Длина царапины составляла 15 мм/

На рисунке 1 представлены результаты исследования скорости осаждения, равномерности и состава покрытий AlCrN по толщине. Повышение давления азота в вакуумной камере при осаждении покрытия AlCrN приводит к снижению скорости формирования тонкопленочного материала. В данном случае до определенного давления газа (порядка 0,013 Па) скорость осаждения покрытия остается практически постоянной. Более высокое давление газа приводит к рассеянию ионов металлов и потере ими энергии при столкновениях с молекулами газа, что в свою очередь сказывается на снижении скорости осаждения покрытия (рисунок 1а).

Распределение по толщине покрытий AlCrN указывает наличие аномалии в области оси потока плазмы. В этом месте (0 мм) покрытие имеет меньшую толщину, чем для образцов, расположенных на расстоянии 25 мм и 50 мм от оси потока плазмы (рисунок 1б). Предположительно, данный момент связан с более широкой апертурой разлета частиц алюминия из катодных пятен на поверхности катода Al-Cr. Этим же можно объяснить и тот факт, что для покрытий AlCrN рост давления азота с $5,5 \times 10^{-3}$ Па до $2,4 \times 10^{-2}$ Па приводит к снижению неравномерности покрытия с 2,7 до 2,1 раза. Т. е. на периферию потока плазмы попадают относительно высокоэнергетические ионы металлов, которым даже при повышении вероятности столкновения с молекулами газа, достаточно энергии для образования химического соединения на поверхности растущего покрытия.

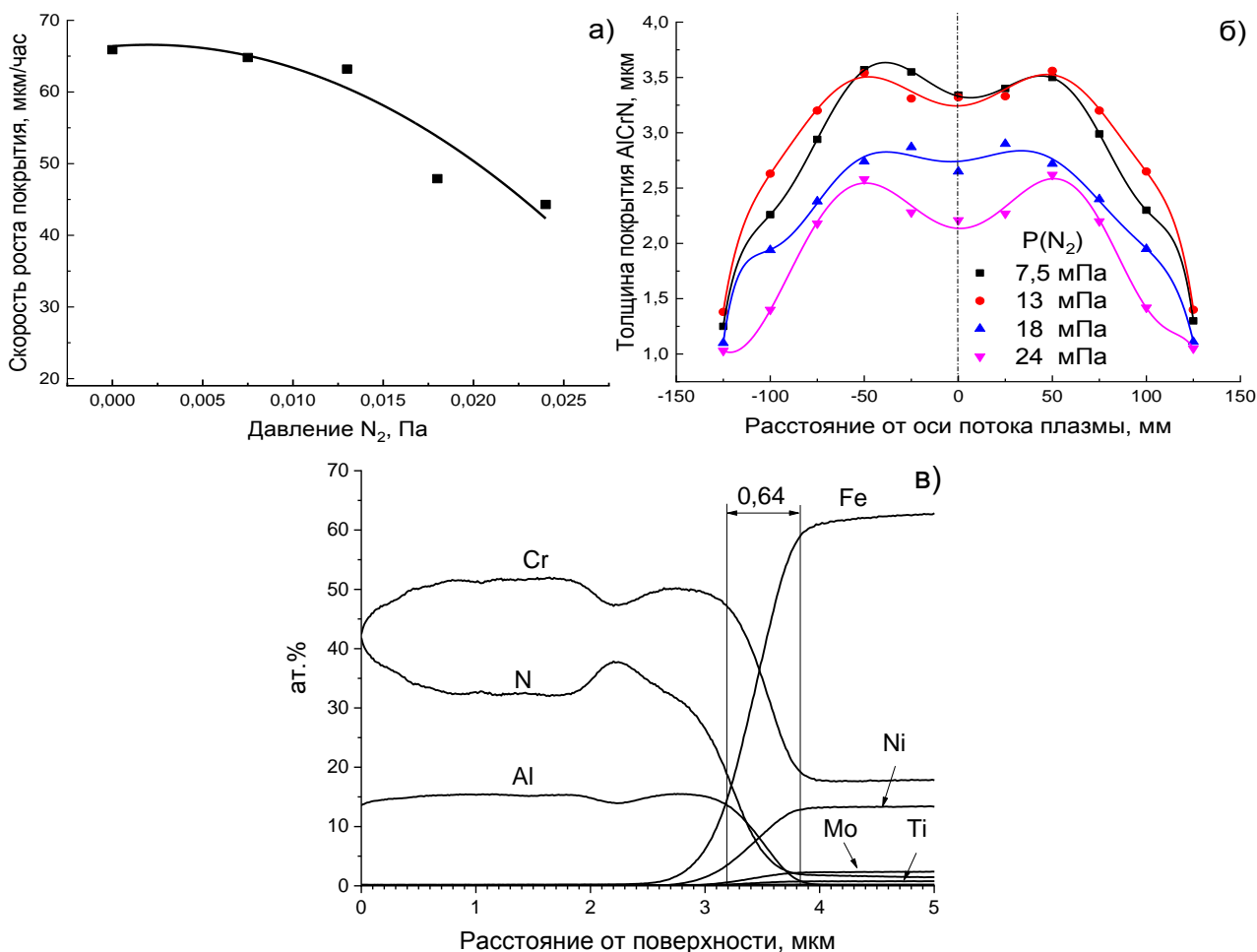


Рисунок 1 – Скорость осаждения (а), распределение по толщине (б) и химический состав (в) покрытия AlCrN

На рисунке 1в представлено относительное распределение химических элементов в глубине покрытия. Профиль можно условно разделить на три зоны по глубине: от 0 мкм до 3,19 мкм – непосредственно покрытие, от 3,19 мкм до 3,84 мкм – переходная зона и основа – более 3,84 мкм. Зона покрытия представлена атомами хрома, азота и алюминия, в соотношении 52,5 ат. %, 32,5 ат. % и 15,0 ат. % соответственно. Зона основы состоит в основном из атомов железа и атомов легирующих добавок – хрома, никеля, молибдена титана и т. д., их относительное содержание соответствует химическому составу стали 03X16N14M3T, из которой была изготовлена основа. Переходная область с глубиной порядка 0,64 мкм представлена атомами, содержащимися как в покрытии, так и в основе.

Следует заметить, что соотношение атомов металлов в покрытии существенно отличается от материала катода (70 ат. % Al и 30 ат. % Cr) – наблюдается значительный дефицит атомов алюминия в покрытии. Наиболее вероятной причиной является то, что диаграммы разлёта атомов алюминия и хрома с поверхности катода отличаются таким образом, что большая часть алюминия эжектируется с катода в виде макрочастиц под большими углами к оси катода и не попадает в область осаждения покрытия. Второй вероятной причиной дефицита атомов алюминия в покрытии является его вторичное распыление атомами хрома при конденсации на основу в процессе формирования покрытия [5–7].

На рисунке 2 представлена типичная рентгенограмма образца стали 03X16H14M3T с покрытием AlCrN. Т. к. покрытие включает в себя относительно лёгкие элементы, оно полностью просвечивается рентгеновским излучением, в результате чего наиболее интенсивные наблюдаемые пики принадлежат фазам материала подложки, в основном γ -Fe и α -Fe в небольших количествах. Видны рефлексы, относящиеся к отражениям от семейств плоскостей (100), (002) и (101) фазы гексагонального нитрида алюминия. Пиков, соответствующих металлическому алюминию, хрому или нитридам хрома обнаружено не было. По-видимому, хром образует твёрдые растворы в нитриде алюминия, а также, возможно, формирование аморфного хрома [8].

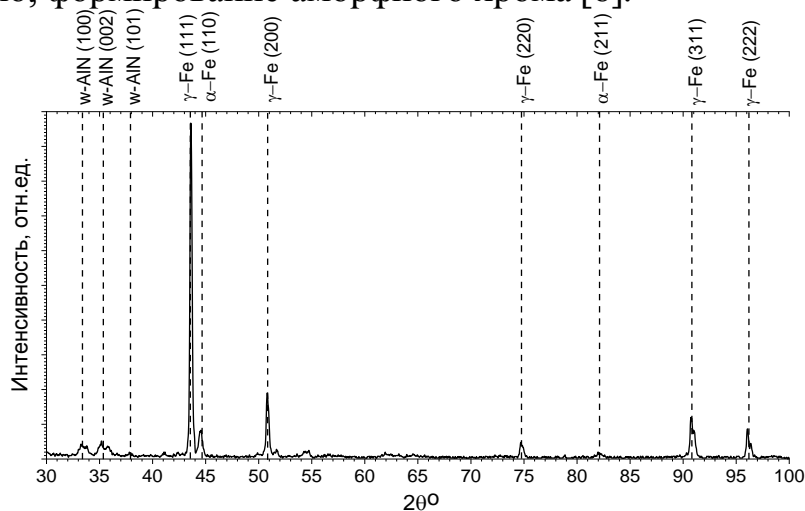
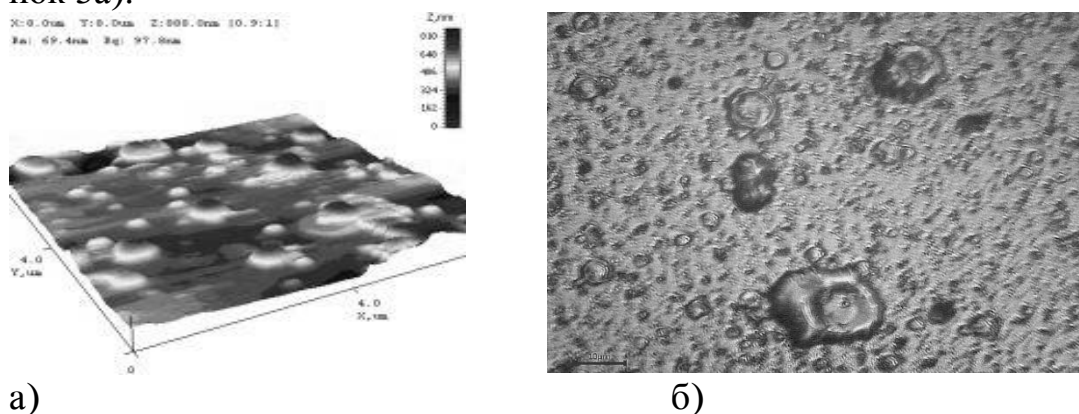


Рисунок 2 – Дифрактограмма поверхности образца с покрытием AlCrN

Результаты исследования морфологии покрытий AlCrN методом атомной силовой микроскопии на площади 8Ч8 мкм, представленные на рисунке 3, показывают, что они обладают достаточно развитой поверхностью. На поверхности таких объектов можно выделить две группы объектов (капель), различающихся по размеру. К первой группе можно отнести капли с размером около (0,20–0,25) мкм, ко второй – капли с размером (0,45–0,50) мкм. Плотность капельной фазы для таких покрытий составляет порядка (3–5) частиц на мкм² и не зависит от давления азота в вакуумной камере. Можно заметить, что капли алюминия склонны образовывать агломерации с размерами порядка (1,5–2,0) мкм (рисунок 3а).



а)

б)

Рисунок 3 – Изображение поверхности покрытия AlCrN, полученное с помощью атомной силовой (а) и оптической (б) микроскопии

Поверхность покрытий нитрида хром-алюминия является достаточно развитой, во многом благодаря присутствию макрокапель алюминия и их агломератов. При анализе площади поверхности 100×100 мкм можно заметить присутствие макрокапель с размером до 15 мкм, по форме напоминающие кратеры (рисунок 3б).

Покрытие AlCrN демонстрирует существенный рост твердости с 9 ГПа до 35 ГПа по мере увеличения давления азота до 0,018 Па. При дальнейшем повышении давления газа твердость покрытия начинает снижаться (рисунок 4).

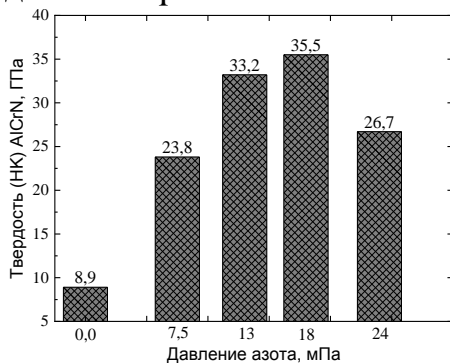


Рисунок 4 – Влияние давления азота на твердость покрытий AlCrN

Предположительно уменьшение твердости покрытия при больших давлениях азота связано с появлением в структуре покрытия свободного азота, не прореагировавшего ни с одним из металлов. Оптическая микроскопия показывает, что структура такого покрытия становится менее плотной и рыхлой, появляются отдельные "хлопья" нитридных соединений.

Результаты трибологических исследований в виде зависимости коэффициента трения от времени для схемы испытания «палец-диск» представлены на рисунке 5а. После кратковременной притирки и удаления естественного оксидного слоя из поверхности контртела в течение первых трёх минут коэффициент трения начинает медленно, практически линейно возрастать от 0,35 и в дальнейшем стабилизируется на уровне 0,80–0,85.

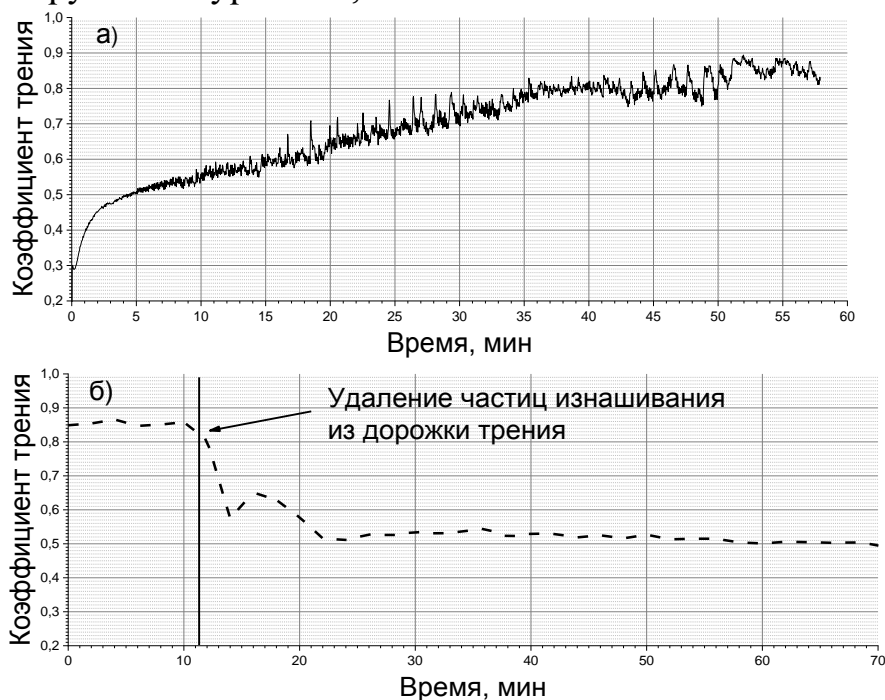


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента трения покрытий AlCrN от времени испытания (а), изменение коэффициента трения в результате удаления частиц изнашивания из дорожки трения (б)

Ближе к окончанию испытаний на графике наблюдаются флуктуации значения коэффициента трения с возрастающей амплитудой, что является характерным для случая попадания частиц покрытия в зону трения в результате усталостного изнашивания покрытия при длительной циклической нагрузке. Подтверждением этому является наличие фрагментов отслоившегося покрытия в дорожке трения, как показано на рисунке 6. Линейные размеры оголённых участков покрытия составляют (30–70) мкм и сопоставимы с шириной дорожки трения порядка (250–350) мкм, что может существенно влиять на трение.

Для проверки влияния частиц изнашивания на коэффициент трения был выполнен аналогичный эксперимент, но уже с механическим удалением абразивных частиц мягким субстратом, результаты которого представлены на рисунке 5б. Можно видеть, что коэффициент трения резко снижается до стабильного значения, близкого к 0,5 без каких-либо скачкообразных изменений, что подтверждает влияние отслаивающихся фрагментов покрытия на увеличение коэффициента трения.

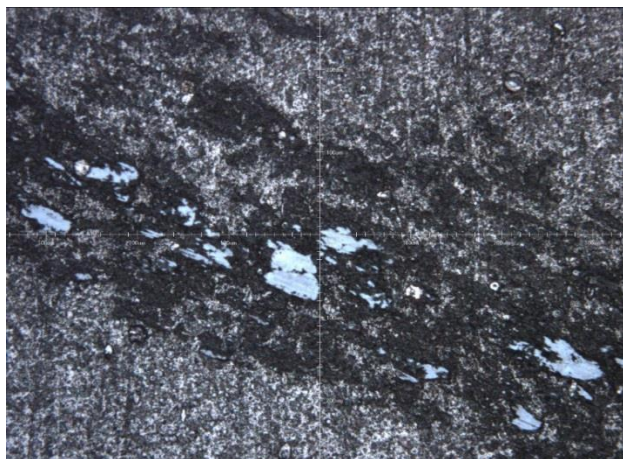


Рисунок 6 – Участок дорожки трения на покрытии с оголёнными фрагментами

Само же покрытие AlCrN обладает одним из самых низких значений коэффициента трения в паре со сталью для нитридной керамики, что, по-видимому обусловлено стабилизацией поверхности трения оксидами алюминия и хрома.

Результаты адгезионных тестов покрытия AlCrN, представленные на рисунке 7, демонстрируют, что при возрастающей нормальной нагрузке на индентор на всех образцах отсутствуют трещины в покрытии на периферии трека, т. е. трещиностойкость этого материала существенно выше, чем, например, для карбонитрида циркония.

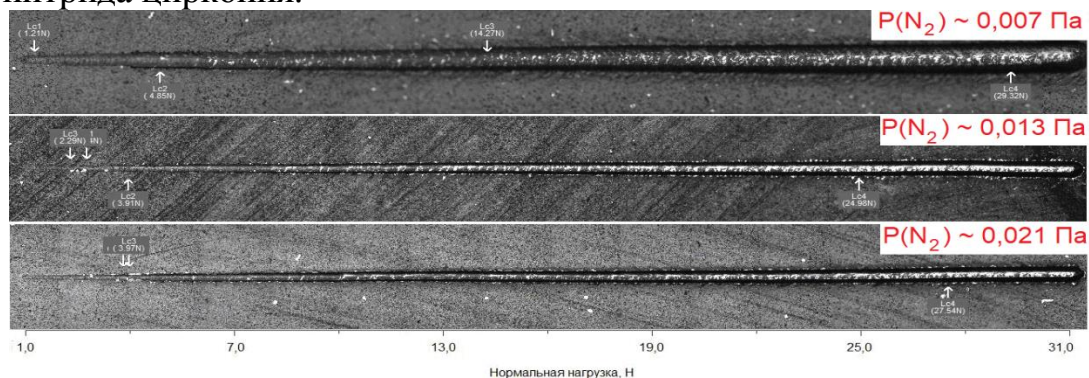


Рисунок 7 – Фрагменты дорожек скретч-тестирования покрытия AlCrN (20⁴)

Вероятно, причиной такого поведения является присутствие химически несвязанного алюминия, кластеры которого выполняют функцию демпфера на границах зерен кристаллитов и препятствуют развитию внутренних напряжений. В то же время износ покрытия до основы для AlCrN наблюдается при достаточно низких значениях нагрузки на индентор. Покрытие начинает локально отслаиваться в царапине при нагрузках порядка (4,0–5,0) Н. После (20–25) Н площадь оголенных участков основы в царапине превышает площадь участков с покрытием.

В результате проведенных исследований определено, что покрытия AlCrN обладают нанокристаллической структурой с размером зерен порядка 7 нм. Показано образование из катодно-дуговой плазмы твёрдого раствора замещения $Al_{1-x}Cr_xN_y$. Установлено влияние азота на механо-трибологические характеристики, скорость осаждения и распределение по толщине для покрытий AlCrN. Полученные результаты будут использованы для разработки технологических режимов формирования функциональных покрытий на конструкционных нержавеющих сталях с предварительно упрочненной поверхностью.

Работа выполнена в рамках договора с БРФФИ № Т20Р-229 от 04.05.2020 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-58-00057).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Conde A., Nanas C., Cristobal A.B., Housden J., Damborenea J. Characterization of corrosion and behaviour of nanoscaled e-beam PVD CrN coatings. // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 201. – P.2690-2695.
2. Chen W., Zheng J., Meng X., Kwon S., Zhang S. Investigation on microstructures and mechanical properties of AlCrN coatings deposited on the surface of plasma nitrocarburized cool-work tool steels. // *Vacuum*. – 2015. – Vol. 121. – P.194-201.
3. Long Y., Zeng J., Yu D., Wu S. Microstructure of TiAlN and CrAlN coatings and cutting performance of coated silicon nitride inserts in cast iron turning. // *Ceramics International*. – 2014. – Vol. 40. – P.9889-9894.
4. Michalak M., Michalczewski R., Osuch-Słomka E., Maldonado-Corte's D., Szczerek M. The effect of temperature on wear mechanism of the AlCrN coated components. // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 674. – P.233-238
5. Gilewicz A., Jedrzejewski R., Myslinski P., Warcholinski B. Structure, morphology, and mechanical properties of AlCrN coatings deposited by cathodic arc evaporation. // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2019. – Vol. 28(3). – P.1522-1531.
6. Warcholinski B., Gilewicz A., P. Myslinski, Dobruchowska E., Murzynski D. Structure and properties of AlCrN coatings deposited using cathodic arc evaporation // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10. – P.793 – 814.
7. Lia Q.Y., Chenga X.D., D Gongb.Q., Yea W.P. Effect of N2 flow rate on structural and infrared properties of multi-layer AlCrN/Cr/AlCrN coatings deposited by cathodic arc ion plating for low emissivity applications // *Thin Solid Films*. – 2019. – Vol. 675. – P.74–85.
8. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Aguirre M.H., Beake B.D., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Endrino J.L., Wainstein D.L., Rashkovskiy A.Y. Design and performance of AlTiN and TiAlCrN PVD coatings for machining of hard to cut materials // *Surface & Coatings Technology*. 2009. – Vol. 204. – P.489–496.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CVD-МЕТОДА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН ИЗ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА T15K6

Цыганов Д. Л.¹, Веремейчик А. И.², Сазонов М. И.²

1) Institute of Plasmas and Nuclear Fusion, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, 1049-001 Lisbon, Portugal

2) Брестский государственный технический университет;
г. Брест, Республика Беларусь

Анализ литературы и маркетинговые исследования рынка инструмента показывают, что в последнее время предъявляются все более высокие требования к качеству деталей машин и режущего инструмента [1–3]. В числе новых развивающихся способов упрочнения наиболее распространено поверхностное плазменное упрочнение, а именно вакуумно-плазменное осаждение (Chemical Vapor Deposition, или CVD-метод – метод химического осаждения из газовой фазы) тонких износостойких алмазоподобных пленок (АПП) на поверхность деталей и режущий инструмент [1, 2]. АПП обладают уникальными свойствами (высокая твердость, теплопроводность). Это именно те свойства, которые нужны в тяжелом машиностроении, а особенно в инструментальном производстве.

Подобные технологии упрочнения входят в число приоритетных высоких технологий государственного уровня, т. к. формирование поверхности с новыми свойствами позволяет существенно повысить качество и долговечность деталей. Например, в Германии изготавливается и используется режущий инструмент с износостойким покрытием, причем доля такого инструмента на рынке обрабатываемого инструмента составляет около 90 % и постоянно растет [3].

Брестским государственным техническим университетом совместно со Сморгонским заводом оптического станкостроения была разработана и создана вакуумно-плазменная установка ВПУ-2М (рисунок 1). В состав установки входят:

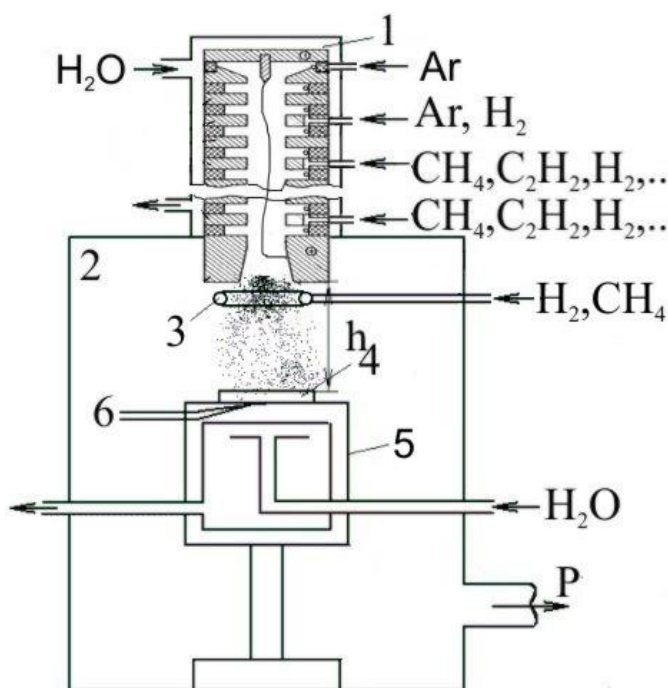
- высокоэнтальпийный плазмотрон мощностью 60 кВт;
- откачной пост;
- система подачи газа в рабочую камеру и плазмотрон;
- пульт управления.

Особенностью установки ВПУ-2М является применение высокоэнтальпийного плазмотрона постоянного тока с межэлектродной вставкой (МЭВ) и газовой завесой стенок разрядной камеры. При помощи плазмотрона генерируется сверхзвуковая высокотемпературная плазменная струя. Плазменная струя позволяет производить нанесение тонких АПП способом химического осаждения из газовой фазы с применением высокотемпературной плазменной струи.

Плазмотрон 1 установлен на реакторе 2 (рисунок 2). Химические реагенты (H_2 , C_2H_2 , CH_4) могут инжектироваться в плазменную струю как через отверстия в кольцевой трубке 3, так и через щели между секциями МЭВ в разрядную камеру плазмотрона.



Рисунок 1 – Общий вид установки ВПУ-2М



1 – плазмотрон с межэлектродной вставкой, 2 – химический реактор, 3 – кольцо для подачи газов в реактор, 4 – подложка, 5 – водоохлаждаемый подложкодержатель, 6 – термопара, 7 – откачной пост

Рисунок 2 – Схема установки ВПУ-2М

Осаждение АПП производилось на режущие пластины из твердого сплава Т15К6, основу которого составляет карбид вольфрама WC , для резцов и фрез при мощности плазмотрона 2,5–3,0 кВт, расходах аргона 3–6 л/мин, метана 0,03–0,1 л/мин, водорода 0,4–1,2 л/мин, расстояниях от плазмотрона до подложки 90–190 мм и давлении газа в реакторе 150–280 Па.

Изучение спектра комбинационного рассеивания света (КРС) нанесенных АПП на режущие кромки пластин показало, что пленку следует отнести к алмазоподобной пленке типа а-С с включениями нанокристаллических алмазов.

Были проведены исследования влияния АПП на пластинах из твердого сплава Т15К6 для режущего инструмента. Проверка ресурса работы пластин

выполнялась как для точения, так и для фрезерования. Экспериментальные исследования при точении проводились на токарном станке для цилиндрических заготовок диаметром 35 мм из стали Ст. Х ГОСТ 5950-73. Для сравнения на подобном образце определялась износостойкость и контрольных пластин без нанесенной АПП.

Обработка заготовок проводилась при отсутствии принудительного охлаждения. Глубина резания составляла $t = 1,5$ мм, подача $s = 0,2$ мм/об, число оборотов $n = 1000$ об/мин, длина прохода резания $L = 100-600$ мм. Проточка осуществлялась до полного износа пластин, после чего производился расчет их стойкости. Некоторые результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные расчетные и экспериментальные данные для точения

№ партии	Число оборотов вращения шпинделя n , об/мин	Диаметр заготовки D , мм	Скорость резания v , м/мин	Подача s , мм/об	Средняя длина прохода резания L , мм	Среднее время рабoты до отказа T , мин	Дисперсия	Примечания
1	1000	35	109,9	0,2	534	2,67	0,4	
2					468	2,34	0,2	
3					844	4,22	0,6	
4					124	0,62	0,2	контрольная

Результаты резания показали, что износостойкость пластин Т15К6 из партии № 2 в сравнении с контрольной повысилась в 3–4 раза, пластин из партии № 1 – в 3–5 раз, а пластин из партии № 3 – в 5–8 раз.

Большая износостойкость пластин из партии № 3 в сравнении с № 1 определяется, как показывают спектры КРС АПП при таких режимах работы установки ВПУ-2М, наличием в АПП на пластинах из партии № 3 нанокристаллических алмазов.

Экспериментальные исследования по определению износостойких пластин при фрезеровании проводились на фрезерном станке для прямоугольных заготовок из стали 45 с размерами 225×50 мм, фрезой диаметром 125 мм. Обработка заготовок проводилась при отсутствии принудительного охлаждения пластин. Глубина резания составляла $t = 0,5$ мм, подача $s = 250$ мм/мин, скорость резания $v = 255$ м/мин. Фрезерование осуществлялось до полного износа пластин, после чего производился расчет времени стойкости пластин. Результаты резания показали, что износостойкость пластин Т15К6 с АПП по сравнению с пластинами, на которые был нанесен нитрид титана, повысилась в 1,3 раза, а для контрольных пластин (которые не проходили дополнительную термообработку) – 1,7 раза. Основные режимы обработки фрезерованием и некоторые результаты исследований пластин приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные расчетные и экспериментальные данные для фрезерования

№ партии	Глубина резания t, мм	Обрабатываемый материал	Подача s, мм/мин	Скорость резания v, м/мин	Среднее время работы до отказа T, мин	Износ по задней поверхности h, мм	Примечания
5	0,5	Сталь 45	250	255	21,6	1,1-1,4	
6					16,2	1,3-1,5	нитрид титана
7					12,6	1,3-1,5	контрольная
5	2	Ст. 08X17T	500	402	4,5	3	
6					4,0	2,5-4,5	нитрид титана
7					0	-	контрольная

При определении возможностей работы пластин в более интенсивных режимах фрезерования была проведена обработка заготовок из коррозионно-стойкой жаропрочной стали 08X17T ГОСТ 5632-2014. Фрезерование заготовок проводилось при отсутствии принудительного охлаждения пластин. Глубина резания составляла $t = 2$ мм, подача $s = 500$ мм/мин, скорость резания $v = 402$ м/мин. Результаты показали, что износостойкость пластин T15K6 с АПП по сравнению с пластинами, на которые был нанесен нитрид титана, повысилась в 1,1 раза. Фрезерование контрольными пластинами было невозможно вследствие быстрого разрушения.

На основании проведенных исследований был разработан технологический процесс, технологическая документация и бизнес-план технологии осаждения АПП на твердосплавные пластины из карбида вольфрама T15K6. Экономический эффект от нанесения АПП на такие пластины может достигать до 5–7 рублей для одной режущей пластины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Диесперова, И. И. Научно-технические ионно-плазменные технологии инженерии поверхности: положение сегодня и перспективы развития российского рынка / И. И. Диесперова, В. В. Слепцов // Справочник. Инженерный журнал. – № 1. – 2001. – С 59–62.
2. Каталог режущего инструмента из твердого сплава фирмы Mitsubishi. – 1999. – 501 с.
3. Matsumoto S., Chattopadhyay K.K. A New RF + DC Plasma CVD Method for Diamond Deposition. Pros. of 12th Intern. Symposium on Plasma Chemistry, August 21 – 25, 1995, Minneapolis, Minnesota, USA, vol. 4, 1995, С. 2315–2320.

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА
И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО
ТРАНСПОРТА**

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УЧАСТКОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПУТЕМ ИХ РЕКОНСТРУКЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕВООРУЖЕНИЯ

Иванов В. П., Вигерина Т. В.

Полоцкий государственный университет,
г. Новополоцк, Республика Беларусь

Направления совершенствования обслуживающе-ремонтной базы автотранспортных предприятий. На учете в Республике Беларусь состоит около 4,5 млн автотранспортных средств (АТС), из которых 84 % принадлежат гражданам. Увеличение количества автомобилей в последнее время составляет до 100 тысяч в год, по их количеству на тысячу жителей Беларусь обогнала такие страны Европы, как Венгрия, Польша, Словакия и Чехия. Автомобильный транспорт страны выполняет свыше 55 % объемов внутренних грузовых перевозок с тенденцией увеличения этой доли, являясь главным перевозчиком в развивающихся секторах экономики Беларуси.

В зависимости от принадлежности транспорта различают государственные предприятия различных ведомств и частные предприятия, а от вида выполняемых производственных функций автотранспортные предприятия подразделяют на автоэксплуатационные, авторемонтные и автообслуживающие [1]. *Автоэксплуатационные предприятия (АЭП)* выполняют перевозку грузов и пассажиров собственным или арендованным парком АТС с его межменным хранением, техническим обслуживанием и текущим ремонтом. *Авторемонтные предприятия (АРП)* выполняют все виды ремонта (включая капитальный) автомобилей (агрегатов) с восстановлением их деталей. *Автообслуживающие предприятия (АОП)* выполняют услуги, связанные с хранением, диагностированием, техническим обслуживанием, текущим ремонтом и заправкой топливом, маслами, технологическими жидкостями и сжатым воздухом любых АТС как приписанных к данному экономическому региону, так и следующих через него (транзитных), как принадлежащих предприятиям, так и отдельным гражданам.

Одна из основных функций автотранспортных предприятий состоит в содержании парка АТС в исправном состоянии в течение всего срока их службы. Эта функция возложена на обслуживающе-ремонтную базу (ОРБ) предприятий, которая включает здания и сооружения, средства технологического оснащения (оборудование и оснастку), техническую документацию и исполнителей [2]. Функции имеют профилактическую направленность, учитывают закономерности изнашивания деталей и представляющую собой множество организационно-технических мероприятий, проводимых с заданной последовательностью и периодичностью. Создание ОРБ предприятий в виде участков и зон требует больших капиталовложений. Эта база вначале создается, а затем непрерывно совершенствуется под влиянием технического прогресса в отрасли, изменением видов и количества АТС и требований к их состоянию, необходимостью повышения качества услуг, снижения расхода производственных ресурсов и улучшения условий труда, защиты окружающей среды от образующихся отходов.

Различают следующие стадии создания и дальнейшего совершенствования ОРБ предприятия: строительство, расширение, реконструкция и техническое перевооружение [3]. Производственную мощность созданной ОРБ увеличивают путем расширения (происходят количественные изменения), а затем совершенствуют путем реконструкции или технического перевооружения ее участков (происходят качественные изменения). Стадии отличаются друг от друга целями, содержанием и объемами работ, привлекаемыми подрядными организациями и последствиями. Наличие созданных ранее долговечных каркасных зданий позволяет совершенствовать большинство предприятия за счет реконструкции и технического перевооружения их частей.

Реконструкция действующей ОРБ включает изменение ее структуры за счет создания одних или ликвидации других производственных участков и зон с изменением их границ, технологических процессов, видов и количества оборудования. Реконструкция производства предполагает также строительство новых и расширение действующих подразделений вспомогательного и обслуживающего характера. Реконструкция дает более быстрые и дешевые результаты, чем новое строительство предприятия.

Техническое перевооружение ОРБ включает мероприятия по повышению до современных требований технического уровня отдельных производственных участков и зон путем замены оборудования с изменением технологии и организации производства. Техническое перевооружение не предполагает изменения оказываемых услуг, его ведут со строительными работами, связанными в основном с изготовлением фундаментов под оборудование.

Строительные работы при реконструкции и техническом перевооружении предприятия выполняют силами ремонтно-строительного участка самого предприятия.

Для АОП более актуально техническое перевооружение производственных участков, для АРП – реконструкция, а для АОП, число которых в последнее время существенно увеличивается, более вероятно создание новых предприятий или их расширение.

Цель работы состоит в повышении качества проектов автотранспортных предприятий за счет реконструкции и технического перевооружения их частей.

Основная часть. Повышение качества проектирования автотранспортных предприятий обеспечивается за счет:

- использования реконструкции или технического перевооружения отдельных участков или зон предприятий;
- оптимального расположения участков друг относительно друга с разработкой соответствующего метода;
- широкого применения поточной организации труда при техническом обслуживании автомобилей.

Реконструкция или техническое перевооружение предприятия позволяют:

- организовать услуги нового вида или увеличить их объемы;
- повысить качество услуг со снижением их себестоимости и цены;
- улучшить условия и повысить производительность труда;
- обеспечить непрерывно возрастающие требования к охране труда и защите окружающей среды.

Первоочередное использование указанных стадий развития предприятий обусловлено их наибольшей эффективностью по сравнению со строительством или расширением.

Изучение направленности и значений грузопотоков между самими участками, а также участками и складами в производственном здании АЭП или АОП позволяет оптимальным образом расположить участки и склады друг относительно друга.

Матрица функциональных связей в виде наличия и направленности грузопотоков (рисунок) позволяет качественно оценить факт тяготения одних частей производственного здания к другим (знаки + в матрице обозначают присутствие таких связей). Чем больше знаков + в строке, тем большее количество подразделений тяготеют к подразделению, название которого вписано в строку матрицы.

Количественную картину функциональных отношений одного участка к другому описывает коэффициент тяготения k_T

$$k_T = \frac{\sum_{i=1}^n G_{\text{ч}}}{G_{\text{а}}},$$

где $G_{\text{ч}}$ – вес n частей автомобиля (материалов), перемещаемых между участками или участками и складами, в течение года, кг; $G_{\text{а}}$ – вес автомобилей, которые проходят ТО и текущий ремонт (ТР) в производственном здании в течение года, кг.

Участки-получатели изделий и материалов, которые в большей степени тяготеют к участкам-поставщикам этих изделий и материалов (композиционным центрам), должны располагаться близко к последним. Это условие уменьшает объем транспортной работы по перемещению грузов между участками и между участками и складами, а также – длину (площадь) проездов.

Верхняя строка матрицы (см. рисунок) показывает, что к участку постового ТР тяготеет наибольшее число специализированных участков (агрегатный, механический, кузнечно-рессорный, электроремонтный, аккумуляторный, медницкий, топливный, шиноремонтный), склады масел, запасных частей и агрегатов. К рабочим местам диагностирования тяготеют участки постового ТР, ТО-1 и ТО-2. На участках ТО-1 и ТО-2 время от времени выявляется необходимость ТР агрегатов автомобилей. Склад масел в большом объеме обслуживает участок ТО-1 и в меньшем объеме – участок ТО-2 и постового ТР. В складе масел хранят также и отработавшие масла. Склад запасных частей и агрегатов обслуживает участки постового ТР, агрегатный, электротехнический, медницкий и топливный. Отремонтированные агрегаты, зачисленные в оборотный фонд при агрегатном методе ремонта, поступают из агрегатного участка на склад запасных частей и агрегатов.

Участки и склады – поставщики грузов (изделий и материалов)	Участки и склады – получатели грузов (изделий и материалов)																
	ТР постовой	Агрегатный	Механический	Кузнечно-рессорный	Кузовной	Электроремонтный	Аккумуляторный	Медницкий	Топливный	Малярный	Шиноремонтный	Деревообрабатывающий	Диагностический	ТО-1	ТО-2	Склад масел	Склад ЗЧ и агрегатов
ТР*) постовой	+	+	+	+		+	+	+	+		+					+	+
Агрегатный	+		+														+
Механический	+	+															
Кузнечно-рессорный	+																
Кузовной			+														
Электроремонтный	+																
Аккумуляторный	+																
Медницкий	+																
Топливный	+																
Малярный																	
Шиноремонтный	+																
Деревообрабатывающий																	
Диагностический	+													+	+		
ТО-1	+															+	
ТО-2	+					+	+	+	+							+	
Склад масел	+													+	+		
Склад ЗЧ**) и агрегатов	+	+				+		+	+								

Рисунок 1 – Матрица отношений (тяготения) участков и складов друг к другу автоэксплуатационного предприятия

Относительно самостоятельными, слабо связанными с остальными, являются участки: кузовной (с рабочими местами сварки), малярный и деревообрабатывающий. Эти участки могут располагаться удаленно от других участков.

Участок ЕО нерационально располагать в общем производственном здании по следующим причинам. Во-первых, он функционально слабо связан с остальными участками АЭП, а, во-вторых, наличие большого объема моечных работ пагубно влияет на долговечность указанного здания.

Применительно к АЭП и АОП основным композиционным центром является участок постовых работ ТР. Около половины трудоемкости работ по содержанию парка автомобилей в исправном состоянии приходится на ТР, а половина объема всего ТР выполняется на рабочих местах постового ТР. По периметру участка постового ремонта следует располагать специализированные участки текущего ремонта агрегатов и других частей автомобилей.

В производственном корпусе АРП выделяют два композиционных центра: разборочно-очистной участок со складом ремонтного фонда, участками приготовления и регенерации очистных растворов, а также определения технического

состояния деталей и складом деталей, ожидающих восстановления; комплекточно-сборочный участок, относительно которого располагают участки восстановления деталей, окрасочный и обкаточно-испытательный.

Поточная организация технического обслуживания автомобилей предложена в СССР в 1928 году и, начиная с 1930 года, не было случаев проектирования крупного АТП, в котором не предусматривались бы поточные линии для межсменного обслуживания подвижного состава [4].

Внедрение поточных методов организации производства с принудительным перемещением изделий по позициям целесообразны на участках с постоянным объемом работ, применительно к обслуживаемым или ремонтируемым автомобилям. Это имеет место при выполнении технических обслуживаний на АЭП, а также – разборочных, очистных, окрасочных и сборочных работ на АРП. Применение поточной организации производства при ЕО становится целесообразным при минимальной суточной программе 100 обслуживаемых автомобилей, ТО-1 – при 12–15 автомобилей и ТО-2 – при 5–6 автомобилей. Поточная организация труда повышает производительность труда до двух раз.

Заключение. Таким образом, основным средством повышения технического уровня АЭП и АРП является реконструкция и техническое перевооружение их участков и зон. Предложен авторский метод выделения композиционных центров в компоновках производственных корпусов предприятий, позволяющий оптимальным образом расположить участки, зоны и склады по критериям минимальной транспортной работы по перемещению обслуживаемых и ремонтируемых изделий и производственной площади производственного здания (в части площади проездов). Обращено внимание на более полное внедрение поточных методов организации производства на АЭП и АРП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование предприятия автомобильного транспорта: учебник / М. М. Болбас [и др.]; под ред. М. М. Болбаса. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2004. – 528 с.
2. Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения: ТКП 248-2010 (02190). – Минск : РУП «Белорусский научно-исследовательский институт транспорта «Транстехника», 2012. – 42 с.
3. Иванов, В. П. Техническая эксплуатация автомобилей. Дипломное проектирование: учебное пособие / В. П. Иванов. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 215 с.
4. Давидович, Л. Н. Проектирование предприятия автомобильного транспорта / Л. Н. Давидович. М. : Транспорт, 1975. – 392 с.

УДК 621.822.6

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА МОДИФИЦИРОВАННОГО РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Монтик С. В.

Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Номинальный ресурс подшипников L_{10} , который соответствует 90 % вероятности безотказной работы, и определяется для подшипников, изготовленных из

широко используемого материала хорошего качества, при хорошем качестве изготовления и работающих в нормальных условиях эксплуатации [1], может значительно отличаться от реального срока службы современных высококачественных подшипников в определённых условиях эксплуатации. Фактический срок службы подшипника зависит от таких факторов, как условия смазывания, степень загрязнённости, наличие перекоса, правильность монтажа.

При нагрузке ниже некоторого определенного значения современные высококачественные подшипники могут достигать бесконечного ресурса, если условия смазки, чистота и другие условия эксплуатации являются благоприятными.

Для подшипников качения из обычно используемого материала хорошего качества и при хорошем качестве изготовления предел усталостного напряжения достигается при контактном напряжении, приблизительно равном 1500 МПа [1]. При практическом использовании подшипников контактные напряжения оказываются больше, чем 1500 МПа, при этом условия эксплуатации вызывают дополнительные напряжения, что приводит к дальнейшему снижению ресурса подшипника.

Для упрощения практических расчетов вместо предела усталостного напряжения введено понятие предела усталостной нагрузки S_u , который определяется как нагрузка, при которой в наиболее нагруженном контакте дорожки качения достигается предел усталостного напряжения σ_u .

Если смазочный материал загрязнен твердыми частицами, то в результате перекачивания этих частиц могут образовываться остаточные вмятины на дорожке качения. В местах этих вмятин происходит повышение локального напряжения, которое ведет к снижению ресурса подшипника. Это снижение ресурса вследствие загрязнения масляной пленки учитывается коэффициентом загрязнения e_c . Снижение ресурса в результате присутствия твердых частиц в масляной пленке зависит от таких факторов, как тип, размер, твердость и количество частиц; толщина масляной пленки; размер подшипника.

Эффективность смазочного материала главным образом определяется степенью разделения контактирующих поверхностей качения. Для образования соответствующей разделительной смазочной пленки смазочный материал должен обладать определенной минимальной вязкостью при достижении подшипником рабочей температуры. Условие разделения смазочным материалом характеризуется относительной вязкостью k , являющейся отношением фактической кинематической вязкости ν к номинальной кинематической вязкости ν_1 , необходимых для достижения надлежащих условий смазки. Значение кинематической вязкости ν принимают при рабочей температуре смазочного материала.

Для учета данных факторов в стандарте ГОСТ 18855-2013 (ISO 281:2007) [1] определяется модифицированный ресурс подшипников

$$L_{nm} = a_1 a_{ISO} L_{10}, \quad (1)$$

где a_1 – коэффициент модификации ресурса по вероятности безотказной работы;
 a_{ISO} – системный коэффициент модификации ресурса;
 L_{10} – номинальный ресурс, миллион оборотов.

Системный коэффициент модификации ресурса a_{ISO} учитывает следующие факторы: тип подшипника; предел усталостной нагрузки C_u ; эквивалентную динамическую нагрузку подшипника P ; условия смазки (тип смазочного материала, вязкость, частота вращения подшипника, размер подшипника, присадки); влияние окружающей среды (уровень загрязнения, уплотнения); параметры частиц загрязняющего вещества (твердость и размер частиц по отношению к размеру подшипника, метод смазывания, фильтрация); качество монтажа (соблюдение чистоты во время монтажа, например, тщательная промывка узла, фильтрация поставляемого масла).

Коэффициент a_{ISO} можно выразить в виде функции

$$a_{ISO} = f(e_c C_u / P; k), \quad (2)$$

$$k = \nu / \nu_1, \quad (3)$$

где e_c – коэффициент загрязнения; k – относительная вязкость; ν – фактическая кинематическая вязкость при рабочей температуре, $\text{мм}^2/\text{с}$; ν_1 – номинальная кинематическая вязкость, необходимая для достижения надлежащих условий смазки, $\text{мм}^2/\text{с}$.

При расчете предела усталостной нагрузки C_u учитывается влияние следующих факторов: типа, размера и внутренней геометрии подшипника; профиль тел качения и дорожек качения; качество изготовления; предел усталостного напряжения материала дорожек качения. Некоторые мировые производители подшипников, например шведская фирма SKF, в каталоге подшипников указывают предел усталостной прочности для конкретного типоразмера подшипника [2].

В ГОСТ 18855-2013 [1] приводятся усовершенствованный и упрощенный метод расчета предела усталостной нагрузки C_u , а также методы расчета коэффициента загрязнений, относительной вязкости k и коэффициента модификации ресурса a_{ISO} . На практике коэффициент модификации ресурса следует ограничить $a_{ISO} \leq 50$.

Ранее в соответствии с ГОСТ 18855-94 вместо понятия модифицированного ресурса использовался скорректированный расчетный ресурс L_{na} [3]

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 L_{10}, \quad (4)$$

где a_2 – коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от особых свойств материала и (или) конструкции подшипника; a_3 – коэффициент режима смазки, корректирующий ресурс в зависимости от условий работы подшипника. В связи с тем, что коэффициенты a_2 и a_3 взаимосвязаны, в расчетах было принято использовать их произведение – коэффициент a_{23} [3]:

$$L_{na} = a_1 a_{23} L_{10}. \quad (5)$$

Рассмотрим особенности расчета коэффициента модификации ресурса a_{ISO} и отличие его величины от ранее используемого коэффициента a_{23} на примере

установленного на тихоходном валу двухступенчатого коническо-цилиндрического горизонтального редуктора роликового конического однорядного подшипника легкой серии 7216А по ГОСТ 27365-87, который имеет следующие параметры: $d = 80$ мм; $D = 140$ мм; статическая грузоподъемность $C_{or} = 114$ кН; частота вращения внутреннего кольца подшипника $n = 80$ мин⁻¹; эквивалентная динамическая нагрузка $P_r = 28,8$ кН. Параметры нагружения подшипника взяты из примера из пособия [4]. Для конического роликоподшипника для обычных условий работы, подшипник из стали ШХ15, полученной по обычной технологии, коэффициент $a_{23} = 0,65$ [3, 4].

Для расчета коэффициента модификации ресурса a_{ISO} определяем предел усталостной нагрузки C_u по упрощенной методике расчета [1]. Для роликовых подшипников с $D_{pw} > 100$ мм формула имеет вид:

$$C_u = C_0 / 8,2 \cdot (100 / D_{pw})^{0,5}, \quad (6)$$

где C_0 – статическая грузоподъемность подшипника, кН; D_{pw} – диаметр центральной окружности шариков или роликов, мм (можно использовать средний диаметр подшипника). Для подшипника 7216А $C_u = 13,26$ кН.

Определяем номинальную кинематическую вязкость ν_1 , необходимую для достижения надлежащих условий смазки [1]:

$$\nu_1 = 4500n^{-0,83} D_{pw}^{-0,5} \quad \text{для } n < 1000 \text{ мин}^{-1}. \quad (7)$$

Для примера $\nu_1 = 11,3$ мм²/с.

Определяем фактическую кинематическую вязкость ν при рабочей температуре по диаграмме 6 [2] для рабочей температуры подшипника 70 °С. Для примера требуется смазка класса вязкости ISO VG 32 с минимальной фактической вязкостью $\nu = 32$ мм²/с при номинальной температуре 40 °С. В примере в редукторе использовалось масло индустриальное И-Г-А-46 по ГОСТ 17479.4-87 с фактической вязкостью $\nu = 46$ мм²/с при температуре 40 °С.

Далее определяется относительная вязкость k по формуле (3). Для примера относительная вязкость $k = 4,07$. В случае, если $k > 4$, следует принять $k = 4$.

Находим ориентировочные значения коэффициента загрязнений e_c по [1]. Для типичного загрязнения при типичных условиях для подшипников без встроенных уплотнений, при проточной фильтрации, наличии частиц износа и загрязнения из окружающей среды при $D_{pw} \geq 100$ мм коэффициента загрязнений e_c принимается от 0,2 до 0,4.

Коэффициент модификации ресурса для радиальных и радиально-упорных роликовых подшипников определяется по формуле [1]:

$$a_{ISO} = 0,1 \cdot \left[1 - \left(1,5859 - \frac{1,2348}{k^{0,071739}} \right) \left(\frac{e_c C_u}{P} \right)^{0,4} \right]^{-9,185} \quad \text{для } 1 \leq k \leq 4. \quad (8)$$

Для примера $a_{ISO} = 0,89$, что в 1,37 раза больше, чем применяемый ранее коэффициент $a_{23} = 0,65$. Т. е. за счет использования системного коэффициента модификации ресурса a_{ISO} , учитывающего загрязнение и условия смазки, модифицированный ресурс подшипника при тех же условиях работы оказывается в 1,37 раза больше, что позволяет использовать подшипники более легких размерные серий.

Коэффициент $a_{23} = 0,9$ (т.е. практически совпадает с рассчитанным коэффициентом a_{ISO}), если принимать его для следующих условий применения подшипников: гарантированное наличие гидродинамического режима смазки и отсутствие повышенных перекосов колец [3].

Методика расчета модифицированного ресурса подшипников по ГОСТ 18855-2013 (ISO 281:2007) [1] внедрена в учебный процесс и используется при проведении практических занятий и курсового проектирования по дисциплине «Детали машин» у студентов специальностей 1–37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей», 1–37 01 07 «Автосервис», 1–36 01 01 «Технология машиностроения». Сложность в применении данной методики заключается в отсутствии достоверных данных о коэффициенте загрязнений для конкретных условий работы подшипников.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Подшипники качения. Динамическая грузоподъемность и номинальный ресурс: ГОСТ 18855-2013 (ISO 281:2007, MOD). – Взамен ГОСТ 18855-94 ; введ. 01.08.2016. – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2016. – V, 49 с. : ил., табл.
2. Каталог «Подшипники качения SKF» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.skf.com/binaries/pub39/Images/0901d196806f74ee-Rolling-bearings---10000_3-RU_tcm_39-121486.pdf#cid-121486 – Дата доступа: 01.08.2021.
3. Детали машин : учебник для вузов / Л. А. Андриенко [и др.]; под ред. О. А. Ряховского. – 4-е изд., перераб. и доп. – М : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 465 с. : ил.
4. Санюкевич, Ф. М. Детали машин. Курсовое проектирование: Учебное пособие / Ф. М. Санюкевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Брест: БрГТУ, 2004. – 473 с.

УДК 629.113:004.94

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ АВТОСЕРВИСА

Монтик С. В.

Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Одним из способов определения оптимального количества постов технического обслуживания (ТО) и ремонта при проектировании или реконструкции станций технического обслуживания автомобилей (СТОА) является использование имитационного моделирования, которое позволяет задавать требуемые законы распределения потока требований на обслуживания и потока обслуживания, а также определять коэффициент загрузки постов, среднюю длину очереди и время нахождения в ней, количество обслуживаний за определенный период.

Рассмотрим применение имитационного моделирования для оптимизации количества постов механизированной коммерческой мойки СТОА. В качестве объекта для моделирования рассматривался процесс функционирования коммерческой механизированной порталной мойки автомобилей. При оптимизации важным вопросом является определение условий увеличения количества постов мойки, например, перехода от одного к двум постам.

Первоначально проводился расчет количества постов механизированной коммерческой мойки $X_{\text{умр}}^{\text{м}}$ по типовой детерминированной методике, изложенной в [1]:

$$X_{\text{умр}}^{\text{м}} = d_{\text{сут}}^{\text{м}} \cdot \varphi / (T_{\text{сут}} \cdot N_{\text{y}} \cdot \eta), \quad (1)$$

где $d_{\text{сут}}^{\text{м}}$ – суточное число заездов для выполнения уборочно-моечных работ (УМР); φ – коэффициент неравномерности поступления автомобилей на посты коммерческой мойки, $\varphi = 1,4$; $T_{\text{сут}}$ – суточная продолжительность работы механизированной мойки, для односменной работы $T_{\text{сут}} = 8$ часов; η – коэффициент использования рабочего времени поста, $\eta = 0,95$; N_{y} – производительность моечной установки, принимаем $N_{\text{y}} = 8$ автомобилей/час. Режим работы постов составлял 302 дня в году, в одну смену, длительность смены 8 часов.

В дальнейшем при расчете количество заездов автомобилей на СТОА для выполнения коммерческой мойки изменялось таким образом, чтобы расчетное количество постов изменялось от 0,9 до 1,5 постов.

При моделировании зона уборочно-моечных работ рассматривалась как одна- или многоканальная открытая система массового обслуживания (СМО) с возможностью образования очереди. Параметры СМО определялись следующим образом.

Интенсивность поступлений автомобилей на мойку λ , требований/час, определялась как

$$\lambda = d_{\text{сут}}^{\text{м}} / T_{\text{сут}}. \quad (2)$$

Тогда интервал времени $t_{\text{пост}}$, час, через который автомобиль поступит на мойку, составит

$$t_{\text{пост}} = 1/\lambda. \quad (3)$$

Интенсивность обслуживания на посту механизированной мойки μ , треб./час, равна

$$\mu = N_{\text{y}}. \quad (4)$$

Тогда продолжительность выполнения одного обслуживания $t_{\text{обсл}}$, час, на посту мойки составит

$$t_{\text{обсл}} = 1/\mu. \quad (5)$$

Далее с использованием полученных данных об интервалах времени поступления автомобилей на посты мойки и продолжительности обслуживания выполнялось имитационное моделирование работы постов механизированной мойки. Для имитационного моделирования процесса функционирования постов использовалась система GPSS World Student Version 5.2.2. Время моделирования работы постов УМР составляло один год.

При составлении имитационной модели процесса функционирования посты УМР рассматривались: 1) в виде открытой СМО с простейшими потоками; 2) в виде открытой СМО с входящим потоком требований и потоком обслуживаний, распределенных по нормальному закону. Моделировались СМО с один и двумя каналами обслуживания, которые соответствуют одному или двум постам УМР. При этом предусматривалась возможность образования очереди.

Для моделирования простейшего потока требований интервал времени между соседними событиями должен иметь показательное распределение. Поэтому при имитационном моделировании постов УМР, как открытой СМО с простейшими потоками, интервалы времени поступления автомобилей на УМР задавались по экспоненциальному закону с математическим ожиданием равным $t_{\text{пост}}$, а интервалы времени на обслуживание одного автомобиля – также по экспоненциальному закону с математическим ожиданием равным $t_{\text{обсл}}$.

В работе [2] указывается, что нормальному закону распределения подчиняется распределение фактическое время выполнения (фактическая трудоемкость) групп операций профилактических работ, а также периодичность профилактических работ. Поэтому при выполнении имитационного моделирования использовались также модели функционирования постов УМР с входящим потоком требований и потоком обслуживаний, распределенных по нормальному закону с заданным коэффициентом вариации 0,20. Математическое ожидание для интервалов времени поступления на УМР и выполнения УМР определялось, как и для простейшего потока.

Результаты имитационного моделирования представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования зоны УМР как открытой одноканальной СМО с простейшими потоками

Расчетное количество постов механизированной мойки	1,29	1,31	1,40
Коэффициент загрузки поста	0,865	0,885	0,956
Средняя длина очереди, автомобилей	5,208	6,675	17,054
Среднее время нахождения в очереди, час	0,754	0,945	2,245
Количество выполненных обслуживаний за время моделирования	16694	17070	18355

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования зоны УМР как одноканальной открытой СМО с входящим потоком требований и потоком обслуживаний, распределенных по нормальному закону

Расчетное количество постов механизированной мойки	1,29	1,31	1,40
Коэффициент загрузки поста	0,872	0,892	0,954
Средняя длина очереди, автомобилей	0,149	0,197	0,692
Среднее время нахождения в очереди, час	0,021	0,028	0,091
Количество выполненных обслуживаний за время моделирования	16888	17257	18442

Как видно из таблиц 1, 2, при увеличении расчетного количества постов механизированной мойки $X_{\text{умр}}^M$ до 1,31, коэффициент загрузки постов не превышает 1, что позволяет рекомендовать использовать один пост механизированной мойки. Однако нужно отметить, что при моделировании зоны УМР с помощью одноканальной открытой СМО с простейшими потоками, средняя длина очереди составляет 5,208 автомобиля при расчетном числе постов равном 1,29 и коэффициенте загрузки 0,865 (см. таблицу 1). Это приведет к тому, что часть автомобилей покинут СТОА необслуженными.

При моделировании зоны УМР в виде одноканальной открытой СМО с входящим потоком требований и потоком обслуживаний, распределенных по нормальному закону, резкое увеличение средней длины очереди наблюдается при расчетном количестве постов равном 1,50 (для расчетного количества постов равного 1,40 средняя длина очереди составляет 0,692).

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования зоны УМР как двухканальной открытой СМО

Расчетное количество постов механизированной мойки	1,29	1,31	1,40
Количество выполненных обслуживаний за время моделирования для СМО с простейшими потоками	16934	17293	18403
Количество выполненных обслуживаний за время моделирования для СМО с входящим потоком требований и потоком обслуживаний, распределенных по нормальному закону	16893	17260	18434

Моделирование зоны УМО в виде двухканальной открытой СМО (см. таблицу 3) показывает, что при использовании двух постов механизированной мойки при расчетном количестве постов $X_{\text{умр}}^M$ равном 1,31, увеличение годового количества обслуживаний по сравнению с одним постом не превышает 1,3 %. В

данном случае определяющим фактором будет нахождение допустимых максимальной длины очереди или максимального времени нахождения в ней, при которых автомобили не будут покидать мойку необслуженными. При моделировании для такого случая необходимо использовать открытую СМО с ограничением на длину очереди или на время нахождения в ней, при этом количество выполненных обслуживаний за год для одноканальной СМО будет меньше, чем для двухканальной. Используемая в данной работе имитационная модель не позволяет учесть эту особенность и требует дальнейшего совершенствования.

Для получения достоверной информации при определении ограничения на длину очереди или времени нахождения в ней при проведении имитационного моделирования необходим сбор статистических данных для определения законов распределения входящего потока требований и потока обслуживаний для конкретного подразделения автосервиса.

При реконструкции организаций автосервиса сбор информации о функционировании подразделений можно выполняться в реконструируемой организации. В случае проектирования новых организаций автосервиса информация о функционировании подразделений возможно принимать по данным аналогичных подразделений действующих организаций автосервиса.

Для определения оптимального количества постов в зоне УМР СТОА возможно использовать критерий максимальной годовой прибыли от работы подразделения, которую можно определить следующим образом [3]:

$$P_i = D_i - P_i \rightarrow \max, \quad (6)$$

где P_i – годовая прибыль для i -го варианта зоны УМР; D_i – годовые доходы для i -го варианта зоны УМР; P_i – годовые затраты (расходы) на содержание i -го варианта зоны УМР.

Годовые доходы для i -го варианта зоны УМР можно определить

$$D_i = N_{\text{обсл год } i} \cdot C_{\text{обсл}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{обсл год } i}$ – годовая количество обслуживаний для i -го варианта зоны УМР; $C_{\text{обсл}}$ – средняя цена обслуживания одного автомобиля в зоне УМР.

Методика расчета годовых затрат подробно рассмотрена в работе [3].

Прибыль от зоны УМР с один и двумя одинаковыми постами механизированной мойки можно определить

$$P_1 = D_1 - P_1$$

$$P_2 = D_2 - P_2 = D_2 - 2P_1, \quad (8)$$

Увеличение прибыли при переходе от одного к двум постам механизированной мойки с учетом формулы (8) составит

$$\Delta P = P_2 - P_1 = C_{\text{обсл}} \cdot (N_{\text{обсл год } 2} - N_{\text{обсл год } 1}) - P_1, \quad (9)$$

При принятии решения об увеличении количества постов УМР нужно оценить возможность увеличения прибыли. Для этого необходимо спрогнозировать, как изменится количество обслуживаний в год при увеличении количества постов.

Разработанные имитационные модели используются студентами специальности 1 – 37 01 07 «Автосервис» для оптимизации структуры зоны УМР СТОА при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Основы научных исследований и инновационной деятельности» и дипломного проектирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Марков, О. Д. Станции технического обслуживания автомобилей / О. Д. Марков. – К. : Кондор, 2008. – 536 с.
2. Монтик, С. В. Моделирование структуры производственных подразделений по техническому обслуживанию транспортных средств / С. В. Монтик, Ю. А. Головченко, Н. С. Монтик // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2017. – № 4: (Машиностроение). – С. 66–69.
3. Монтик, С. В. Оптимизация структуры подразделений организаций автосервиса с использованием имитационного моделирования / С. В. Монтик, Ф. М. Санюкевич, А. П. Головач // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2019. – № 4: (Машиностроение). – С. 69–72.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ПОЛУЧЕНИЕ ГЛУБОКИХ АЗОТИРОВАННЫХ СЛОЕВ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СТАЛИ 40ХМФА

*Бондаренко С. В., Босяков М. Н., Жук Д. В., Капленко В. С.,
Моисеенко А. Н., Олешук И. Г., Поболь И. Л., Суворова О. Ю.*

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Перспективным методом упрочнения поверхностных слоев деталей из конструкционных и инструментальных сталей является ионно-плазменное азотирование (ИПА). Применение ИПА позволяет повысить твердость, износостойкость, усталостную прочность обработанных материалов, получать равномерные по профилю детали диффузионные слои с плавно понижающейся твердостью по глубине. Зубчатые колеса, шестерни и валы, ввиду относительно низких температур выполнения процесса упрочнения, практически не подвержены короблению по сравнению с цементованными (нитроцементованными) деталями и используются без дополнительной операции шлифования, что сокращает затраты при их производстве. По сравнению с печным азотированием при ИПА значительно сокращается продолжительность обработки за счет уменьшения времени нагрева и охлаждения садки и исключения промежуточных операций по активации поверхности деталей. ИПА характеризуется высокой экономичностью процесса, связанной с повышением коэффициента использования электроэнергии и сокращением расхода рабочих газов [1].

Имеется большое количество публикаций, посвященных упрочнению этим методом различных сталей. Как правило, исследования проводились на лабораторном оборудовании с объектами небольших габаритов, результаты которых распространить на ионное азотирование крупногабаритных изделий с использованием промышленного оборудования не представляется возможным. Публикации по ИПА деталей с получением упрочненных слоев глубиной до 0,7–0,8 мм на деталях с характерными размерами порядка 1000 мм и более и массой, превышающей 500 кг, практически отсутствуют.

ФТИ НАН Беларуси – единственный изготовитель лабораторного и промышленного оборудования ионно-плазменной химико-термической обработки (ХТО) в странах Восточной и Центральной Европы. Создаются как универсальные установки с возможностью упрочняющей обработки широкой номенклатуры разнообразных изделий из сталей, чугунов, сплавов титана и алюминия, так и специализированное оборудование для ионной ХТО длинномерных либо крупногабаритных деталей [1]. В работе представлены результаты исследований по ИПА таких изделий.

Материалы, оборудование, методики исследований. Конструкционная сталь марки 40ХМФА нашла применение в промышленности для изготовления валов, шестерен, зубчатых колес, штоков, шатунов, работающих при температурах до 400 °С. Из указанной стали в ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством» изготавливают детали вал-шестерня ПКАБ 52.48.03.00.00.003 массой 1126 кг и длиной 2544 мм и колесо ПКАБ 52.48.02.00.00.029 массой 855 кг и диаметром 1490 мм (рисунок 1).

ИПА деталей и образцов-свидетелей из стали 40ХМФА проводили на оборудовании, разработанном и изготовленном в ФТИ НАН Беларуси. Для упрочнения валов использована установка секционного типа с возможностью ИПА изделий длиной до 3000 мм и диаметром до 900 мм. Обработку колёс выполняли на оборудовании для азотирования деталей диаметром до 2000 мм и высотой до 850 мм.



а



б

Рисунок 1 - Вал-шестерня и колесо после проведения ИПА в установках с рабочим пространством высотой 3000 мм (а) и диаметром 2 200 мм (б)

Твёрдость поверхности образцов-свидетелей определяли с использованием универсального твердомера AFFRI URBV-VRS (нагрузка на индентор 30 кг) согласно ГОСТ 2999-75. Для получения распределения микротвердости по глубине применяли цифровой микротвердомер AFFRI-MVDM8 (нагрузка на индентор 100 гс).

Исследования микроструктуры материала после ИПА проводили на оптическом микроскопе МИ-1 с CCD камерой. Для выявления структуры в качестве травителя использовали 4%-ый раствор HNO_3 в этиловом спирте.

Целью работы являлась разработка технологий получения упрочненных слоев толщиной до 0,7–0,8 мм и твердостью до HV 450–650 при ИПА деталей колесо и вал-шестерня из стали 40ХМФА, а также изучение структуры и механических свойств азотированных слоев.

Общая характеристика процесса ИПА. Основными параметрами азотированного слоя являются поверхностная твердость HV, характер распределения микротвердости по глубине и глубина азотированного слоя h . Как правило, в чертеже указываются поверхностная твердость (если не указана нагрузка, то принимается ее значение, равное 30 кгс) и глубина (в большинстве случаев для изделий из конструкционных сталей задается глубина 0,3–0,5 мм).

Для всех подвергаемых упрочняющей обработке материалов твердость азотированного слоя зависит от химического состава стали, в первую очередь от содержания легирующих элементов (Cr, Mo, V); режима подачи рабочих газов; температуры изотермической выдержки (при увеличении температуры твердость азотированного слоя падает); длительности изотермической выдержки (при увеличении длительности твердость азотированного слоя снижается).

Глубина азотированного слоя зависит от химического состава стали, в первую очередь от концентрации С и Ni; режима подачи рабочих газов; температуры изотермической выдержки (при увеличении температуры глубина азотированного слоя увеличивается); длительности изотермической выдержки (при её увеличении глубина азотированного слоя также растет).

Таким образом, для достижения на всех подвергаемых упрочнению сталях требуемых значений глубины и твердости азотированного слоя необходимо изменять режим подачи газов, температуру и длительность изотермической выдержки. Авторами разработаны алгоритмы выбора требуемых параметров процесса обработки для получения необходимых характеристик упрочненных слоев для всех видов используемых сталей.

Твёрдость азотированного слоя легированных сталей определяется концентрацией азота в твёрдом растворе (твердорастворное упрочнение), количеством и дисперсностью выделившихся нитридов легирующих элементов, твердостью основы стали после предварительной термической обработки. Твёрдость материала поверхности стали после азотирования складывается из твердости основы и прибавки за счет растворения азота и образования нитридов легирующих элементов.

Результаты и анализ. Упрочняемые изделия (вал-шестерня и колесо, показанные на рисунке 1) перед азотированием подвергались объемной стабилизирующей термической обработке. ИПА деталей и образцов-свидетелей проводили по следующим режимам:

№ 1 – температура $T = 530$ °С, время выдержки 30 часов, расход рабочих газов: 38 л/ч азота, 5 л/ч водорода и 17 л/ч аргона;

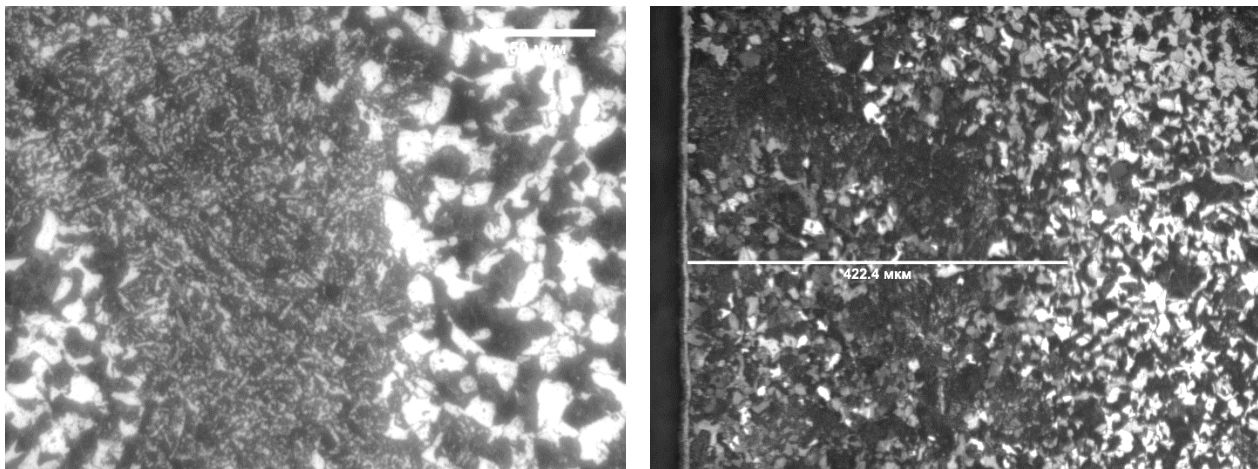
№ 2 – температура $T = 540$ °С, время выдержки 26 часов, расход рабочих газов: 31 л/ч азота, 10 л/ч водорода, 5 л/ч аргона.

На образцах-свидетелях из стали 40ХМФА проводили исследование микроструктуры упрочненного слоя, измерение поверхностной твердости и получали распределение микротвердости по глубине образцов.

В случае ИПА деталей и образца-свидетеля из стали 40ХМФА по режиму № 1 твердость поверхности материала на образце-свидетеле составила HV 610. После ИПА микроструктура сердцевины имела полосчатый характер (рисунок 2 а). Микроструктура упрочненного слоя показана на рисунке 2 б. У поверхности наблюдается светлый нитридный слой толщиной несколько микрометров. За ним располагается более темный диффузионный слой, который представляет собой твердый раствор азота в α -железе с включениями нитридов железа Fe_3N , Fe_4N и нитридов легирующих элементов (хрома, молибдена и вольфрама).

Из-за полосчатости материала сердцевины и особенностей структуры стали 40ХМФА точное определение глубины упрочненного слоя металлографическим методом является затруднительным и в некоторой степени субъективным. Оценка распределения микротвердости на поперечном сечении образцов-свидетелей после ИПА (в соответствии с СТБ 2307-2013 «Поверхностно-упрочненные слои металлических изделий. Методы измерения толщины») является точным методом выявления толщины азотированного слоя. Измерения проводили от поверхности к сердцевине образца с расстоянием между уколами индентора 30 мкм. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя показано

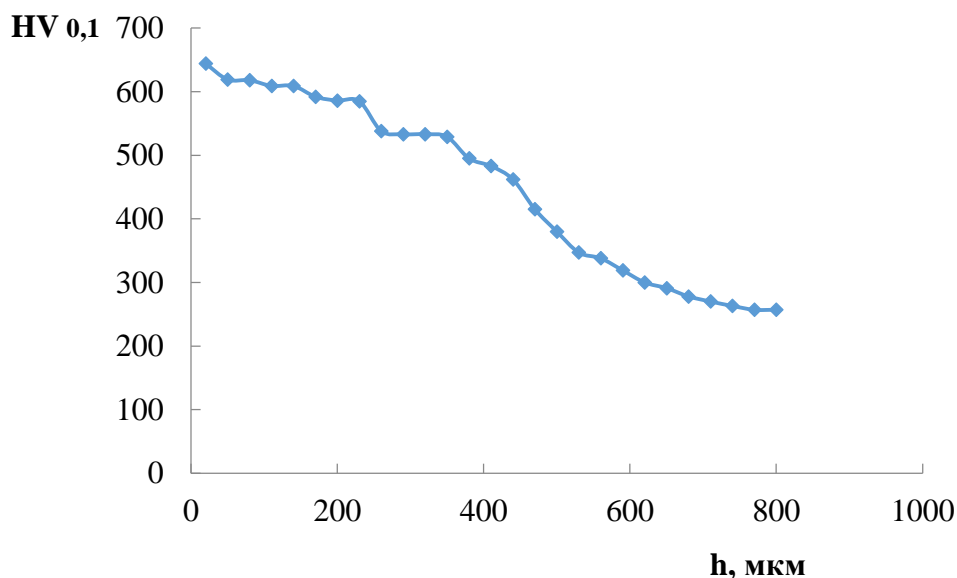
на рисунке 3 а. Микротвердость у поверхности образца составила HV 645, а при переходе к основе HV 270. Распределение микротвердости носит плавный характер. Глубина азотированного слоя достигает 700 мкм.



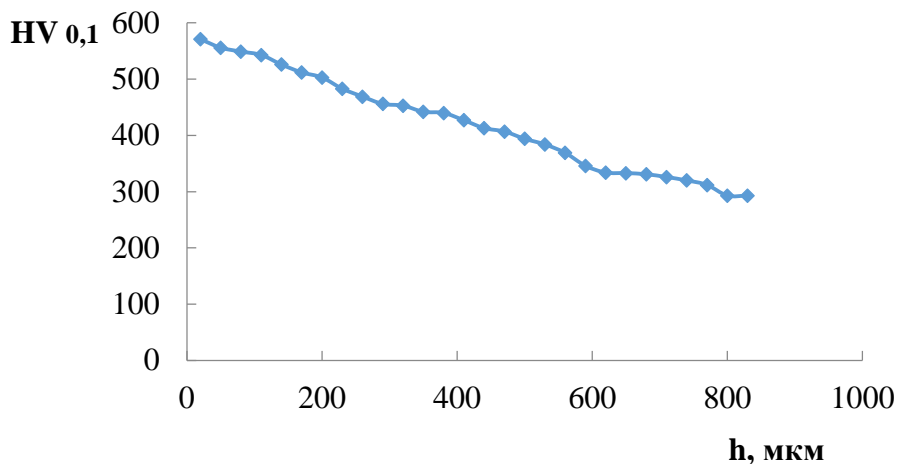
а б
Рисунок 2 – Микроструктура образца-свидетеля из стали 40ХМФА после ИПА по режиму № 1: а – сердцевина; б – азотированный слой

В случае ИПА деталей и образца-свидетеля по режиму № 2 твердость поверхности материала на образце-свидетеле составила HV 540. Микроструктура стали 40ХМФА на образце-свидетеле после ионно-плазменной обработки представлена на рисунке 4. Распределение микротвердости по глубине слоя показано на рисунке 3 б. Микротвердость у поверхности образца составила HV 570, а при переходе к основе HV 312. Распределение микротвердости также носит плавный характер. Глубина азотированного слоя достигает 700–750 мкм.

Таким образом, глубина азотированного слоя на образце-свидетеле из стали 40ХМФА после ИПА по режиму № 1 составила 0,7 мм, поверхностная твердость – HV 610. Глубина азотированного слоя на образце-свидетеле после ИПА по режиму № 2 составила 0,7–0,75 мм, поверхностная твердость – HV 540.

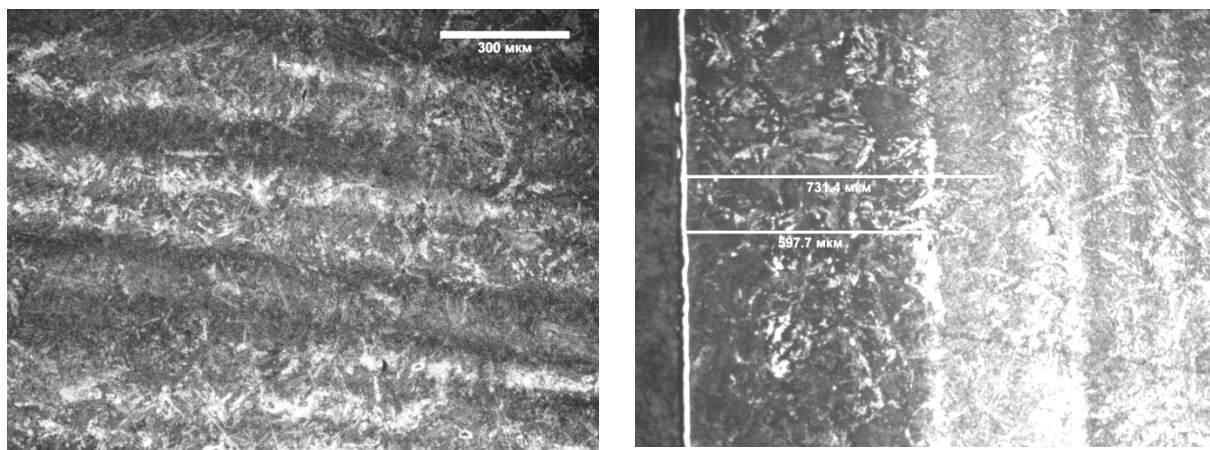


а



б

Рисунок 3 – Распределение микротвердости по глубине образцов-свидетелей из стали 40ХМФА после ИПА: а – по режиму № 1; б – по режиму № 2



а

б

Рисунок 4 – Микроструктура образца-свидетеля из стали 40ХМФА после ИПА по режиму № 2: а – сердцевина; б – упрочненный слой

Конструктивное исполнение разработанного в институте оборудования ИПА и система полностью автоматизированного управления процессом гарантирует достижение идентичных параметров упрочненных слоев на всех участках обрабатываемых изделий, будь то в верхней, средней или нижней частях садки. Практически одинаковые значения имеют твердость стали и глубина азотирования на выступающих элементах деталей и в углублениях на них. Эти параметры контролируются путем анализа образцов-свидетелей, размещаемых в различных зонах садки.

Полученные результаты исследований использованы для разработки технологий ионно-плазменного азотирования деталей для ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством». Упрочненные изделия используются в выпускаемых предприятием насосах для нефтегазовой отрасли и успешно применяются в жестких условиях эксплуатации.

Заключение. С использованием разработанного и производимого в ФТИ НАН Беларуси промышленного оборудования ионно-плазменного азотирования

решаются задачи поверхностного упрочнения широкой номенклатуры деталей с размерами от нескольких десятков до 3000 миллиметров.

На стали 40ХМФА достигается глубина азотированного слоя 0,7-0,75 мм, поверхностная твердость – HV 540-610. Параметры упрочненных слоев в соответствии с требованиями конструкторской документации на изделие регулируются путем выбора температуры, при которой выполняется процесс, длительностью выдержки, расходом рабочих газов (азота, водорода и аргона).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Босяков, М. Н. Научные основы разработки промышленных технологических процессов плазменной химико-термической обработки изделий машиностроения / М. Н. Босяков [и др.]// Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. – 2021. – Т. 1. – С. 60–80.
2. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин [и др.]. – М. : «Металлургия», 1991. – 320 с.

УДК 001.32.100

ИДЕИ И ТРАДИЦИИ, ЗАЛОЖЕННЫЕ АКАДЕМИКОМ БОРИСОМ ЕВГЕНЬЕВИЧЕМ ПАТОНОМ В ИССЛЕДОВАНИЯХ, ПРОВОДИМЫХ АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКОЙ

Грачев О. А.

Государственное учреждение «Институт исследований научно-технического потенциала и истории науки им. Г. М. Доброва НАН Украины»
г. Киев, Украина

Более полувека ученые Украины искренне гордились своей принадлежностью к этой части советской и украинской интеллигенции. И это было обоснованно уже хотя бы потому, что во главе Национальной академии наук Украины (до 1991 года Академия наук УССР, с 1991 по 1993 – Академия наук Украины), а следовательно всей научной сферы Украины более 58 лет (с 1962 года) был Борис Евгеньевич Патон – выдающаяся личность, великий, всемирно известный ученый и организатор науки.

На протяжении своей более чем столетней истории Национальная академия наук Украины пережила немало крутых политических и экономических поворотов, но речь всегда шла исключительно о том, какой ей быть, чтобы отвечать требованиям времени, направлениям и темпам развития мировой науки, актуальным потребностям экономики, безопасности и социальной сферы общества. Объективный научный исторический анализ вклада Б. Е. Патона в развитие Академии наук в советский и последующий период будет полнее, если кратко изложить становление Академии наук как ведущего научного центра республики в период, который условно назовем «допатоновским».

1. В период создания Академии наук в 1918–1921 годах ее первый президент В. И. Вернадский, имея опыт и знания о преимуществах и недостатках деятельности разных по статусу и принципам организации академий наук в разных странах, сумел убедить всех (а оппонентов и критиков хватало) в необходимости создания государственной сети научно-исследовательских институтов. Ученый

утверждал, что это – единственный путь достижения максимальной результативности научного творчества, когда усилия отдельных ученых объединяются, превращаясь в могучую интеллектуальную силу.

Именно такой тип академий наук – имеющих государственный статус, состоящих не только из сообщества выдающихся ученых, но и разветвленной сети научно-исследовательских учреждений – является вершиной организационной структуры научно-технической сферы в развитых странах мира и гарантией успешного и устойчивого социально-экономического и общественно-политического развития этих стран.

Учредительное собрание Украинской академии наук состоялось в Киеве 27 ноября 1918 года. Знаменательно, что в этот же день в Киеве родился и Борис Евгеньевич Патон. С высоты нынешних лет как тут не подумать, что это было не просто совпадение...

Несмотря на разруху к концу 1920 г. в составе Академии было три научных отдела: историко-филологический, физико-математический и историко-экономический, объединявшие 3 института и другие учреждения.

В июне 1921 г. было разработано Положение, которое определяло деятельность Академии наук как высшего научного государственного учреждения Украины. Соответственно этому Академия была переименована во Всеукраинскую академию наук (ВУАН).

К середине 20-х годов завершился процесс начального становления и организационного укрепления академии. В 1923 г. в ее составе было уже 35 научно-исследовательских учреждений.

Основной единицей в системе научных учреждений становятся институты. В феврале 1936 г. был принят новый Устав Академии, который охватывал все стороны ее деятельности, ВУАН была переименована в Академию наук Украинской ССР (АН УССР).

Воссоединение в 1939 г. Западной и Восточной Украины обусловило расширение географии научных учреждений, во Львове были созданы филиалы ряда институтов. В целом за довоенные годы Академия значительно выросла и стала ведущим центром научной мысли на Украине. Ее ученые добились многих выдающихся для того времени результатов. На начало 1941 г. в ее учреждениях работало более трех тысяч человек, из них почти 1200 научных сотрудников, в том числе 60 академиков и 66 член-корреспондентов АН УССР.

В марте 1941 года в очередной раз состоялось присуждение Государственных премий СССР. Среди лауреатов были ученые АН УССР: в области физической химии – акад. АН УССР М. С. Курнаков; в области технических наук – З. И. Некрасов, акад. АН УССР Е. О. Патон, А. П. Чекмарев; в области медицины – акад. АН СССР А. А. Богомолец, член-корр. АН УССР А.Ю. Лурье, акад. АН УССР В. П. Филатов; в области гуманитарных наук и культуры – писатель акад. АН УССР А. Е. Корнейчук, народные поэты Белоруссии акад. АН УССР Я. Купала (И. Д. Луцевич) и Украины акад. АН УССР П. Г. Тычина, а также композитор Л. М. Ревуцкий.

Велик был вклад ученых АН УССР в Победу в Великой Отечественной войне. Война против фашистской Германии стала серьезной проверкой для науки, которая играла важнейшую роль в обеспечении потребностей фронта, со-

здании новых видов вооружений, достижении опережающих темпов их производства. Вся научная и организационная деятельность ученых в кратчайшие сроки полностью перестраивается в интересах обороны страны. В связи с продвижением фашистских захватчиков в глубь территории СССР, решением Советского Правительства в июле – августе 1941 г. основная часть институтов и сотрудников Академии наук была эвакуирована в столицу Башкирской АССР – Уфу. Некоторые институты были потом переведены в другие города восточных районов СССР: Институт электросварки – в Нижний Тагил, Институт энергетики – в Копейск, Физико-технический – в Алма-Ату, Институт черной металлургии – в Свердловск. Учреждения АН УССР также работали в Ташкенте, Фрунзе, Красноярске, Бухаре и других городах. Эвакуация прошла организованно, были спасены основные кадры ученых, вывезены ценное научное оборудование и значительная часть библиотечных фондов. Проявляя высокий патриотизм, ученые работали с огромным напряжением, самоотдачей и в период эвакуации. Уже 4 сентября 1941 г. в сообщении Совинформбюро говорилось: «Институты Академии наук УССР внесли ряд ценных предложений, направленных на укрепление военной мощи страны».

В 1941 году Б. Е. Патон окончил Киевский политехнический институт и был направлен в Горький на завод «Красное Сормово», а в следующем году переведен на работу в Институт электросварки, которым руководил его отец Евгений Оскарович Патон. Институт находился на «Уралвагонзаводе», где началась в 1942 году производственная и научная деятельность Б. Е. Патона. Борис Евгеньевич оказался одним из наиболее одаренных учеников и достойным последователем дела своего отца. В течение одиннадцати лет они работали вместе, это были годы его становления как инженера и ученого, а затем и как руководителя большого научного коллектива.

В своих «Воспоминаниях» академик АН УССР Е. О. Патон написал: «Тесное содружество с заводами заставляло нас действовать быстро, энергично и значительно интенсивнее. За три года войны институт выполнил работу, на которую в мирных условиях потребовалось бы восемь-десять лет». Уже летом 1942 г. на ряде заводов успешно использовалась новая технология скоростной автоматической сварки под флюсом корпусов танков Т-34, артиллерийских систем, авиабомб, разработанная Институтом электросварки, которая не имела аналогов в мировой практике в годы войны. Много было достижений коллектива Института и в других отраслях.

Ученые АН УССР наряду с научными исследованиями проводили большую пропагандистскую работу, выступали с лекциями и докладами перед трудящимися и воинами Красной Армии. В апреле 1942 г. на II-ом Всеславянском митинге в Москве они обратились с призывом направить совместные усилия на борьбу с фашизмом, а в июле того же года АН УССР провела в Уфе антифашистскую научную сессию.

В марте 1944 г. началось возвращение академических институтов обратно на Украину. Работа ученых УССР в период Великой Отечественной войны явилась славной страницей в ее истории. Ученые Академии вместе со всем советским народом с честью выдержали суровые испытания военного времени. Их самоотверженная работа для фронта, для Победы получила высокую оценку государ-

ства и народа. Высокими государственными наградами были отмечены сотрудники многих учреждений Академии, чей ратный и трудовой подвиг помог выстоять в борьбе с нацизмом, приблизить Победу над ним (в 1943–1944 гг. двенадцати ученым Академии присуждена Сталинская премия). За выдающиеся заслуги в области электросварки академику АН УССР Е. О. Патону в 1943 г. было присвоено звание Героя Социалистического Труда. В 1944 г. это высокое звание было присвоено Президенту АН УССР академику А. А. Богомольцу.

Война еще продолжалась, а в Академии, наряду с выполнением важных работ оборонного значения, разворачивались исследования, связанные с восстановлением народного хозяйства освобожденных районов Украины, намечались перспективные планы развития науки в условиях мирного времени.

В послевоенный период развитие АН УССР происходило через последовательную дифференциацию научных исследований по областям знаний и соответствующую специализацию институтов и других научных подразделений. Расширялись сеть и география научно-исследовательских учреждений. Укрупнялись и реорганизовывались существующие институты и создавались новые, совершенствовалась структура Академии в целом. Так, с 1947 г. успешно развивались исследования в области кибернетики в Институте электротехники АН УССР и в лаборатории вычислительной техники Института математики (с 1957 г. – Вычислительный центр АН УССР, с 1962 – Институт кибернетики АН УССР).

Первая в континентальной Европе электронная вычислительная машина была создана учеными АН УССР под руководством академика С. А. Лебедева в творческом содружестве с коллегами из России. В декабре 1951 г. машина была принята в эксплуатацию. В 1956 г. за создание и ввод в эксплуатацию быстродействующих вычислительных машин «БЭСМ» С. А. Лебедеву присвоено звание Героя Социалистического труда.

В конце 50-х – начале 60-х годов Советский Союз осуществил прорыв в изучении космического пространства. Среди награжденных за эти успехи и укрепление обороноспособности страны звание Героя Социалистического труда получили украинские ученые М. К. Янгель (1959, 1961 гг.), М. Ф. Герасюта, А. Ю. Ишлинский, В. М. Ковтуненко, В. Г. Сергеев (все в 1961 г.).

2. 27 февраля 1962 г. Общее собрание Академии наук УССР выбрало новый состав Президиума. Президентом был избран академик АН УССР Б.Е. Патон, который с 1953 г. уже возглавлял Институт электросварки им. Е.О. Патона АН УССР. 29 июня того же 1962 года Общее собрание АН СССР избрало его академиком АН СССР по специальности «металлургия и технология металлов».

Став директором Института, Борис Евгеньевич Патон тем самым унаследовал руководство Патоновской научной школой, возникшей на рубеже 1930-х годов под непосредственным руководством его отца – выдающегося инженера и ученого Евгения Оскаровича Патона. Принятые в Институте методы организации научно-технического процесса являются эффективной формой межотраслевого творческого сотрудничества ученых и инженеров, научного поиска и приращения его достижений.

Под руководством Бориса Евгеньевича Патоновская школа значительно расширила тематику фундаментальных исследований и прикладных разработок. Ре-

зультаты работы Института получили широкое признание мирового научно-технического сообщества. Разработанные в Институте методы сварки практически любых материалов (от различных металлов до живых человеческих органов), любых толщин (от микронов до метров), в любых условиях (от морских глубин до открытого космоса) являются одной из базовых технологий современной цивилизации. Борис Евгеньевич руководил Институтом 67 лет. Истории и достижениям Патоновской школы посвящены сотни изданий.

Необходимо отметить, что в послевоенный период в СССР проводилась политика энергичной поддержки науки. В значительной степени это продолжалось и последующие годы. Так доля финансирования научной сферы в 1965 году составляла 6,9 % ВВП, а в 1985 году – 5,8 % ВВП.

В апреле 1963 года вышло постановление ЦК КПСС и Совета министров СССР «О мероприятиях по улучшению деятельности Академии наук СССР и академий наук союзных республик», в котором намечалось «реорганизовать науку» с целью приблизить ее к производству, используя для этого, к сожалению, чисто формально-бюрократическое решение: передать значительную часть институтов отраслевым министерствам. В итоге его реализации за два года АН СССР лишилась 92 институтов, в которых работала треть ее сотрудников. Реформирование такими методами не могло привести к успеху. Отметим, что в 2013 году эти негодные методы снова использовались для «реформирования» теперь уже Российской академии наук и снова не обошлось без ущерба для науки.

В соответствии с существовавшим тогда порядком во исполнение названного постановления ЦК КПСС и СМ СССР в декабре того же 1963 года было принято постановление Совета Министров УССР «О реорганизации научных учреждений Академии наук УССР». Восьмимесячное «отставание» (обычно на подготовку решения республиканского правительства отводилось около одного месяца) было связано с энергичной борьбой Б. Е. Патона за минимизацию ущерба для Академии – отстоять и не отдать институты. И ему это удалось, хотя пять учреждений все же пришлось передать в отраслевое подчинение.

Б. Е. Патон стремился сохранить научные коллективы в Академии совсем не потому, что был против их сближения с промышленным производством. Наоборот, именно на повышение эффективности работы ученых была направлена его деятельность и составляла суть тех перемен, которые он внес в работу Академии наук. Борис Евгеньевич прекрасно понимал, что при непосредственном подчинении министерствам институты часто ориентировались на решение множества мелких задач дня. А в Академии наук сложились наиболее благоприятные условия для проведения фундаментальных исследований – основы передовых научных знаний и на их основе – успешных прикладных исследований и разработок. Именно Б.Е. Патон внес понятие «целенаправленные фундаментальные исследования» и сформулировал их суть.

Он хорошо понимал проблему внедрения научных результатов из опыта работы Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР. Именно для этого там работали собственные специализированные конструкторско-технологические бюро (СКТБ) и даже опытные заводы, которые могли выпускать серии новых разработанных институтом изделий для последующего производства их промышленностью.

Стремление не отдавать институты технического профиля министерствам было обусловлено и тем, что Б. Е. Патон планировал использовать возможности министерств (а их возможности были существенными) для поддержки Академии. Именно в технических институтах были разработки, которые интересовали производителей. Но процесс освоения научных разработок в массовом производстве всегда был и остается не таким простым. Поэтому Борис Евгеньевич настойчиво рекомендовал директорам институтов Академии находить контакты и укреплять взаимодействие с заинтересованными министерствами, ведомствами и предприятиями, которые могли бы финансово поддерживать создание СКТБ и опытных производств (ОП) именно в академических институтах с возможностью доведения научных разработок до производственных стандартов. В результате число инженерно-технических работников в АН УССР стало расти значительно быстрее, чем число исследователей.

Также неотъемлемой чертой деятельности Б. Е. Патона на посту Президента Академии наук было выдвижение и всесторонняя поддержка выдающихся ученых во всех отраслях научного поиска и прежде всего в области фундаментальных исследований. Так, одним из первых примеров кадрового укрепления учеными-теоретиками был перевод большой группы физиков-теоретиков во главе с академиком АН УССР и АН СССР В.И. Трефиловым из Института металлофизики в Институт проблем материаловедения. В течение 60-х и в начале 70-х годов на лидирующие позиции в научных институтах и в президиум АН УССР выдвинуты известные ученые: математики – академик АН УССР и АН СССР В.М. Глушков, академик АН УССР и АН СССР А. В. Погорелов; физик – академик АН УССР А.С. Давыдов; физик-материаловед – академик АН УССР С.И. Пекар; материаловед – академик АН УССР И.К. Походня; химики – академики АН УССР А. В. Богатский, Ю. С. Липатов, К. Б. Яцимирский; физиолог – академик АН УССР и АН СССР П.Г. Костюк; языковед – академик АН УССР и АН СССР И. К. Белодед; философ – академик АН УССР П. В. Копнин и другие. Все это привело к значительному развитию прикладных исследований и позволяло институтам с опытно-производственной базой (ОПБ) обеспечивать полный цикл работ от целенаправленных фундаментальных исследований через прикладные исследования создавать опытные образцы или работающие модели и технологии.

Значительное внимание со стороны Б. Е. Патона уделялось представителям старшего поколения академических ученых (академики АН УССР и АН СССР математики и механики Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский, М. К. Янгель, академики АН УССР В.С. Будник, Г. С. Писаренко, специалист в области управления Г. В. Пухов, в области медицины и кибернетики Н. М. Амосов, биологи В. А. Белицер, С. М. Гершензон; физики А. Ф. Прихотько, А. Я. Усиков; геологи Н. П. Семененко, В. Г. Бондарчук, О. С. Вялов; химики А. В. Кирсанов, А. И. Бродский и другие), что обеспечило преемственность в научных исследованиях и создание новых научных школ.

Благодаря тщательному подбору руководящих научных кадров из талантливых ученых научные учреждения АН УССР в 70–80-х годах XX века стали широко известными в СССР и за его пределами как передовые центры в своих отраслях, обеспечив приоритет отечественной науки по многим направлениям естественных, технических и общественных наук. Приглашение Б. Е. Патоном

известных писателей и литературоведов М. П. Стельмаха и О. Т. Гончара в ряды Академии, а впоследствии поэта и литературоведа Б. И. Олейника вызвало положительный резонанс в обществе, способствовало развитию гуманитарных наук и всестороннему обсуждению вопросов научно-технического развития.

Согласно новому Уставу, принятому в июне 1963 г., АН УССР руководила не только академическими институтами, но и осуществляла также научное руководство и координацию научных исследований, которые проводились в научно-исследовательских институтах других ведомств и вузах республики, став, таким образом, ее высшим научным учреждением (по сути Министерством науки).

В Академии появилось новое научное направление – информатика. Ученые построили теорию интегрированных систем, что имеет большое значение для создания гибких автоматизированных производств. Был разработан базовый комплекс математических и технических средств робототехнических систем автоматизации технических процессов, отечественная технология программирования, которая по своим возможностям находится на уровне мировых достижений. Создан многопроцессорный комплекс с макроконвейерной организацией вычислений, производительность которого превышает 100 млн операций в секунду. Директору Института кибернетики, вице-президенту АН УССР В. М. Глушкову в 1969 г. было присвоено высокое звание Героя Социалистического Труда.

В Академии успешно развивались исследования по общей механике, механике твердого тела, жидкости и газа, геотехнической механике, термомеханике, теории машин и механизмов. Расширился фронт исследований актуальных проблем в разных разделах современной физики: физика низких температур, ядерная физика, радиофизика. Физика полупроводников, квантовая электроника, физика плазмы, а также астрономия и радиоастрономия. Результаты успешно использовались, в частности, в работе радиолокационных систем спутников Земли серии «Космос».

СССР был общепризнанной могучей космической державой. Подготовка и выполнение советской космической программы способствовали плодотворному сотрудничеству и взаимодействию ученых республик Советского Союза, целесообразному распределению научного труда в масштабах всей страны, теснейшей его кооперации, когда достижения отдельных научных учреждений и центров, объединение в необходимых случаях их усилий на Земле позволяли проводить в космосе уникальные эксперименты, в ходе которых были получены новые для науки данные, решены сложнейшие технические задачи.

Важные геофизические и гелиофизические исследования были выполнены во время проведения активных экспериментов в околоземном космосе с помощью изготовленного в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР инжектора электронов и установленного на ОКС «Салют-7» солнечного телескопа. В этих работах принимали также участие сотрудники Крымской астрофизической обсерватории АН СССР, Киевского государственного университета им. Т. Г. Шевченко.

Широкий резонанс в мире имел выполненный в 1984 г. космонавтами С. Е. Савицкой и В. А. Джанибековым в открытом космосе комплекс технологиче-

ских операций по электронно-лучевой сварке, резке, пайке и напылению с помощью универсального инструмента, созданного в Институте электросварки им. Е.О. Патона АН УССР.

Плодотворным было сотрудничество астрономов, имевших широкие возможности в части совместного использования уникальных научных комплексов – астрономических обсерваторий. Значительным и уникальным астрономическим событием 1980-х годов было появление кометы Галлея. Для ее изучения выполнялась международная программа наблюдений. Региональной частью этой программы была советская программа наземных наблюдений кометы Галлея (СОПРОГ), подготовленная Главной астрономической обсерваторией АН УССР.

Наиболее сложным из запланированных космических проектов был проект «Венера – комета Галлея», в котором наряду с СССР приняли участие и другие страны. В соответствии с этим проектом два космических аппарата «Вега-1» и «Вега-2» один за другим пролетели вблизи Венеры, оставив в ее атмосфере аэро-статные зонды, а на поверхности – спускаемые модули. Преодолев расстояние около 1 млрд км, аппараты встретились с кометой Галлея. По техническому заданию эта встреча должна была произойти на расстоянии 150 млн км от Земли и около 10 тыс. км от ядра кометы при относительной скорости встречи около 80 км/с. Для выполнения задания потребовалось объединить усилия многих обсерваторий мира по определению координат кометы Галлея и вычислению ее эфемериды. В СССР в этой работе приняли участие более 30 наблюдательных станций под руководством ГАО АН УССР в рамках программы СОПРОГ. Задание было выполнено: «Вега-1» и «Вега-2» пролетели вблизи ядра кометы на расстоянии соответственно 9 и 8 тыс. км.

Академия наук УССР стала общепризнанным центром в области материаловедения, а по таким его разделам, как электросварка и специальная электрометаллургия, порошковая металлургия, производство синтетических алмазов и инструмента из них, она занимает ведущее место в мире.

Значительное развитие приобрели в Академии исследования в области физико-технических проблем энергетики. Созданы линейная и нелинейная стохастические теории переноса, интегральный метод решения задач феноменологической теории тепломассообмена. В результате поисковых исследований созданы энергетические установки, оборудование, материалы, комплексы контрольно-измерительных приборов.

Важные результаты были достигнуты в области химических наук. Весомый вклад сделан учеными Академии в разработку фундаментальных проблем катализа, органического синтеза, химии высокомолекулярных соединений, электрохимии, неорганической химии, химии воды, горных ископаемых и других актуальных направлений современной химии.

Исследуются фундаментальные и прикладные проблемы физиологии, молекулярной биологии и генетики, общей биологии и т. д.

На основе своих достижений ученые академии создали и внедрили в производство несколько сотен технологий разного уровня и назначения. Они успешно используются на предприятиях черной металлургии, химической, судостроительной, авиационной, газовой, пищевой и других отраслей промышленности.

Следует сказать, что определенные результаты были достигнуты в прикладных вопросах гуманитарных и социальных наук. Ученые-экономисты изучали структуру и развитие промышленного и сельскохозяйственного производства, размещения производительных сил и ресурсов Украины, вопросы науковедения. Исследовались социально-экономические проблемы исторического прошлого, философские аспекты естествознания и научного познания мира, правовые вопросы государства, хозяйственного управления, конституционного строительства, международного права и языкознания.

Важно еще раз отметить, что динамика роста численности ученых в АН УССР мало отличалась от динамики их общей численности в научной сфере Украины. Однако число работающих в учреждениях Академии росло значительно быстрее. Это происходило за счет увеличения числа предприятий ОПБ. Так, в период 1960–1985 гг. численность ученых в институтах Академии выросла в 4,3 раза, а число работающих в ОПБ – в 196 раз. За период 1965–1976 гг. выпуск продукции хозрасчетных предприятий ОПБ увеличился почти в 10 раз. К 1985 году хозрасчетные предприятия включали 11 опытных заводов, 32 исследовательских и экспериментальных производств, 38 СКТБ, 5 вычислительных центров, 3 инженерных центра и 2 сейсмологические партии. Это было следствием новой стратегии развития Академии наук, проводимой Б.Е. Патонем.

Конечно, развитие ОПБ требовало значительных средств и именно научно-организационная стратегия Бориса Евгеньевича позволила привлечь необходимые средства заинтересованных в разработках Академии производственных предприятий, министерств и ведомств, так как бюджетные ассигнования не увеличивались настолько, чтобы обеспечивать динамичное развитие ОПБ и внедрение разработок институтов в практику.

В 1970-х годах финансирование Академии наук УССР из государственного бюджета увеличилось за 10 лет на 46 %. В то же время объем средств, полученных за счет хоздоговорной тематики, вырос за тот же период в 4 раза и в 1980 году сравнялся с бюджетными ассигнованиями. Таким образом, в конце 80-х годов АН УССР, благодаря научной политике Бориса Евгеньевича Патона, смогла удвоить средства на свое функционирование и развитие по сравнению с тем, что выделялось ей государством централизованно. Общее финансирование Академии за тот же период увеличилось в 2,4 раза. С 1980 года по 1986 год средства, полученные Академией от промышленности, даже превысили бюджетные ассигнования (в 1984 году на 18,3 %). К сожалению, эта тенденция была прервана негативными изменениями в экономике СССР, произошедшими во время так называемой «перестройки».

К началу 1986 года на предприятиях ОПБ Академия наук УССР работало почти 44 тысячи человек, что в 20 раз больше, чем в 1960 году, в 1991 году их численность превысила 54 тысячи. Предприятия ОПБ наращивали выпуск продукции, которая в основном возвращалась предприятиям-заказчикам, однако в значительной степени это способствовало возрастанию технологического уровня научных исследований. Общий объем выполненных работ в 1990 году превысил 300 млн руб., при этом 58,3 млн руб. составляла продукция для удовлетворения потребностей институтов АН УССР, таким образом, укреплялась материально-техническая база фундаментальных научных исследований в институтах Академии.

Необходимо также отметить, что увеличение числа предприятий ОПБ при институтах позволило ослабить кадровый застой при стабилизации численности ученых, так как значительная часть кадрового состава СКТБ формировалась за счет институтов. Много ученых переходили в СКТБ целыми научными отделами проводить доработку своих результатов и организовывать внедрение изделий и технологий производства. Таким образом создавалась возможность взять на освободившиеся места молодежь, обеспечив тем самым приток выпускников вузов в академические институты. При этом потенциал сотрудников, занимавшихся соответствующими разработками, фактически удваивался. Такая политика не приводила к ослаблению чисто исследовательской работы, а способствовала повышению квалификации научных кадров, о чем свидетельствует то, что при увеличении численности научных сотрудников более чем в 4 раза в период с 1960 года по 1985 год, доля докторов и кандидатов наук среди них возросла с 42,2 % до 61,7 %.

Количественный и качественный рост числа сотрудников АН УССР в период 60–80-х годов сопровождался масштабным капитальным строительством. Было введено в эксплуатацию почти миллион квадратных метров лабораторных площадей, академические институты во всех регионах Украины получили новые корпуса, в Киеве и Донецке были построены целые академгородки. При этом закупалось уникальное оборудование для экспериментальных исследований. Централизованных бюджетных средств для этого крайне не хватало. Как уже отмечалось главной особенностью развития АН УССР в сравнении с другими республиканскими академиями наук было привлечение средств предприятий министерств и ведомств заинтересованных в разработках ее институтов. Ежегодные капиталовложения промышленности всего Советского Союза в наращивание потенциала АН УССР возросли за период 70–80-х годов более чем в тридцать раз. При этом средства, предназначенные для строительно-монтажных работ, увеличились почти в 50 раз.

Усилиями Бориса Евгеньевича на базе ведущих институтов АН УССР были созданы и успешно функционируют до сих пор научно-технические комплексы (НТК) и межотраслевые НТК – послужившие прообразом технопарков, созданных в 90-е годы и позднее. Такие объединения выполняли в сжатые сроки и при высокой степени распределения труда полный цикл работ от научной идеи до промышленного освоения новой техники и технологий.

На базе научных достижений Академии наук были получены выдающиеся результаты для развития традиционных отраслей промышленности, созданы новые отрасли, в которых нашли применение много технологических процессов, оборудования, материалов, систем автоматизации и других разработок ученых, многие из которых в то время не имели аналогов мире.

Есть все основания утверждать, что выбранный Борисом Евгеньевичем Патоном путь развития Академии наук УССР оказался правильным и оптимальным. Его роль была решающей в поисках ответов на вызовы времени, а его заслуга состояла в том, что он ощущал и видел эти вызовы и своевременно организовывал адекватную реакцию на них.

После развала СССР деятельность Академии: с 1992 г. Академии наук Украины (АН Украины), с 1994 г. Национальной Академии наук Украины (НАН

Украины) проходит в условиях тяжелого перманентного экономического кризиса, который охватил страну. Кризисные явления в экономике, политике, социальной сфере, экологии обусловили значительный спад темпов научно-технического прогресса. Институты и научные коллективы ощутили растущую невосприимчивость производства и общества в целом к научным разработкам.

Резкое ухудшение условий для творческого труда и уровня жизни ученых не способствовали научному поиску и привело к значительным кадровым потерям, так называемой «утечке умов», особенно из числа молодых и перспективных ученых.

В научно-технической сфере и, естественно в Академии обострились старые и появились новые негативные тенденции. Снизился общий уровень фундаментальных исследований, подготовки научных и инженерно-технических кадров. Катастрофически ухудшилось обеспечение научных организаций приборами, реактивами и препаратами, уменьшились объемы поступления научно-технической информации, иностранной периодики и монографий. Стало чрезвычайно убыточным проведение научных конференций и издание научных трудов.

Вследствие объективных причин, обусловленных общими тенденциями экономического спада, в том числе значительного снижения заказов оборонно-промышленного комплекса, опытно-производственная база (ОПБ) Академии претерпела кардинальные изменения количественного и качественного характера. В частности, количество предприятий и организаций ОПБ сократилось более чем наполовину, среднее значение износа основных фондов превысило 70 %. Оставшиеся предприятия и организации ОПБ находятся в критическом финансовом положении. А ведь именно созданная Б. Е. Патонам ОПБ в свое время способствовала оптимальному сочетанию фундаментальных и прикладных исследований, дала возможность создавать современные условия экспериментов, доводить полученные результаты до высокой степени завершенности, проводить всестороннюю апробацию разработок, передаваемых промышленности.

Что касается средств, выделяемых государством на централизованное приобретение научного оборудования, то в целом они сократились в десятки раз. Отсутствие должного финансирования привело к тому, что практически 85 % научного оборудования и приборов, на которых ведутся фундаментальные исследования, исчерпали свой ресурс или же морально устарели.

Важным событием для Академии и в целом для украинской науки было принятие Верховным Советом Украины Закона «О научной и научно-технической деятельности». К сожалению, в части финансирования закон еще ни разу не выполнялся, выделяемые объемы бюджетных ассигнований были раз в пять меньшими.

Имеющийся в Украине научно-технологический потенциал, весомой составляющей которого является Академия, несмотря на все понесенные в эти годы потери, при соответствующем финансировании мог бы обеспечить инновационное развитие многих современных направлений производства и экономики в целом.

Однако, несмотря на большие трудности, благодаря высокому авторитету Бориса Евгеньевича Патона в мировой научной сфере и в органах государственной власти Украины и его титанической работе, ученые Академии наук Украины

продолжали достаточно плодотворно работать. Можно назвать много факторов, определивших устойчивость и живучесть Академии. К их числу, несомненно, следует отнести самоотверженный труд ученых, беззаветно преданных науке, накопленный в предыдущие десятилетия, так сказать, запас прочности, составляющими которого стали сложившиеся академические традиции, сильные научные коллективы и школы, обширные и тесные связи со многими отраслями народного хозяйства, значительный опыт внедрения научных достижений в практику, результативное взаимодействие с высшей школой, плодотворное межакадемическое сотрудничество. Значительное место в работе Академии стала занимать внешнеэкономическая деятельность организаций, внешнеторговых фирм, совместных предприятий, учредителями которых стали академические институты.

Конечно, говорить о перспективах НАН Украины в нынешних условиях глубокого и всеобъемлющего кризиса в стране, охваченной гражданским конфликтом, как никогда трудно. В эшелонах власти представлены в своем большинстве люди, которые мало знакомы с наукой, ее спецификой и не понимают ее уникальную роль в жизни общества и государства, ее особенно важное значение в кризисные периоды, как инструмента, обеспечивающего, при правильном обращении, выход из кризисных ситуаций.

Однако можно утверждать, что Национальная академия наук Украины остается самой мощной и продуктивной научной организацией страны. Этот вывод является объективным, поскольку основывается на достоверных статистических данных (включая библиометрические) и экспертных оценках, в том числе зарубежных.

Необходимо отметить, что благодаря усилиям Б. Е. Патона и его коллег в руководстве Национальной академии наук Украины, в сложившейся непростой ситуации Академия не пошла по бесперспективному пути сиюминутного выживания, а конкретными делами стремилась показать властным структурам свою полезность, значимость науки, прежде всего фундаментальной, в жизни современного общества, активно участвуя целенаправленными фундаментальными и прикладными исследованиями в выполнении государственных программ. Надо отдать должное и помощи международного научного сообщества, несмотря на то, что научные и производственные связи академических учреждений СНГ рвались, ученым становились недоступны общие банки научных данных, уникальное научное оборудование и исследовательские комплексы, созданные совместными усилиями.

3. Высокий уровень кооперации научных исследований в СССР позволял ученым и инженерам занимать передовые рубежи в науке и технике, что принесло ряд выдающихся достижений и открытий, позволяло решать актуальные задачи в жизнедеятельности государства и общества. Академия наук СССР всемерно содействовала созданию академий наук в других союзных республиках по мере развития производительных сил в регионах и необходимости углубленных знаний специфических местных условий. К 1961 году академии наук были во всех союзных республиках и сотрудничество между ними развивалось, в основном, на основе двусторонних договоров, что несомненно способствовало бурному развитию науки в стране.

Страны, входившие в состав СССР (в том числе вошедшие в состав созданного на его месте СНГ), взявшие курс на развитие капиталистического экономического уклада, стали терять привычную в прошлом устойчивую финансовую поддержку государством культурной, научной и образовательной сферы. Самоокупаемость и выжимание прибыли любой ценой из всех сфер деятельности становилось приоритетом и главным смыслом любого начинания, в том числе и творческого процесса в науке. В новых условиях речь шла уже не столько о развитии науки и даже не о сохранении ее, а о спасении науки. Руководство большинства академий наук республик, входивших в состав СССР, пришло к единому мнению, что главная роль в сохранении и развитии научного потенциала будет принадлежать общественным творческим объединениям ученых разных стран и научным структурам на их основе, для которых интеллектуальная деятельность и творческая научная мысль являются смыслом их существования. Это ускорило процесс создания и юридического оформления Международной ассоциации академий наук. Ученые, как это и должно быть, были впереди прогрессивного начинания, значительно опередив экономические и политические интеграционные процессы, всегда противостояли центробежным силам.

В то же время, как это нередко бывало в истории, огромную роль в событиях тех лет сыграла выдающаяся личность. Такой личностью тогда стал Б. Е. Патон, который инициировал и поддерживал интеграционные процессы в научной сфере, а затем почти четверть века с момента создания возглавлял Международную ассоциацию академий наук (МААН).

Особая роль принадлежит Б.Е. Патону на этапе создания Ассоциации, подготовки к проведению учредительного собрания МААН, который охватывает период с сентября 1991 года по сентябрь 1993 года.

Идея объединения усилий в работе академий наук тогда еще союзных республик была высказана Б. Е. Патоном еще в сентябре 1991 года, после выхода некоторых республик из состава СССР. Идея была поддержана академиком Г.И. Марчуком, в то время Президентом АН СССР, затем президентами академий наук союзных республик, кроме прибалтийских. Руководство академий наук этих республик ссылалось на то, что после отделения от СССР в сентябре 1991 года, парламенты стран приняли закон, запрещающий вхождение своих организаций в любые, как они говорили, «постсоветские структуры». К этому времени стало уже очевидным, что тогдашнее руководство СССР и некоторых союзных республик ведет государство к краху.

В этой тяжелой и неопределенной для будущего страны ситуации Б. Е. Патон проявил мудрость, большой дипломатический талант и настойчивость. Конечно, ученые понимали, что необходимо противостоять центробежным силам, найти адекватную сложившемуся положению организационную форму дальнейшего сотрудничества, которая позволила бы эффективно использовать совместный интеллектуальный потенциал. В октябре 1991 года по инициативе Б. Е. Патона и Г. И. Марчука решением Совета президентов академий наук союзных республик была создана рабочая группа по подготовке этого вопроса в составе: Б. Е. Патон – председатель, Н. П. Лаверов (вице-президент АН СССР), В. П. Платонов (президент АН БССР), Э. Ю. Салаев (президент АН АзССР), М. С. Салахитдинов (президент АН УзССР), У. М. Султангазин (президент АН КазССР),

которая уже в ноябре на заседании в Киеве разработала принципы создания и деятельности Ассоциации.

В Президиуме АН Украины был подготовлен первый вариант Положения об Ассоциации и представлен на заседании Совета президентов академий наук, а затем рассматривался в самих академиях наук. Высказанные пожелания сводились к тому, чтобы Ассоциация не стала управленческой надстройкой над академиями наук. Вместе с тем подчеркивалась необходимость возможного участия ученых академий наук не только стран СНГ. На очередном заседании рабочей группы в марте 1992 года был одобрен проект Положения о Международной ассоциации академий наук и достигнута договоренность о возможном подписании Соглашения о ее создании еще в 1992 году. Проект положения был разослан в академии наук республик входивших в состав СССР. Не поступила информация только от академий наук Латвии, Литвы и Эстонии.

По инициативе Б.Е. Патона, в сентябре–октябре 1992 года были снова проведены консультации с руководством этих академий наук, при этом, с их стороны высказывалась заинтересованность в сохранении научных связей. По их просьбе был дополнительно выслан проект положения о МААН и подчеркивалось, что в проекте обеспечено равноправие всех академий наук и демократичность управления Ассоциацией. Так, в проекте предусматривалось принятие решений только на основе консенсуса, а также ежегодное избрание президентом МААН одного из президентов академий наук – членов МААН. После этого поступили сообщения о том, что, к сожалению, в силу упомянутых выше причин эти академии не могут стать учредителями МААН, но руководство академий не будет препятствовать участию в работе МААН своих ученых и готово к сотрудничеству с ней.

В январе 1993 года Президиумом Российской АН была предложена комиссия в составе академиков В. Н. Кудрявцева, А. Ф. Андреева, Г. И. Марчука, И. М. Макарова, Б. Е. Патона и чл.-кор. РАН В.И. Медведева для доработки проекта Положения о МААН. С учетом замечаний, высказанных Президиумом РАН, и предложений всех заинтересованных академий наук проект Положения о МААН был доработан в Президиуме АН Украины и получил поддержку всех академий наук, желавших стать членами Ассоциации.

Хотелось бы обратить внимание на огромную, можно сказать, титаническую работу Б. Е. Патона – вдохновителя и организатора создания МААН. Ему удалось создать добрую, товарищескую, ориентированную на позитивный устраивающий всех участников соглашения результат атмосферу в период неформального обсуждения вопросов, имевших отношение к созданию Ассоциации. Уже одно перечисление упомянутых выше мероприятий свидетельствует об особой тщательности, взвешенности, ответственности и разумном консерватизме, проявленных Борисом Евгеньевичем и его коллегами (часть из которых названа выше) на этом важнейшем этапе. Несомненно, влиял и большой авторитет Б.Е. Патона как выдающегося ученого и организатора науки.

Учредительное собрание МААН состоялось в Киеве в Институте теоретической физики АН Украины 23 сентября 1993 года, на котором руководители национальных академий наук 15 стран Европы и Азии подписали Соглашение о создании Международной ассоциации академий наук и утвердили Положение о

МААН. Членами Ассоциации стали академии наук двенадцати бывших союзных Республик: Азербайджана, Армении, Беларуси, Грузии, Казахстана, Кыргызстана, Молдовы, России, Таджикистана, Туркменистана, Узбекистана и Украины, а также АН Вьетнама, Словацкой АН и АН Чешской республики (две последние в качестве наблюдателей). Президентом Ассоциации единогласно был избран Б. Е. Патон.

Назовем соратников и единомышленников Б.Е. Патона, президентов перечисленных академий наук (в том же порядке), внесших свой вклад в создание МААН: Э. Ю. Салаев, Ф. Т. Саркисян, Л. М. Сущеня, А. Н. Тавхелидзе, У. М. Султангазин, И. Т. Айтматов, А. М. Андриеш, Ю. С. Осипов, С. Х. Нигматуллаев, А. М. Ходжамамедов, М. С. Салахитдинов, Нгуен Ван Хиеу, Б. Лихардус, Р. Заградник.

Почетными иностранными гостями учредительного собрания были: президент Академии Европы Арнольд Берджен, исполнительный секретарь Академии наук Третьего Мира Мохамед Хассан.

Академик Б.Е. Патон избирался ежегодно и бессменно президентом МААН, затем Совет Ассоциации внес изменения в Положение, и президент МААН стал избираться на 5 лет.

В Положении о МААН ее статус и основные принципы деятельности сформулированы следующим образом: МААН – это международная неправительственная организация, созданная с целью объединения усилий академии наук в решении на многосторонней основе важнейших научных проблем, в сохранении исторически сложившихся и развитии новых творческих связей между учеными. Высшим органом МААН является Совет, в состав которого входят президенты академий наук и руководители других полноправных членов МААН или делегируемые ими лица (сейчас в составе Ассоциации 21 полноправный член). Решения Совета принимаются, как правило, консенсусом и носят рекомендательный характер для академий наук – членов МААН.

В 1996 году решением Совета МААН был образован институт ассоциированных членов с целью привлечения к работе в МААН признанных в мире научных центров, фондов, ведущих вузов и других юридических лиц, занимающихся инновациями и тесно связанных с научной сферой. Сейчас в МААН насчитывается 5 ассоциированных членов.

Результативной является деятельность МААН в укреплении сотрудничества между учеными академий наук с использованием хорошо зарекомендовавшей себя еще в СССР организационной формы – научный совет. В 1995 году был создан и активно работает при МААН научный совет по новым материалам (председатель – академик Б. Е. Патон). Сегодня при МААН работает 24 научных совета.

В январе 1998 года вышел первый номер международного научного и общественно-политического журнала «Общество и экономика» с обращением Б. Е. Патона «К читателям журнала «Общество и экономика». Журнал издается ежемесячно под эгидой МААН и выпускает в свет серию библиотеки журнала. В разные годы со страниц журнала к читателям обращались президенты Армении, Беларуси, Вьетнама, Грузии, Киргизстана, Молдовы, России, Украины, Премьер Госсовета КНР, Премьер-министр Армении.

Важно, что Б. Е. Патон как президент МААН всегда стремился установить конструктивный диалог с руководством и государственными структурами стран, чьи академии наук являются членами Ассоциации. Этому служили состоявшиеся встречи членов Совета МААН с президентами Украины, Беларуси, Грузии, Казахстана, Кыргызстана и Таджикистана. Такие встречи позволяли привлечь внимание первых лиц государств к проблемам сферы науки и предлагать пути их решения с учетом накопленного опыта. Инициативы Б.Е. Патона по развитию научного сотрудничества рассматривались на заседаниях Совета глав государств и глав правительств – участников СНГ, по ним принимали соответствующие решения.

Борис Евгеньевич очень переживал из-за негативных явлений возникавших в академиях наук, – членах МААН и в научной сфере этих государств в целом. Он старался информировать государственные структуры о коллективном мнении ученых академий наук и Ассоциации. С этой целью направлялись обращения совета МААН и письма Президента МААН в адрес глав государств, правительств, парламентов отдельных стран по актуальным проблемам жизнедеятельности академий наук.

Так, в 2012 году Б. Е. Патон направил соответствующие письма президентам, премьер-министрам и председателям парламентов Республики Болгария и Республики Молдова в связи с резким уменьшением финансирования БАН и АН Молдовы и науки этих стран в целом со стороны государства. Были также планы ликвидации БАН, имеющей полуторавековую историю. Усилия международной научной общественности оказались не напрасными. К сожалению, не всегда власти прислушивались к авторитетному голосу международного научного сообщества. Об этом свидетельствует печальный опыт академий наук Грузии и Казахстана, из состава которых были выведены научные учреждения, а теперь с трудом пытаются их восстановить, а также опыт России, где чрезмерными полномочиями наделили Федеральное агентство научных организаций, созданное в результате реформы 2013 года. Через пять лет оно было ликвидировано и ситуация в научной среде стала улучшаться.

МААН безусловно состоялась как авторитетная международная организация. Она получила признание ЮНЕСКО: в 2003 году на сессии Исполнительного совета ЮНЕСКО в Париже было принято решение о включении МААН в число организаций, с которыми ЮНЕСКО поддерживает рабочие отношения, а в 2012 году эти отношения были переклассифицированы в статус консультативного партнерства. Оба статуса относятся к высшей для ЮНЕСКО категории взаимоотношений. Можно сказать, что МААН это неординарный механизм международного научного сотрудничества, созданного национальными академиями наук, достойный того, чтобы его беречь и совершенствовать.

Основополагающий вклад в успешную деятельность МААН несомненно принадлежит Б. Е. Патону – инициатору ее создания и идеологу ее динамического развития. Иначе и не могло быть, ведь МААН – это, по сути, детище Б. Е. Патона.

В сентябре 2016 года на заседании Совета Ассоциации в Минске было зачитано письменное обращение Б. Е. Патона к членам Совета не рассматривать его кандидатуру для избрания на следующий пятилетний срок. Все члены Совета МААН выступили со словами благодарности в адрес Б. Е. Патона, отметив его колоссальные заслуги в создании и успешной работе МААН. В 2017 году состоялась передача руководства Международной ассоциацией академий наук Пред-

седателю Президиума НАН Беларуси академику В.Г. Гусакову, избранному руководителем МААН. Б. Е. Патон стал Почетным руководителем МААН. В 2018 году Совет МААН учредил Премию имени Б.Е. Патона. 19 августа 2020 года Борис Евгеньевич Патон скончался на 102 году жизни.

Следует отметить еще раз, что именно ученые, вдохновляемые Б. Е. Патон, первые проявили дальновидность – инициировав создание МААН они сохранили интеграцию в научной сфере, что способствовало дальнейшему развитию всех членов, вошедших в Ассоциацию, и мировой науки в целом. В этом ученые опередили политиков и продолжают подавать пример успешной деятельности благодаря интеграции усилий ученых разных стран.

4. Вместо послесловия приведу слова, сказанные мной в беседе с журналистом, многолетним корреспондентом журнала «Наука и жизнь» на Украине, писателем, автором ряда книг о науке Викторией Семеновной Галузинской. В начале 2000-х годов Виктория Семеновна задумала написать книгу о Б. Е. Патоне и собирала материалы, беседуя со многими людьми, которые знали его. Пришла она как-то и ко мне с микрофоном. Вот как сложилась наша беседа¹:

«Другим моим собеседником оказался народный депутат Украины, ученый Олег Алексеевич Грачев, который работал вместе с Патонем.

– Говорить о Борисе Евгеньевиче как будто легко, потому что он – выдающаяся личность. Мы с детства знали эту фамилию, а потом я все ближе и ближе оказывался к Борису Евгеньевичу в силу специфики работы. В то же время говорить об этом человеке очень сложно, потому что, с одной стороны, он – сын выдающегося отца, а с другой – сам явление неординарное, можно сказать, редкий случай, феномен. Говорят, на детях выдающихся людей природа отдыхает, но здесь мы видим ситуацию обратную – по результатам своей деятельности Борис Евгеньевич оказался человеком даже более знаменитым, чем его отец. При чем он одинаково известен как, скажем, ученый нашей страны, и, может быть, даже всего мира, так и рабочий, к примеру, опытного производства Института электросварки. Для любой аудитории он найдет слова, вызывающие отклик у присутствующих людей.

Можно строить много догадок о причинах формирования такого выдающегося человека, каким является Борис Евгеньевич Патон, но до конца этот феномен мы не поймем. Разобраться в этом непросто, и это может быть предметом изучения не одного поколения историков науки – и наших современников, и тех, кто будет после нас.

Обращает на себя внимание и умение Бориса Евгеньевича работать с властью. С той, которая была, при которой и сам Борис Евгеньевич, и Академия, и ИЭС добились огромных успехов и в науке, и в практике. С властью нынешней, которая недопонимает, по-моему, роль и значение науки в жизни государства, полагаясь на суждения узконационально ориентированной публики, которая, взяв за основу западные модели устройства государства, советует механически переносить их на нашу почву. Секрет умения Бориса Евгеньевича сотрудничать с властью, без чего наука Украины просто погибла бы, я вижу в его происхождении, в глубокой традиции дворянской семьи, во многих поколениях послужив-

¹ Беседа воспроизводится по книге: Галузинская В.С. Феномен Патона. Портрет в интерьере двух столетий. – Киев: Наукова думка, 2010. С. 250–251. Кстати, издательство выразило благодарность Посольству Российской Федерации за содействие в издании этой книги.

шей на благо Отечества. Иной раз Бориса Евгеньевича упрекают, скажем, в отсутствии жесткой позиции по отношению к нынешней власти, когда речь идет о проблемах развития государства, в частности, сферы науки. Но ответственность, которая лежит на этом человеке не только за свой институт, но и за научно-технологический и интеллектуальный потенциал Украины, заставляет его идти на некоторые компромиссы, что, скорее всего, оправдано.

Остается лишь добавить, что Борис Патон – человек, который в годы нашего аляповатого псевдокапитализма не позволил, скажем так, растащить Академию наук Украины.

Это ученый, создавший технологии, на основе которых работают самые «лакомые» объекты украинской приватизации. Например, Харцызский трубный завод, «Азовсталь» в Мариуполе, металлургические комбинаты Днепропетровска и Запорожья. Это исследователь, обеспечивший технологиями сварку в космосе. Его труды меняли и меняют лицо мира, в котором мы живем.

Сорок лет руководства Академией наук Украины – небывалый срок. Такого не знает история мировой науки. А в нашей истории – это одиночество ответственности и ответственность власти длиной в четыре десятка лет.

Да, это именно так, не взирая на то, что Борис Евгеньевич всегда в кругу коллег, учеников и соратников. Он не просто признает, но даже культивирует коллективизм в науке, ежедневно собирая у себя совещания, где идет процесс принятия важнейших для государства решений».

В заключении отметим, что Борис Евгеньевич Патон – всемирно известный ученый в области металлургии, электросварки и технологии металлов, выдающийся организатор науки, государственный и общественный деятель, неоднократно избирался в Верховные советы СССР и УССР. Академик НАН Украины (с 1958 г.), с 1962 г. академик Академии наук СССР, с 1992 г. академик Российской академии наук, действительный член ряда других зарубежных академий наук. Дважды Герой Социалистического труда (1969, 1978), первый Герой Украины (1988), Лауреат Ленинской премии (1957), Лауреат Сталинской (Государственной) премии СССР (1950), Лауреат международной премии «Глобальная энергия» (2010), Лауреат двух Государственных премий Украины (1970, 2004), удостоен высшей награды Академии наук СССР – Большой золотой медали им. М. В. Ломоносова (1980) и высшей награды Национальной академии наук Украины – Золотой медали им. В. И. Вернадского (2003).

УДК 621.9.025.7

ПРОГРАММА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ АЛМАЗНОМ ТОЧЕНИИ

Левданский А. М.

Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

В процессе изучения сил резания, возникающих при тонком алмазном точении возникла проблема с их определением и моделированием в связи с малостью их значений и большой долей шумов, влияющих на точность получаемых результатов.

В справочниках используемых для расчета сил резания аналитическим методом не рассмотрено алмазное точение цветных сплавов [1].

В этой связи возникла необходимость в разработке собственной программы.

Программа была разработана с целью автоматизации расчетов сил возникающих при тонком точении цветных сплавов (медно-цинковый, медно-никелево-цинковый, алюминиево-магниево-кремневый сплавы), на базе которых проводились исследования. Программа может быть использована в учебном процессе при моделировании сил резания, возникающих при алмазном точении, и при последующем расчете потребных размеров державочной части.

Внешний вид программы

Программа предусматривает работу через ввод данных и через вызов формы. Внешний вид программы и её основные вкладки при работе через вызов формы представлен на рисунках ниже.

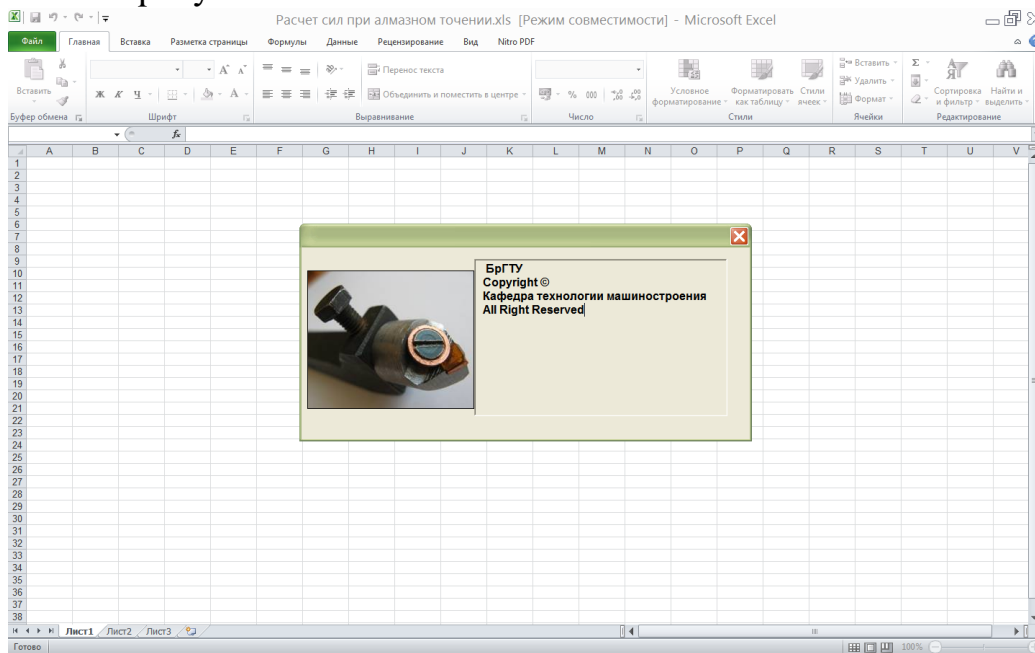


Рисунок 1 – Вид программы при запуске



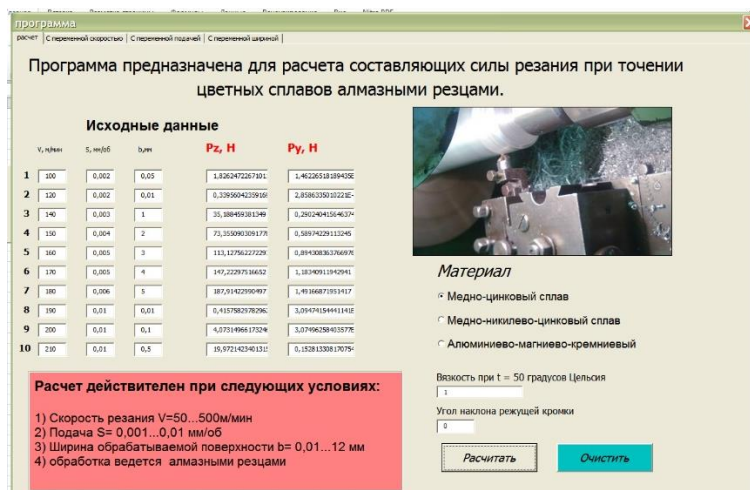


Рисунок 2 – Вкладка «расчет»

Вкладка «расчет» позволяет рассчитать значения основных составляющих силы резания P_x и P_y при переменных значениях скорости, подачи и ширины обработки в указанных на вкладке пределах для перечисленных материалов при заданных значениях вязкости масла (оптимальна 10–20 см) и угла наклона режущей кромки.

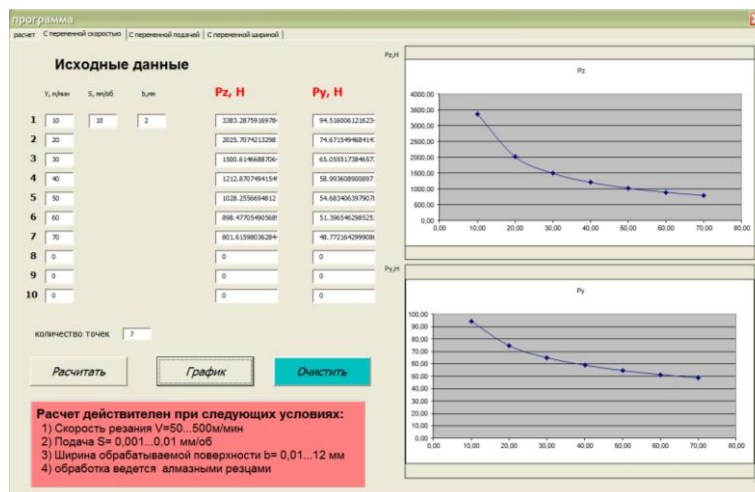


Рисунок 3 – Вкладка «с переменной скоростью»

Вкладка «с переменной скоростью» позволяет варьировать значение скорости главного движения при фиксированных значениях остальных составляющих режимов обработки. Вкладка позволяет строить графики зависимости сил резания по составляющим P_z , P_y от величины скорости главного движения.

Также имеются вкладки «с переменной подачей», «с переменной шириной». Программа представляет конечные расчеты сил резания по составляющим P_z , P_y и строит графики зависимости этих составляющих от скорости резания, подачи и ширины.

Программа расчета составляющих силы резания была составлена в Visual Basic. Алгоритм расчета строится на эмпирических формулах полученных экспериментальным путем [2]:

$$P_z = 9,8 \cdot \frac{C_z \cdot s^{Z_s} \cdot b}{V^{Z_v}} \cdot K_{\lambda_z} K_{c_{m_z}}; \quad (1.1)$$

$$P_y = 9,8 \cdot \frac{C_y \cdot s^{Y_s} \cdot b}{V^{Y_v}} \cdot K_{\lambda_y} K_{c_{m_y}}; \quad (1.2)$$

где P_z , P_y – составляющие сил резания в Н,
 V – скорость резания в м/мин.;

S – подача (толщина среза) в мм/об.;

b – ширина обрабатываемой поверхности (глубина резания) в мм.

Значение коэффициентов и показателей степеней в формулах были определены экспериментальным путем [2].

Основные блок-схемы программы представлены на рисунках 4, 5.

Блок-схемы программы расчета сил резания при алмазном точении

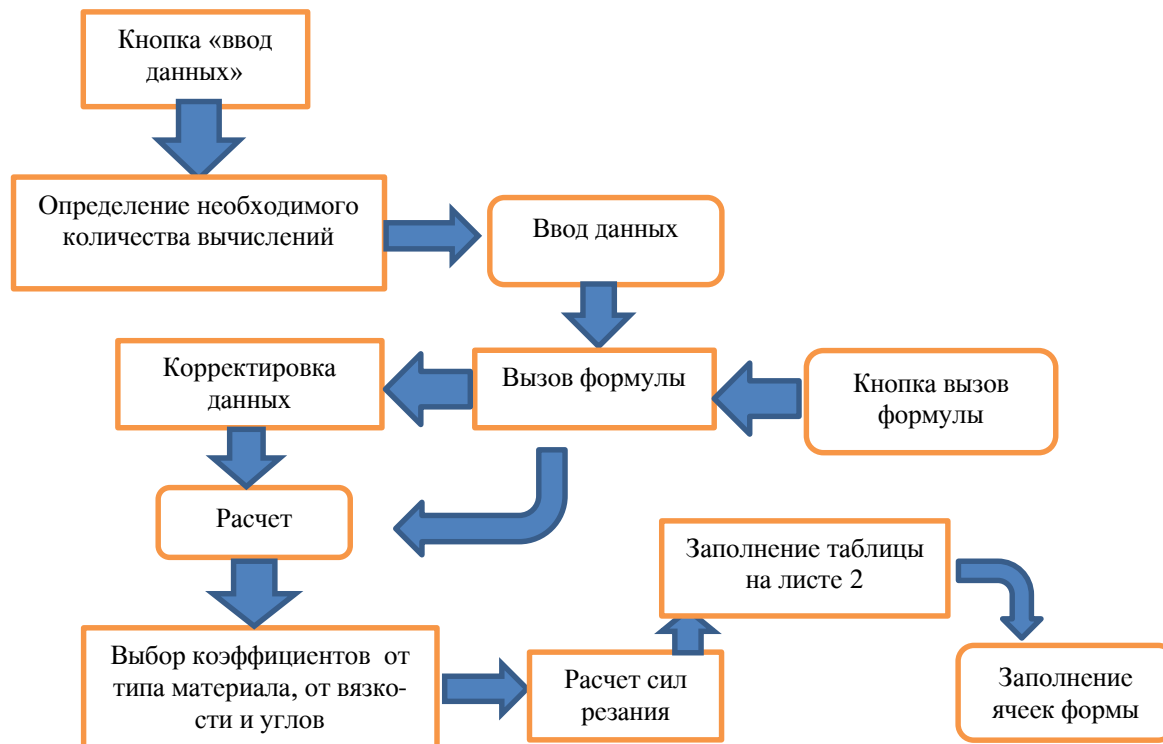


Рисунок 4 – Направление работы программы от кнопки «ввод данных» до заполнения ячеек формы



Рисунок 5 – Направление работы программы от кнопки «график» до вставки графика в форму (схема слева) и от кнопки «очистить» до очистки содержимого страниц «лист 2»

Выводы. Разработана программа расчета составляющих силы резания при алмазном точении, позволяющая моделировать различные условия обработки, что необходимо для расчета конструктивных элементов резца. При использовании программы в рамках учебного процесса студенты получают возможность наглядно и самостоятельно отслеживать силы при чистовой обработке различных сплавов с переменными значениями составляющих режимов резания и геометрии инструмента. Знание максимально возможных составляющих сил резания позволит им более правильно рассчитывать конструкции резцов. Это дает возможность более грамотного назначения режимов резания при чистовой алмазной обработке.

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Левданский, А. М. Обработка резцом с механическим креплением вставки из искусственного алмаза алюминиево-магниево-кремниевых сплавов / А. М. Левданский, С. А. Левданский // Вестник БрГТУ. – 2013. № 4 (82): Машиностроение. – С. 24
2. Круглов, Г. А. Алмазная обработка часовых деталей / Г. А. Круглов, И. К. Тарасевич. – М. : «Приборостроение», 1961.

УДК621.91.002

ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА НЕПОДВИЖНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Медведев О. А., Апанович А. Ю. Мартынов Д. В.

Брестский государственный технический университет, г. Брест,
Республика Беларусь

В условиях серийного производства машин достижение точности замыкающих звеньев длинных сборочных конструкторских размерных цепей методами полной или неполной взаимозаменяемости часто экономически неприемлемо из-за необходимости высокой точности составляющих звеньев. В таких условиях попадание замыкающего звена в пределы его малого допуска обеспечивается целенаправленным регулированием значения одного из составляющих звеньев – компенсатора. В случае использования наиболее простого неподвижного компенсатора, его размер регулируется ступенчато, путем выбора компенсатора из заранее изготовленного комплекта. Используя компенсатор определенного размера можно за счет допуска замыкающего звена компенсировать часть суммарного поля рассеяния других составляющих звеньев, равную (в идеале) этому допуску. Используя второй компенсатор, который больше первого на величину допуска замыкающего звена, можно компенсировать еще такую же часть общего поля рассеяния составляющих звеньев, примыкающую к первой, и так далее. В идеале степень компенсации (разность размеров соседних компенсаторов в комплекте) равна допуску замыкающего звена, а число компенсаторов в комплекте на одно изделие равно отношению суммарного поля рассеяния составляющих звеньев (величины компенсации) к допуску замыкающего звена. В

действительности ступень компенсации должна быть меньше из-за наличия погрешностей определения требуемого размера компенсатора и его изготовления.

Размер компенсатора, для конкретного экземпляра изделия обычно определяется измерением полости под компенсатор, сформированной при предварительной сборке части изделия, включающей детали, размеры которых являются составляющими звеньями рассматриваемой конструкторской сборочной размерной цепи. При этом на место замыкающего звена устанавливается его эталон, а компенсатор в изделие не устанавливается. Если размеры выбранного компенсатора и полости для него будут равны, то при окончательной сборке экземпляра изделия без эталона и с выбранным компенсатором замыкающее звено будет равно размеру эталона.

При использовании компенсатора устраняется прямая зависимость отклонения замыкающего звена от отклонений составляющих звеньев сборочной конструкторской размерной цепи, но возникает его зависимость от погрешностей изготовления компенсатора и выполнения сборочных работ, при малости которых можно получать высокую точность замыкающего звена при невысокой точности остальных звеньев цепи.

Установить взаимосвязь между предельными значениями замыкающего звена, составляющих звеньев, компенсатора, погрешностями сборочных работ можно на основе наглядной, компактной и рациональной схемы компенсации допусков составляющих звеньев, которую возможно построить на основе сборочной конструкторской размерной цепи, выявленной по сборочному чертежу изделия. Для сокращения числа элементов схемы компенсации (с целью повышения ее наглядности) в ней все составляющие звенья (кроме компенсатора) целесообразно заменить суммарным составляющим звеном A_{Σ} , оказывающим равноценное влияние на замыкающее звено, и равное алгебраической сумме всех увеличивающих и уменьшающих составляющих звеньев реальной цепи (кроме компенсатора).

Рассматривая суммарное составляющее звено как случайную величину, являющуюся суммой большого числа слагаемых случайных величин, можно считать, что его значения подчиняются нормальному закону распределения в пределах его поля рассеяния $TA_{\Sigma} = 6\sigma_{\Sigma}$ [1, 3]. Поле рассеяния TA_{Σ} (величина компенсации) можно определить по правилу сложения случайных величин [1,3] как сумму полей рассеяния составляющих звеньев (кроме компенсатора).

$$\Delta A_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{j=1}^{j=m+n} TA_j^2} \quad (1)$$

Замена составляющих звеньев на суммарное составляющее звено позволяет преобразовать любую реальную сборочную конструкторскую размерную цепь на математически равноценную трехзвенную цепь, состоящую из суммарного составляющего звена A_{Σ} , компенсатора K и замыкающего звена A_{Δ} .

Тщательный анализ влияния компенсаторов на замыкающие звенья линейных сборочных конструкторских размерных цепей для машин разного назначения позволяет свести все многообразие реальных сборочных конструкторских

цепей к трем вариантам математически равноценных трехзвенных цепей, характеризующихся следующим сочетанием составляющих звеньев: 1) увеличивающее суммарное составляющее звено и увеличивающий компенсатор ($\vec{A}_\Sigma \dot{\epsilon} \vec{E}$); 2) увеличивающее суммарное составляющее звено и уменьшающий компенсатор ($\vec{A}_\Sigma \dot{\epsilon} \vec{E}$); 3) уменьшающее суммарное составляющее звено и увеличивающий компенсатор ($\vec{A}_\Sigma \dot{\epsilon} \vec{E}$). Сочетание уменьшающего суммарного составляющего звена и уменьшающего компенсатора ($\vec{A}_\Sigma \dot{\epsilon} \vec{E}$) в трехзвенных размерных цепях невозможно.

На основе этих трех вариантов трехзвенных цепей разработаны три типовые схемы компенсации TA_Σ .

Рассмотрим построение схемы компенсации для второго варианта трехзвенной цепи, так как такое сочетание довольно часто встречается в конструкциях машин. Для этого каждое звено такой трехзвенной цепи представим двумя его предельными размерами и полем рассеяния.

Для увязки полей рассеяния погрешностей сборочных работ, размеров технологической сборочной оснастки, размеров компенсаторов с полем допуска замыкающего звена TA_Δ , в схему компенсации включены элементы технологической размерной цепи, формирующейся при предварительной сборке изделия. Замыкающим звеном в ней является размер выбранного компенсатора, а составляющими звеньями, кроме размеров деталей изделия, также являются размеры используемой сборочной оснастки (эталона замыкающего звена конструкторской цепи) и погрешности выполнения сборочных работ. Таким образом, отклонение замыкающего звена от его эталонного значения равно отклонению размера выбранного компенсатора от размера полости под компенсатор, сформированной без погрешностей.

Погрешность размера компенсатора будет складываться из погрешностей тех звеньев технологической цепи, которые при предварительной сборке конкретного изделия могут приобретать случайные значения, отличающиеся от их значений в конструкторской цепи, и отклонений звеньев, отсутствующих в конструкторской цепи. К ним относятся: погрешность изготовления эталона замыкающего звена ϵ_ϵ , погрешность установки эталона $\epsilon_{уэ}$, погрешность измерения полости под компенсатор ϵ_u , погрешность изготовления компенсатора $\epsilon_{ик}$ (равна допуску размера изготовленного компенсатора TK), погрешность выбора компенсатора ϵ_ϵ . Указанные погрешности могут быть компенсированы только за счет допуска замыкающего звена конструкторской цепи, а не выбором компенсатора. Поэтому их сумма не должна превышать допуска замыкающего звена конструкторской цепи TA_Δ . На схеме компенсации эти погрешности, представляющие технологическую цепь, впишем в пределы TA_Δ . Принимая допущение о симметричном распределении суммы этих погрешностей, совмещаем середину поля рассеяния суммарной погрешности с серединой поля допуска замыкающего звена конструкторской цепи. Половины слагаемых погрешностей изобразим на схеме компенсации отрезками справа и слева от этой середины. Для упрощения схемы компенсации сумма ϵ_ϵ , $\epsilon_{уэ}$, ϵ_u представлена на ней как погрешность формирования размера компенсатора $\epsilon_{рк}$.

С учетом случайного характера погрешностей сборки условие достижения точности замыкающего звена A_{Δ} , можно записать следующим образом:

$$\dot{A}_{\Delta} \geq \sqrt{\varepsilon_y^2 + \varepsilon_{\dot{y}}^2 + \varepsilon_{\dot{e}}^2 + \varepsilon_{\dot{e}\dot{e}}^2 + \varepsilon_{\dot{a}}^2} \quad (2)$$

При внимательном выборе компенсатора невозможно ошибочно выбрать компенсатор, отличающийся от полости под него (измеренной при предварительной сборке) больше чем на одну ступень компенсации. Поэтому целесообразно принять $c = \varepsilon_{\text{вmax}}$. Тогда

$$\tilde{n} = \sqrt{\dot{A}_{\Delta}^2 - \varepsilon_y^2 + \varepsilon_{\dot{y}}^2 + \varepsilon_{\dot{e}}^2 + \varepsilon_{\dot{e}\dot{e}}^2} \quad (3)$$

Число ступеней компенсации можно определить, поделив величину компенсации на ступень компенсации

$$N = \dot{A}_{\Sigma} / \tilde{n} = \dot{A}_{\Sigma} / \sqrt{(\dot{A}_{\Delta}^2 - \varepsilon_y^2 - \varepsilon_{\dot{y}}^2 - \varepsilon_{\dot{e}}^2 - \varepsilon_{\dot{e}\dot{e}}^2)} \quad (4)$$

Значение допусков составляющих звеньев конструкторской цепи и погрешностей сборочных работ и оснастки следует выбирать так, чтобы значение N получалось целым. Определение TA_{Σ} и c по правилу сложения случайных величин позволяет сократить число ступеней компенсации по сравнению с использованием арифметического сложения их составляющих.

На схеме компенсации разделим величину компенсации TA_{Σ} на части равные c . Так как желаемым значением A_{Δ} является его среднее значение, то между серединами ступеней компенсации и серединой допуска TA_{Δ} изобразим средние (в пределах их допусков) размеры компенсаторов разных ступеней.

Для отражения случайного характера A_{Σ} на схеме компенсации представлена кривая его нормального распределения.

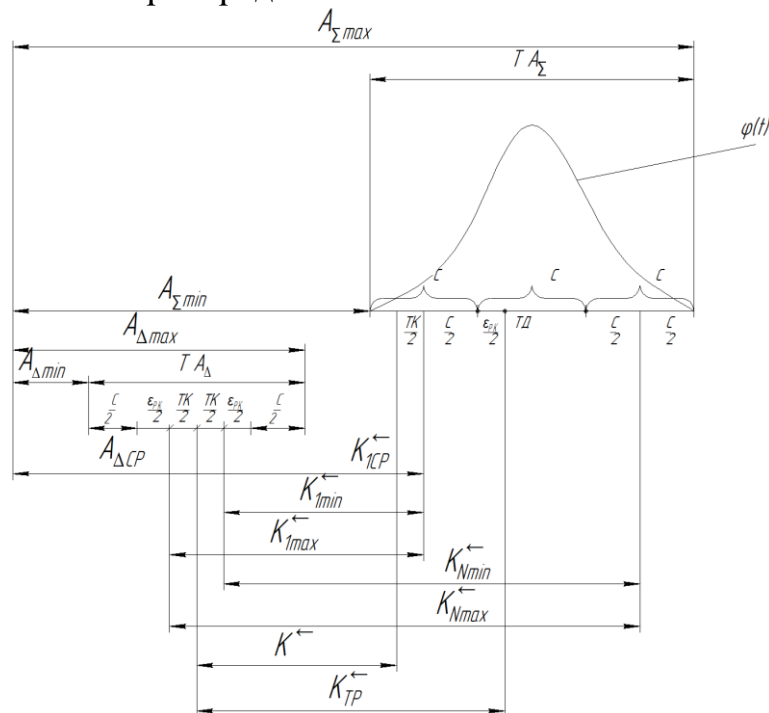


Рисунок – Схема компенсации поля рассеяния суммарного увеличивающего составляющего звена регулированием комплекта неподвижных уменьшающих компенсаторов разной толщины

В соответствии со схемой компенсации, принятой для случая использования комплекта уменьшающих компенсаторов разной толщины, среднюю толщину компенсатора первой ступени следует определять по формуле

$$\tilde{E}_{1\tilde{n}\tilde{\delta}} = \dot{A}_{\Sigma\tilde{n}\tilde{\delta}} - \dot{A}_{\Delta\tilde{n}\tilde{\delta}} - 3\sigma_{\Sigma} + c/2, \quad (5)$$

где: $A_{\Sigma cp}$ – среднее значение суммарного составляющего звена; σ_{Σ} – среднеквадратическое отклонение суммарного составляющего звена; $A_{\Delta cp}$ – среднее значение замыкающего звена конструкторской цепи.

Толщина компенсатора следующей ступени на c больше, чем толщина предыдущего.

Аналогично разработаны схемы компенсации и формулы для расчета размеров компенсаторов для двух других типовых сочетаний A_{Σ} и K .

Определяя число компенсаторов разных ступеней, предварительно изготавливаемых для партии собираемых изделий из P штук, при известном числе ступеней компенсации N , на производстве обычно исходят из того, что заранее неизвестно, компенсатор какой ступени потребуются для конкретного экземпляра изделия. Поэтому изготавливается комплект из N компенсаторов для каждого экземпляра изделия и общее число компенсаторов для всей партии $Q = N \cdot P$. Однако из каждого комплекта будет использован лишь один компенсатор, и $(N-1) \cdot P$ компенсаторов окажутся лишними. При этом нет гарантии, что они потребуются в дальнейшем.

Снизить расходы на изготовление компенсаторов можно, если учесть, что суммарное составляющее звено в пределах партии собираемых изделий подчиняется нормальному закону распределения, при котором значения, близкие к середине поля рассеяния составляют подавляющее большинство, и, следовательно, компенсаторы крайних ступеней потребуются гораздо реже, чем компенсаторы средних ступеней.

Для определения доли экземпляров изделия, у которых A_{Σ} попадает в пределы каждой ступени компенсации, можно воспользоваться функцией Лапласа [3, 4]. Аргументом функции Лапласа $\Phi(t)$ является коэффициент риска t , который в нашем случае можно определить делением интервала между серединой TA_{Σ} и границей определенной ступени компенсации на среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\Sigma} = TA_{\Sigma}/6$.

Для первой и последней (N -й) ступеней компенсации коэффициент риска следует определять по формуле

$$t_1 = t_N = \frac{TA_{\Sigma}/2 - c}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{3\sigma_{\Sigma} - 6\sigma_{\Sigma}/N}{\sigma_{\Sigma}} = 3 - \frac{6}{N}. \quad (6)$$

Значение функции Лапласа $\Phi(t)$ для полученного аргумента t можно определить по специальной таблице [1, 2, 3]. Учитывая, что вероятность попадания значений A_{Σ} в половину поля его рассеяния равна 0,5 выражение для определения доли изделий с A_{Σ} в пределах первой и N -й ступени компенсации получим, вычитая из 0,5 значение $\Phi(t_1)$.

$$q_1 = q_N = 0,5 - \hat{O}(t_1) = 0,5 - \hat{O}\left(3 - \frac{6}{N}\right) \quad (7)$$

Доли изделий с A_{Σ} в пределах второй и $N-1$ -ой ступени компенсации q_2, q_{N-1} получим вычитая из $\Phi(t_1)$ значение $\Phi(t_2)$.

$$q_2 = q_{N-1} = \hat{O}(t_1) - \hat{O}(t_2) = \hat{O}\left(3 - \frac{6}{N}\right) - \hat{O}\left(3 - \frac{12}{N}\right) \quad (8)$$

В общем случае доли изделий с A_{Σ} в пределах i -ой и $N-(i-1)$ -ой ступени компенсации

$$q_i = q_{N-i+1} = \hat{O}(t_{i-1}) - \hat{O}(t_i) = \hat{O}\left(3 - \frac{6 \cdot (i-1)}{N}\right) - \hat{O}\left(3 - \frac{6 \cdot i}{N}\right) \quad (9)$$

При четном числе ступеней компенсации расчеты долей изделий по формуле (15) следует выполнить для ступеней с номерами $i \leq N/2$, пока $\Phi(t_i) \geq 0$.

При нечетном числе ступеней N расчеты долей изделий по формуле (15) следует выполнить для ступеней с номерами $1 \leq i \leq N/2 - 0,5$. Доля изделий с A_{Σ} в пределах средней ступени компенсации с номером $i = N/2 + 0,5$ по формуле

$$q_{N/2+0,5} = \hat{O}\left(\frac{3}{N}\right) \quad (10)$$

Число собираемых изделий, имеющих значение A_{Σ} в пределах отдельной ступени компенсации, можно определить как произведение соответствующей доли изделий на общее число изделий собираемой партии P

$$Q_i = q_i \cdot P \quad \text{и} \quad Q_{N-i+1} = q_i \cdot P \quad (11)$$

Так как сумма долей компенсаторов всех ступеней равна $0,9973 \approx 1$, то общее число компенсаторов всех ступеней будет равно числу собираемых изделий в партии $Q = P$, следовательно предлагаемая методика расчета позволит сократить число требуемых компенсаторов в N раз (N – число ступеней компенсации), по сравнению с расчетом числа компенсаторов без учета распределения значений суммарного составляющего звена.

Применение предлагаемой методики на СТО «Брест» СООО «Белавтомас-сервис», при регулировке форсунки закрытого типа, с многодырчатым распылителем и гидравлически управляемой иглой позволило сократить число требуемых компенсаторов в 4 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник / А. А. Маталин. – 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 512 с.
2. Соломахо, В. Л. Нормирование точности и технические измерения: учебник / В. Л. Соломахо, Б. В. Цитович, С. С. Соколовский. – Минск : Высшая школа, 2015. – 367 с.
3. Солонин, И. С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М. : Машиностроение, 1980 – 110 с.
4. Технология машиностроения (специальная часть): Учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.] – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.

ОБРАБОТКА ЛАЗЕРОМ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

*Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Сидоров В. А.,
Оковитый В. В., Володько А. С.*

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Асташицкий В. М.

Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 220072,
Минск, Беларусь

Введение. Методика оптимизации процесса лазерной обработки основана на необходимости получения упрочненных аморфных или нанокристаллических структур покрытий, являющихся объектом исследований. Для этого наиболее применимы жесткие режимы работы, основой оптимизации которых служит максимально возможная степень локального оплавления напыленных порошковых композиций с отсутствием признаков теплового разрушения на их поверхности. Количество центров кристаллизации (аморфизации) материала, из которых при сверхбыстром охлаждении развиваются упрочненные структуры, напрямую зависит от степени кратковременного оплавления композиции, содержащей различные фазы (в том числе тугоплавкие) [1]. В качестве технологического оборудования мы применяли твердотельный квазистационарный лазерный излучатель, позволяющий обрабатывать покрытия импульсами длительностью до 4 мс, полученными в режиме свободной генерации. Важной составляющей данной технологии является среда, в которой осуществляется обработка. Наиболее целесообразно применение азота для защиты от окисления, при этом затрудняется теплоотвод от обрабатываемого материала, что актуально при образовании упрочненных наноструктурных и аморфных фаз [2–4]. Для процесса оптимизации жестких режимов лазерной обработки по упомянутому критерию желательнее исследовать влияние на степень оплавления напыленных композиций плотности мощности импульса лазерного излучения. При варьировании плотности мощности учитывали так же, что форма импульсов излучения твердотельных лазеров при режиме свободной генерации определяется формой импульсов тока накачки [5]. Совместно с плотностью мощности оптимизировали так же суммарное количество импульсов в пятне обработки. Этот технологический параметр влияет на толщину обработанных слоев покрытия [3]. Для износостойких покрытий необходимо получение при напылении повышенных когезионной и адгезионной прочности. Следовательно, суммарное количество импульсов обязано обеспечивать оплавление и уплотнение полученных покрытий по всей толщине, что и будет способствовать получению упрочненных нанокристаллических или аморфных структур за счет факторов, о которых упоминалось выше. Оценку степени оплавления и уплотнения проводили при исследовании шлифов поперечного сечения обработанных покрытий на металлографическом микроскопе “MeF - 3” фирмы “Reichert” (Австрия) и на анализаторе изображения AutoScan. При изучении свойств полученных композиций при обработке на оптимальных режимах, создание упрочненных нанокристаллических и аморфных

структур соответствовало возрастанию усредненной микротвердости у композиционных материалов по сравнению с необработанными плазменными покрытиями [1–5].

Оптимизация обработки плазменных покрытий из материалов на основе оксидной керамики. Согласно примененного методического подхода при изменении технологических параметров изменяли плотность мощности излучения и суммарное количество импульсов в пятне обработки. В таблице 1 показаны результаты оптимизации плотности мощности. Оптимальные плотности мощности излучения (W) при обработке композиций $Al_2O_3-TiO_2-12\%$ (MoS_2-Ni) полученным методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием - в пределах $(4,0 - 6,5) \times 10^5$ Вт/см², а для $Al_2O_3-TiO_2-12\%$ (MoS_2-Ni), полученных методом СВС, находятся в пределах $(3,5-6,0) \times 10^5$ Вт/см². Это подтверждается динамикой возрастания степени оплавления обработанных композиций и изменения пористости, желаемого уменьшения которой (по критерию оптимизации) при W больше $6,0$ и $6,5 \times 10^5$ Вт/см² не происходит. Снижение эффективности теплоотдачи можно объяснить значительным содержанием в полученных покрытиях тугоплавкой оксидной фазы (более 80 %), которая соответственно препятствует возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. При дальнейшем увеличении W наблюдаются нежелательные тепловые разрушения поверхностей обрабатываемых материалов. Вид такого характерного разрушения с образованием “кратеров” показан на рисунке 1. Кроме плотности мощности импульсного излучения оптимизировали суммарное количество импульсов лазерного луча в пятне обработки для формирования полностью оплавленных по всей толщине покрытий (0,5–0,6 мм). При металлографическом анализе нетравленных шлифов установлено, что необходимое количество импульсов для полученных покрытий из порошков $Al_2O_3-TiO_2-12\%$ (MoS_2-Ni), полученных методом СВС составляет 4 - 5 воздействий, а для покрытий из порошков $Al_2O_3-TiO_2-12\%$ (MoS_2-Ni), полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием, – 3–4. Дополнительные импульсы не дают дополнительного эффекта, поскольку их многократное повторение только ухудшает геометрию полученной поверхности покрытия вследствие теплового разрушения. Это затрудняет заключительную механическую обработку сформированных материалов, так как увеличивается припуск, который должен быть минимальным вследствие значительной стоимости используемых материалов покрытий и проблематичности их обработки вследствие твердости и износостойкости. Суммарное количество импульсов лазерного излучения согласно полученных результатов значительно меньше в сравнении с импульсами компрессионной плазменной струи (11–14) при воздействиях на те же покрытия. Это можно объяснить длительностью воздействий, которая соответственно составляет 4 мс и 400 мкс. При существенно большей длительности воздействия возрастает зона концентрации подводимой энергии и толщина слоя, при обработке единичным импульсом лазерного излучения, при этом снижается суммарное количество воздействий для оплавления покрытий по всей толщине. Результаты исследований по оптимизации технологических параметров представлены в таблице 2 (диаметр пятна обработки составляет 8,0 мм).

Таблица 1 – Результаты исследований по оптимизации плотности мощности

Покрытие	Плотность мощности импульса лазерного луча, $\times 10^5$ Вт/см ²	Показатель пористости на шлифах обработанного покрытия, %
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -12%(MoS ₂ -Ni) (СВС)	3,5	3,3 – 4,1
	4,5	3,0 – 3,7
	5,5	2,8 – 3,4
	6,0	2,5 – 3,0
	6,5	2,7 – 3,2
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -12%(MoS ₂ -Ni) (агломер.)	4,0	4,0 – 4,7
	5,0	3,4 – 3,8
	6,0	3,2 – 3,6
	7,0	3,3 – 3,5

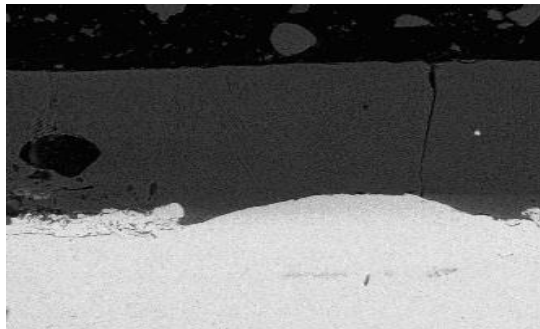


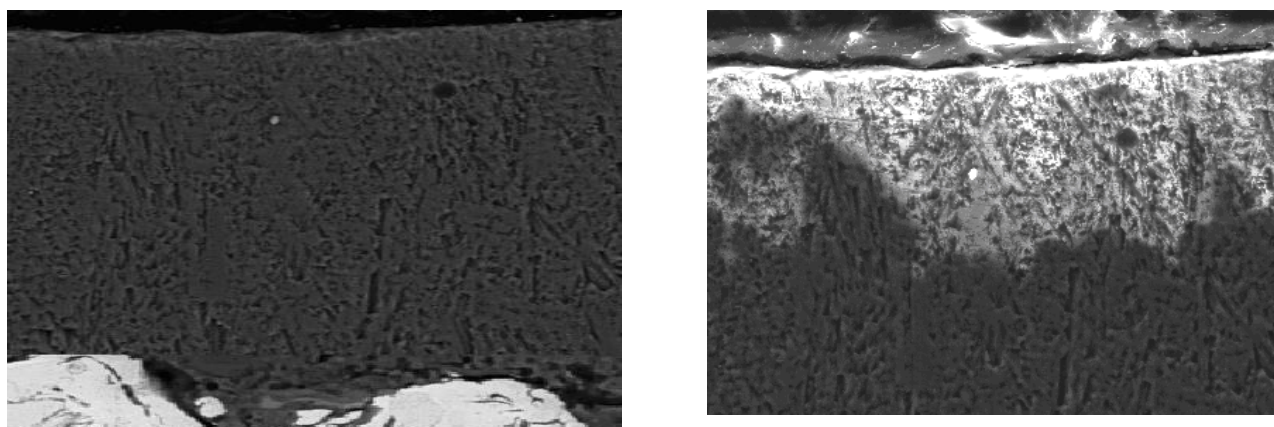
Рисунок 1 – Следы теплового разрушения поверхности покрытия Al₂O₃-TiO₂-12%(MoS₂-Ni), полученного методом СВС после импульсной лазерной обработки при W больше оптимального значения

Таблица 2 – Оптимизированные технологические параметры импульсной лазерной обработки

Покрытие	Режимы обработки покрытия лучом лазера импульсного действия	
	Плотность мощности излучения, $\times 10^5$ Вт/см ²	Суммарное количество импульсов луча в пятне обработки
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -12%(MoS ₂ -Ni)(СВС)	5,5–6,0	4–5
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -12%(MoS ₂ -Ni) (агломер.)	6,0–6,5	3–4

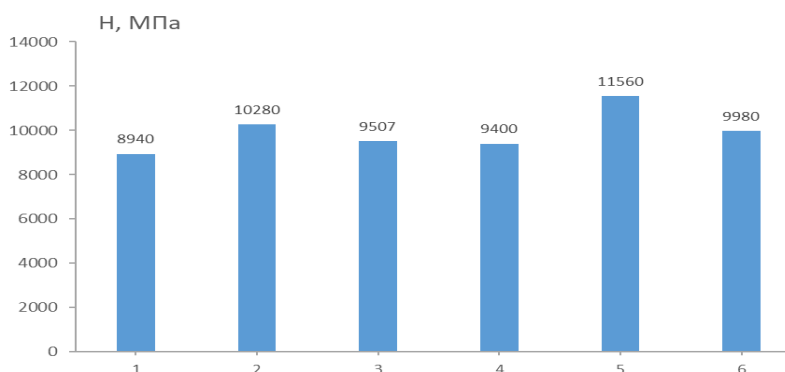
Изучение покрытий с модифицированной структурой, полученной на оптимизированных режимах обработки импульсами лазерного излучения. На рисунке 2 показана микроструктура покрытий, сформированных на оптимизированных режимах обработки. Как и в случае технологии компрессионных плазменных воздействий, слои полученных покрытий являются оплавленным металлокерамическим материалом. При процессе оплавления происходит активация химического взаимодействия на границах основных фаз сформированных композиций. Полученными продуктами при химическом взаимодействии могут быть тонкодисперсные образования, которые значительно упрочняют границы основных фаз и все покрытие в целом. Получается достаточно равномерное распределение структурных элементов. Это способствует увеличению износостойкости полученных композиций. Геометрия поверхности полученных покрытий по сравнению с напыленным материалом (без последующей лазерной обработки) характеризуется снижением высоты микронеровностей. Из-за оптимизации технологических характеристик лазерного излучения не

присутствуют “кратеры” теплового разрушения сформированной поверхности. Как и при компрессионных плазменных воздействиях происходит усложнение травления ее элементов. Значительное увеличение количества нетравленных участков говорит о наличии в покрытиях упрочненных аморфных структур с высокой стойкостью к коррозии, трудно растворимых в кислотных травителях. В соответствии с методикой при изучении свойств полученных покрытий оценивали их усредненную микротвердость (Н). Изменение параметра Н для различных композиций проиллюстрировано на рисунке 3. По сравнению с компрессионной плазменной обработкой заметно уменьшение микротвердости, это объясняется снижением от воздействия импульсом лазерного излучения степени локальности оплавления материала. Так же снижается скорость охлаждения расплава за счет теплоотвода в подложку образцов. Уменьшаются степень измельчения его зеренной структуры и значение параметра Н, количество аморфных фаз покрытия. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наряду с компрессионной плазменной обработкой рассмотренная лазерная технология позволяет улучшать свойства покрытий из порошков $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$, полученных методом СВС и методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием.



а) *а-метод СВС; б- метод агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием*

Рисунок 3 – Микроструктура покрытия $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ (x 500) после обработки импульсами лазерного излучения



1, 4 – после плазменного напыления; 2, 5 – после компрессионной плазменной обработки напыленных материалов; 3, 6 – после обработки лучом лазера импульсного действия

Рисунок 4 – Микротвердость покрытий $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ (1,2,3 – агломерирование; 4,5,6 – СВС)

Заключение. Исследованы и оптимизированы технологические параметры высокоэнергетической обработки напыленных плазменных покрытий из материалов на основе оксидной керамики с применением добавок тугоплавких металлов, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием. Оптимизация была выполнена при исследовании процессов структурообразования при оплавлении, уплотнении и высокоскоростном охлаждении покрытий. Основным критерием оптимизации служила максимальная степень локального оплавления, уплотнения сформированных композиций при отсутствии признаков разрушения от воздействий импульсами лазерного излучения. Энергия воздействий генерировалась при применении твердотельного квазистационарного лазерного излучателя.

На основании металлографического анализа нетравленных шлифов выявлено, что необходимое количество импульсов лазерного излучения для покрытий из порошков $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием, – 3–4, а для покрытий из порошков $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$, полученных методом СВС составляет 4–5 воздействия. Оптимальные плотности мощности излучения (W) при обработке композиций $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$, полученными методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием - в пределах $(4,0 - 6,5) \times 10^5$ Вт/см², а для $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$, полученных методом СВС, находятся в пределах $(3,5 - 6,0) \times 10^5$ Вт/см². Суммарное количество импульсов лазерного излучения значительно меньше в сравнении с импульсами компрессионной плазменной струи (11–14) при воздействиях на те же покрытия. Что объясняется длительностью воздействий, которая соответственно составляет 4 мс и 400 мкс. При большей длительности снижается суммарное количество воздействий для оплавления покрытий по всей толщине.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оковитый, В. А. Модификация плазменных износостойких покрытий импульсным лазером / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2009. – Вып. 4(58): Машиностроение. – С.49–53.
2. Оковитый, В. А. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В. А. Оковитый [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск. : Белорусская наука, 2008. – Вып. 31. – С. 156–162.
3. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ V Okovity // J. Welding International. – 2003. – vol.16, № 11. – P. 918–920.
4. Оковитый, В. А. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой / В. А. Оковитый [и др.] // “Наука и техника”, БНТУ – Минск. – 2018. – Вып. 3. – С.183–189.
5. Оковитый, В. А. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями “Наука и техника” / В. А. Оковитый [и др.] // “Наука и техника”, БНТУ – Минск. – 2018. Вып. 5. – С. 377–389.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЛИБРОВКИ ХОЛОДНОПРОКАТНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПРОКАТКИ ТРУБ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Пилипенко С. В.¹, Штемпель О. П.¹

1) Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Беларусь

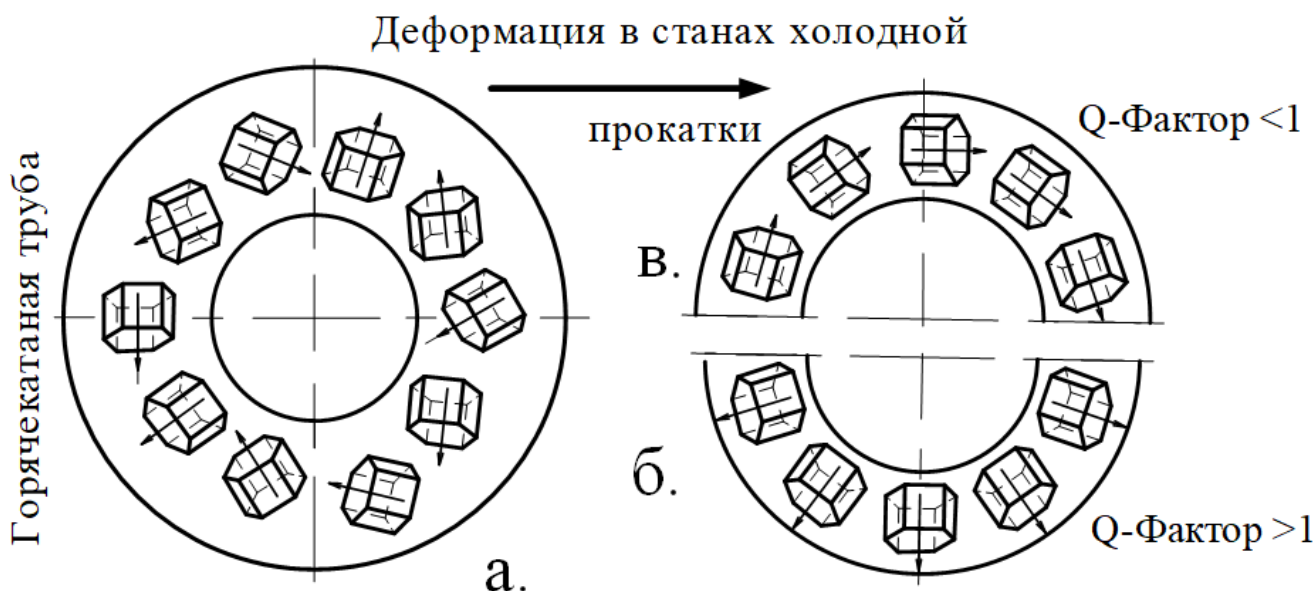
Трубопрокатные изделия из титановых сплавов применяется в ответственных частях машин и механизмов в аэрокосмической, атомной, отраслях, в судостроении, в элементах трансмиссии и тормозных систем [1], и даже в двигателях наземного электротранспорта [1]. Титановые сплавы типа Ti-3AL-2.5V имеют гексагональную плотноупакованную решетку, с ярко выраженной анизотропией механических свойств. Контролируя распределение истинной деформации по толщине стенки к истинной деформации по среднему диаметру (Q-фактор), как из прохода в проход станов холодной прокатки труб, так и вдоль рабочего конуса каждого отдельного прохода, можно трансформировать изначальную хаотическую ориентацию зерен металла трубы либо в радиальную, либо в тангенциальную. Таким образом, получив необходимую структуру, можно дополнительно улучшить технологические параметры трубопроводов.

Целью данной работы являются исследования влияния степени крутизны гребня калибра и степени крутизны образующей оправки стана ХПТ на распределение Q-фактора вдоль конуса деформации при различных значениях начальной конусности оправки ($2\text{tg}\alpha$) с криволинейной образующей. Подбор оптимальных параметров прокатки труб из титанового сплава Ti-3AL-2.5V, используемых в гидравлических системах машин и механизмов.

Изначально после горячей прокатки трубы из сплава Ti-3-2.5V имеют хаотическую ориентацию зерен (рис. 1, а), далее, после холодной пильгерной прокатки, в зависимости от распределения Q-фактора из прохода в проход (и вдоль конуса деформации в каждом проходе) можно получить либо радиальную структуру (высокое значение Q-фактора, рис. 1), либо тангенциальная структура структуру (высокое значение Q-фактора) [1–3]. Величину Q-фактора в любом контрольном сечении конуса деформации (рис. 2) можно определить из зависимости:

$$Q = \frac{\ln \frac{S_x}{S_{x-\Delta x}}}{\ln \frac{D_x - S_x}{D_{x-\Delta x} - S_{x-\Delta x}}}, \quad (1)$$

где D_x и S_x – толщина стенки и диаметр трубы в сечении x после деформации за двойной ход клетки; $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ – диаметр и толщина стенки трубы в сечении до деформации; x – координата сечения от начала зоны редуцирования; $x-\Delta x$ – расстояние, на которое сдвигается сечение x , в ходе деформации за двойной ход клетки.



а – труба после горячей деформации; б – высокое значение Q-Фактора во время холодной деформации, радиальная структура; в – низкое значение Q-фактора во время холодной деформации, тангенциальная структура

Рисунок 1 – Влияние холодной прокатки на возможную на текстуру металла труб [4, 5]

Множественными исследованиями доказано [1–4], что из-за ориентации зерен трубы с радиальной структурой имеют следующие преимущества: повышенную усталостную прочность; повышенную пластичность; при данной величине предела прочности, повышенное значение предела текучести и более высокую вязкость.

Для расчетного исследования распределения Q-фактора вдоль конуса деформации выбран следующий маршрут стана ХПТ-55: 38,1x2,2-32,1x1,47 мм. Относительное обжатие по площади поперечного сечения ε_S составляет 42,99 %. Относительное обжатие по диаметру ε_D равно 15,75 %. Относительное обжатие по толщине стенки ε_s составляет 33,18 %. Максимально возможная начальная конусность оправки $2tg\alpha$ равна 0,0101. Величина Q-фактора за проход Q_S составляет 1,078. Для моделирования был создан программный продукт «Q-Factor. Cold pilger tube rolling» (рис. 2), который не только рассчитывает калибровку инструмента и рассчитывает силовые параметры деформации, а и позволяет оптимизировать характер на распределения Q-фактора вдоль конуса деформации (рис. 3).

На рисунке 4 показаны графики зависимости распределение Q-фактора вдоль конуса деформации от степени крутизны гребня валкакалибра. Результаты моделирования показывают, что наиболее оптимальным является использование калибровок с возможно меньшими значениями степени крутизны гребня калибра и возможно меньшими значениями начальной конусности.

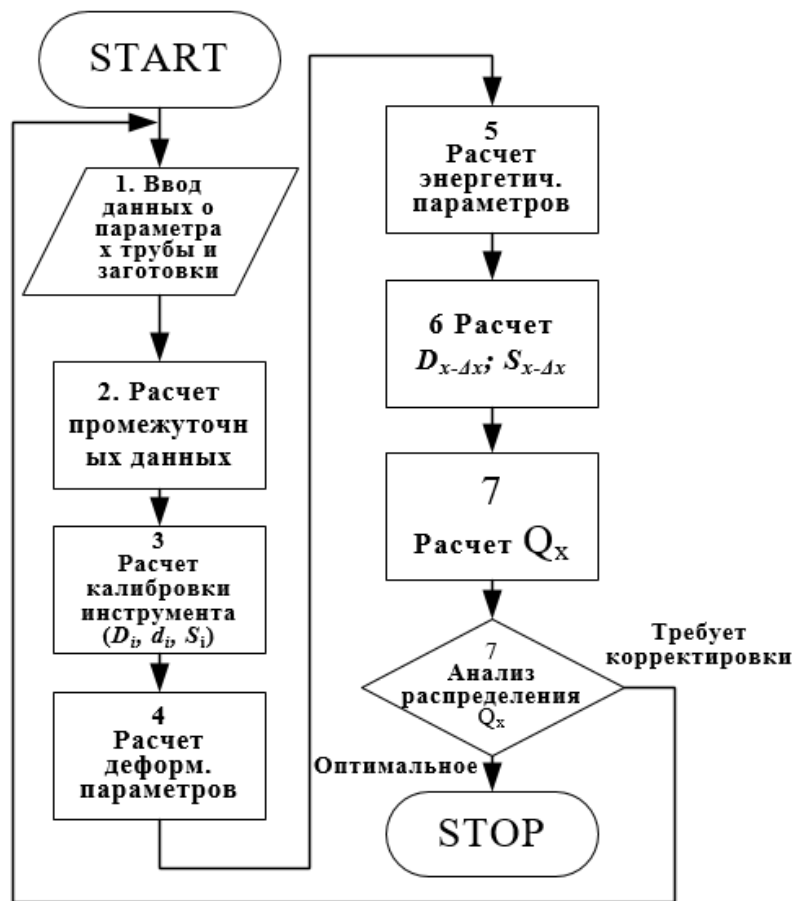


Рисунок 2 – Предложенный алгоритм ведения расчета параметров процесса ХПТ

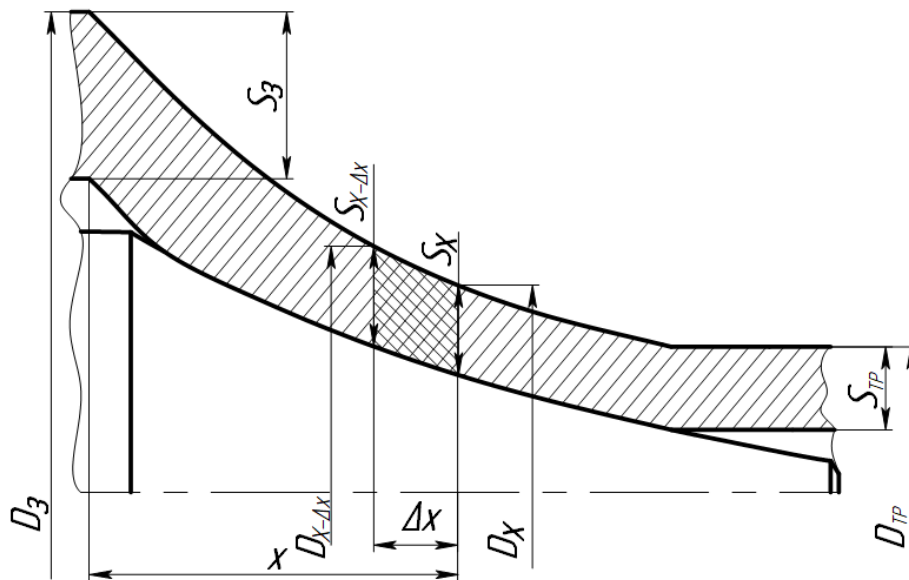


Рисунок 3 – Схема к определению $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ в произвольно выбранном сечении конуса деформации стана ХПТ: D_x и S_x – геометрические параметры рассматриваемого сечения после деформации двойным ходом клетки; $D_{x-\Delta x}$ и $S_{x-\Delta x}$ – геометрические параметры рассматриваемого сечения до деформации; Δx – смещение рассматриваемого сечения за двойной ход клетки

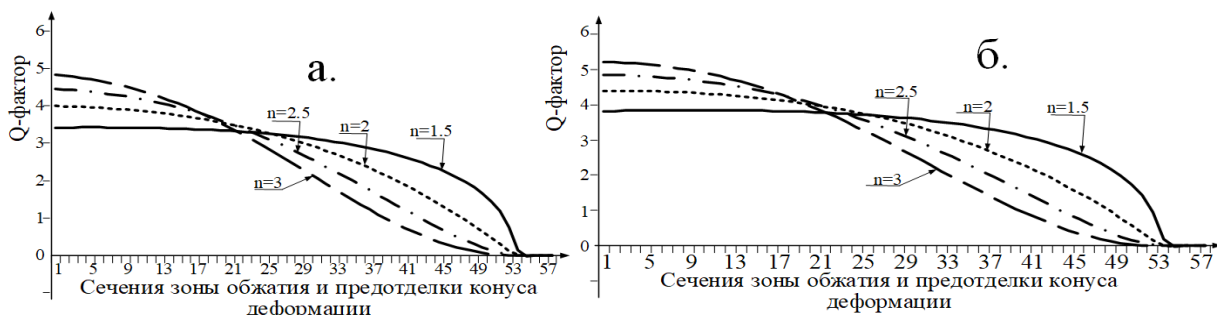


Рисунок 4 – Влияние степени крутизны образующей гребня калибра на распределение Q-фактора вдоль зон обжатия и предотделки конуса деформации (маршрут – 38,1x2,2-32,1x1,47, величина подачи t составляет 5): а – $2t\alpha$ составляет 0,01; б – $2t\alpha$ составляет 0,008

Выводы. Представлен алгоритм программы «Q-Factor. Cold pilger tube rolling», позволяющий оптимизировать параметры калибровки инструмента станов ХПТ, для прокатки труб, используемых в гидравлических системах машин и механизмов. Анализ влияния степени крутизны образующей гребня калибра на распределение Q-фактора вдоль зон обжатия и предотделки конуса деформации (рис. 2) показывает, что для данного сортамента труб предпочтительным является использование степеней крутизны n , равных 1,5, т.е. меньших значений крутизны гребня калибра. В этом случае металл находится в более выгодных деформационных условиях, с точки зрения обеспечения необходимого типа структуры металла титановых труб из сплава Ti-3Al-2.5V, используемых в гидравлических системах машин и механизмов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pilipenko, S. V. A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy / S.V. Pilipenko, V.U. Grigorenko, V.A. Kozechko, O.O. Bohdanov / Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. – 2021. – №1. – p. 78–83.
2. Bohdanov O. Model of surface roughness in turning of shafts of traction motors of electric cars / O. Bohdanov, V. Protsiv, V. Derbaba, S. Patsera Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. – 2020. – №1. p. 41–45.
3. Пилипенко, С. В. Анализ влияния технологических факторов процесса холодной прокатки труб на изменение распределения Q-фактора вдоль конуса деформации / С. В. Пилипенко // Известия вузов. Цветная металлургия. – № 3. – 2019. – С. 30–35.
4. Forney, C.E. Ti 3Al 2,5V Seamless tubing engineering guide [Текст] / C.E. Forney, S. E. Meredith. – Washington: Sandvik Special Metals Corp, 1990. – 144 p.
5. Forney, C.E. Ti 3Al 2,5V seamless tubing engineering guide [Текст] / C.E. Forney, H. S. Schemel. – Washington: Sandvik Special Metals Corp, 1987. – 115 p.

УДК 539.3+539.389+620.17

НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ В СЕЧЕНИИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ ПРИ РЕВЕРСЕ НАГРУЗКИ

Холодарь Б.Г.

Брестский государственный технический университет
г. Брест, Республика Беларусь

В большинстве случаев элементы конструкций или машин при эксплуатации не выходят за грань упругих деформаций, даже с некоторым наперед назначенным запасом. Материалы при этом рассматриваются как упругие, и наличие перемен знака нагружения (реверс нагрузки) не сказывается на работоспособности

системы или характере ее напряженно-деформированного состояния (накопление поврежденности материала с ростом числа циклов нагружения не учитываем). Ситуация кардинально меняется при выходе материала за предел упругости.

Для определенности будем рассматривать склерономный упруго-пластический материал, в котором деформации содержат только упругую и остаточную составляющие, а свойства не зависят от времени и скорости деформирования.

При деформациях, превосходящих упругие, приложение нагрузки обратного знака вызывает связь напряжений и деформаций, подчиняющуюся не первоначальной диаграмме растяжения $\sigma(\varepsilon)$ материала (ДР), а диаграмме обратного нагружения (ДОН) с проявлением эффекта Баушингера. Кривые ДОН зависят от величины деформации, достигнутой на момент реверса нагрузки.

Описание ДР не представляет трудности при любой ее форме. Кривые ДОН, соответствующие заданной ДР, описываются более сложно в связи с необходимостью учета ряда дополнительных условий.

В частности, использованная далее для описания ДР зависимость принята в виде:

$$\begin{aligned} \text{упругий участок } (0 \leq \varepsilon < \varepsilon_T): \quad & \sigma(\varepsilon) = E\varepsilon, \\ \text{площадка текучести } (\varepsilon_T < \varepsilon \leq \varepsilon_U): \quad & \sigma(\varepsilon) = \sigma_T, \\ \text{участок упрочнения } (\varepsilon_U < \varepsilon < \varepsilon_B): \quad & \sigma(\varepsilon) = \sigma_B - (\sigma_B - \sigma_T) \cdot ((\varepsilon_B - \varepsilon) / (\varepsilon_B - \varepsilon_U))^m. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом кривая ДОН, начинающаяся в точке $\sigma_0(\varepsilon_0)$, описывается выражениями:

$$\begin{aligned} \text{упругий участок:} \quad & \sigma_R(\varepsilon_R) = E\varepsilon_R, \\ \text{площадка текучести:} \quad & \sigma_R(\varepsilon_R) = \sigma_0 + \sigma_{TR}, \\ \text{участок упрочнения:} \quad & \sigma_R(\varepsilon_R) = (\sigma_0 + \sigma_{BC}) - (\sigma_{BC} - \sigma_{TR}) \cdot ((\varepsilon_{BC} + \varepsilon_0 - \varepsilon_R) / (\varepsilon_{BC} + \varepsilon_0 - \varepsilon_{UR}))^m, \end{aligned} \quad (2)$$

Зависимость предела текучести $\sigma_{TR}(\varepsilon_0)$ на ДОН получаем в виде:

$$\sigma_{TR}(\varepsilon_R) = \sigma_{TC} \cdot (k_{TR} + (1 - k_{TR}) \cdot ((\varepsilon_{BU} - (\varepsilon_0 - \varepsilon_U)) / \varepsilon_{BP})^m), \quad (3)$$

В (1)-(3) обозначено:

$\sigma_T = \sigma_{TP}$, σ_{TC} , $\sigma_B = \sigma_{BP}$, σ_{BC} – пределы текучести и прочности на растяжение и сжатие,

$\varepsilon_T = \varepsilon_{TP}$, ε_{TC} , $\varepsilon_B = \varepsilon_{BP}$, ε_{BC} – деформации начала текучести и предельные деформации при растяжении и сжатии,

ε_P , $\varepsilon_U = \varepsilon_T + \varepsilon_P$ – длина площадки текучести и деформация начала участка упрочнения,

$\varepsilon_{BU} = \varepsilon_{BP} - \varepsilon_U$ – длина участка упрочнения,

$\sigma_{TR}(\varepsilon_0)$ – предел текучести на ДОН, соответствующий точке ε_0 ,

$\varepsilon_{UR} = \varepsilon_P \cdot \sigma(\varepsilon_0) / \sigma_T$ – длина площадки текучести на ДОН,

$k_{TR} = \sigma_{TR}(\varepsilon_B) / \sigma_{TC}$ – параметр снижения предела текучести на ДОН для точки $\varepsilon_0 = \varepsilon_B$,

m – параметр упрочнения материала,

E – модуль упругости.

Важной особенностью такого материала является наличие прямолинейной зависимости $\sigma(\varepsilon)$ на всем участке $\sigma_0 - \sigma_{TR}$.

Вид кривых показан на рисунке 1 (σ_R и ε_R – положительные направления напряжений и деформаций обратного нагружения) при значениях констант $\sigma_{TR}=\sigma_{TC}=\sigma_T=10^2\text{МПа}$, $\sigma_{BP}=\sigma_{BC}=\sigma_B=2\cdot 10^2\text{МПа}$, $\varepsilon_{BP}=\varepsilon_{BC}=\varepsilon_B=0.50$, $\varepsilon_P=4\varepsilon_T$, $E=10^4\text{МПа}$, $m=3$, $k_{TR}=0.25$.

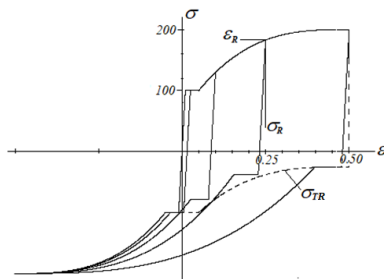
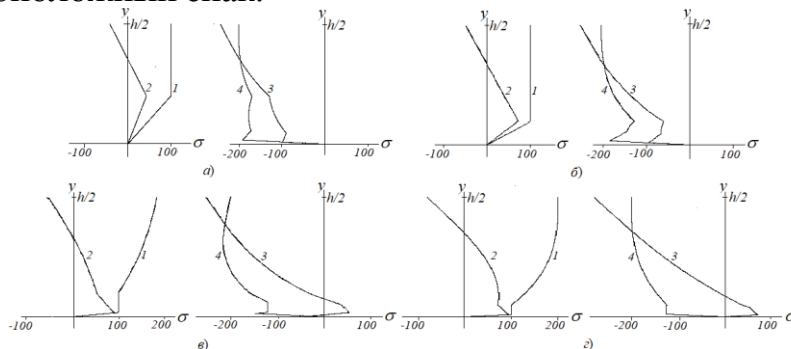


Рисунок 1 – Диаграммы растяжения – сжатия и обратного нагружения (показаны ДОН для $\varepsilon_0=0,025; 0,05; 0,25; 0,5$)

Ситуация существенно осложняется, когда при работе конструкции имеет место неоднородное напряженное состояние материала, например, при изгибе стержня за пределом упругости. В этом случае при реверсе нагрузки в ее объеме происходит перераспределение напряженно-деформированного состояния, обеспечивающее минимум запасенной материалом энергии. Если нагрузка от некоторого достигнутого уровня просто сбрасывается до нуля (разгрузка), то в конструкции появляются взаимноуравновешенные в сечении стержня остаточные напряжения, распределенные кусочно-линейным (если деформации в точке разгрузки не выходили за площадку текучести) или нелинейным образом на соответствующих участках высоты сечения. Определение напряжений производится в соответствии с теоремой теории пластичности о разгрузке [1, 2]. Если же обратное нагружение идет непрерывно (без остановки), то возникает более сложная ситуация и напряжения в сечении меняются в соответствии с изменением внешнего момента. В обоих случаях при определении напряжений принимается выполняющейся кинематическая гипотеза плоских сечений.

Для случая чистого изгиба стержня прямоугольного сечения на рисунке 2 для деформаций в поверхностном слое ε_0 , отмеченных на рисунке 1, приведены графики распределения по высоте сечения исходных и остаточных напряжений, а также напряжений при обратном нагружении до предельной деформации сжатия ε_{BC} с промежуточной разгрузкой и без нее. На рисунке 3 показано изменение напряжений при обратном нагружении до различных последовательно возрастающих уровней. На обоих рисунках показана половина высоты прямоугольного сечения размерами $b \times h=1.0 \times 0.25\text{ см}$, в которой исходные напряжения были растягивающими. На другой части сечения напряжения аналогичны по форме, но имеют противоположный знак.



а) $\varepsilon_0=0,025$; б) $\varepsilon_0=0,05$; в) $\varepsilon_0=0,25$; г) $\varepsilon_0=0,50$

Рисунок 2 – Распределение напряжений по высоте сечения при разгрузке из разных точек ДР

Обозначения: 1 – исходные, 2 – остаточные, 3 – с разгрузкой, 4 – без разгрузки

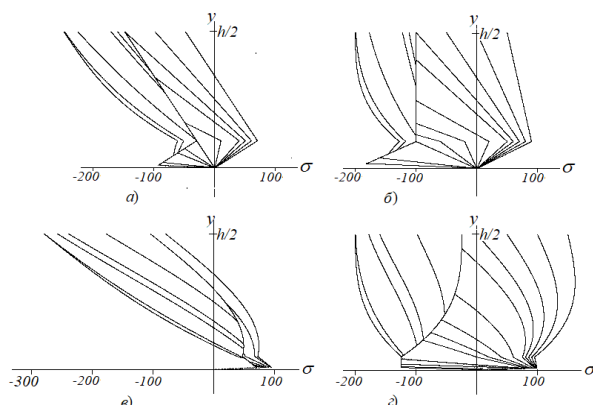


Рисунок 3 – Эпюры напряжений при разных уровнях обратной деформации ε_0 :
 а), б) $\varepsilon_0=0,05$; в), г) $\varepsilon_0=0,50$.

Обозначения: а), в) – с разгрузкой, б), г) – без разгрузки

Приведенные результаты показывают, что при обратном нагружении с промежуточной разгрузкой возникают более высокие уровни напряжений, чем при непрерывном нагружении. Сами распределения напряжений по высоте сечения являются достаточно сложными и труднопредсказуемыми по форме, зависят от величин исходной и обратной деформаций и содержат линейные и криволинейные участки. В слоях стержня, наиболее удаленных от нейтральной оси, расчетные напряжения могут достигать значений, которые превосходят предел прочности материала на растяжение, но вследствие нелинейности исходных диаграмм деформирования могут реализоваться и случаи возникновения такого уровня напряжений во внутренних слоях, что указывает на возможность образования в них трещин при деформациях наружного слоя, не достигших своего предельного значения ε_B .

Естественно, что при других формах сечения проявятся дополнительные особенности распределения напряжений.

Решение и анализ задач, аналогичных рассмотренным, способствует более глубокому пониманию вопросов деформирования и разрушения материалов и конструкций при повторных нагружениях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М. : ГИТТЛ, 1969. – 420 с.
2. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1968. – 400 с.

УДК 621.762.2

ПРАВЯЩИЕ АЛМАЗНЫЕ КАРАНДАШИ С МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ МЕДНО-ОЛОВЯННОЙ СВЯЗКОЙ

Шелег В. К.¹, Жорник В. И.^{1,2}, Ковалева С. А.²

1) Белорусский национальный технический университет, г. Минск,
 Республика Беларусь

2) Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск,
 Республика Беларусь

Повышение эксплуатационной стойкости и работоспособности правящего алмазного инструмента является актуальной задачей и определяет производительность и экономические характеристики абразивной обработки в целом [1].

Так, наибольший расход абразивных кругов происходит на стадии восстановления их режущей способности, а затраты времени на правку могут достигать 40–50 % штучного времени обработки. Определяющую роль в обеспечении эксплуатационной стойкости и работоспособности правящего алмазного инструмента, помимо качества алмазных зерен, играют физико-механические свойства металлической матрицы (теплопроводность, износостойкость, прочность, твердость), обеспечивающие закрепление алмазов в рабочем слое инструмента. На сегодняшний день повышенный расход алмазов в правящем инструменте является основной причиной снижения эффективности абразивной обработки.

Механизмы удержания алмазного зерна в матрице связаны как с соотношением прочностных свойств материала связки и абразивного зерна, формой и глубиной заделки зерна, что обуславливает формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «зерно-связка» [2], так и с адгезионным взаимодействием на границе их раздела. Основными причинами повышенного расхода алмазов являются разупрочнение материала связки при повышении температуры в рабочей зоне, а также более интенсивное изнашивание материала связки в зоне вокруг алмазного зерна под действием потока абразивного шлама, что требует повышения термостойкости и износостойкости переходной зоны.

На сегодняшний день металлические связки для правящего инструмента изготавливаются из многокомпонентных порошковых смесей на основе меди, железа, кобальта, вольфрама и др. Наиболее высокие прочностные и эксплуатационные показатели имеют кобальтовые связки, однако их высокая стоимость вынуждает искать более экономичную альтернативу с использованием более дешевых металлов. Наиболее широкое применение в правящем алмазном инструменте, в частности в правящих карандашах, получила связка системы медь-олово (М2-01 ТУ23-56748-84), обеспечивающая оптимальное сочетание эксплуатационных свойств, технологичности и стоимости. Данная связка обладает относительно высокими показателями алмазоудержания, имеет близкий к алмазу коэффициент теплового расширения и относительно других связок большую устойчивость к разупрочнению, однако у нее низкая адгезионная активность по отношению к алмазу.

Связка системы медь-олово имеют двухфазный состав и структуру эвтектоида ($\alpha + \delta$ -Cu₄₁Sn₁₁). Высокая твердость и хрупкость интерметаллида Cu₄₁Sn₁₁ при значительном его содержании в структуре бронз вызывает резкое снижение их пластичности, а в условиях повышенных температур свойства материала деградируют за счет рекристаллизации, структурной релаксации и фазовых превращений. Морфология, размер и дисперсность включений эвтектоида оказывает существенное влияние на механические свойства бронз.

Для регулирования структуры и прочностных свойств бронзы широко используют дисперсное упрочнение микро- и наноразмерными тугоплавкими соединениями [3], приводящее к измельчению зеренной структуры и изменению физико-химических взаимодействий на границе раздела металл-алмаз, а повышение адгезионного взаимодействия достигается легированием связки или металлизацией алмаза активными элементами Ti, Cr, Ni, W и Co, обеспечивающих образование металлокарбидной переходной зоны на границе с алмазом [4].

В то же время задача повышения износостойкости и прочности оловянных бронз, работающих в условиях высоких удельных механических и тепловых нагрузок, возникающих при эксплуатации правящего инструмента, приводит к необходимости разработки новых подходов к формированию структуры бронз. Так, одновременное повышение прочностных и адгезионных свойств может быть достигнуто в композиционных материалах с наноструктурой.

Одним из современных методов модифицирования и получения порошков наноструктурированных композитов с фазовым составом в виде твердых растворов и интерметаллидов является обработка в высокоэнергетических механореакторах типа планетарной шаровой мельницы. При этом фазовый состав и структура механохимически формируемых композитов определяется режимами обработки, а получаемый продукт представляет собой порошок, что удобно для последующих технологических операций формования и спекания.

Целью данной работы является повышение эксплуатационных характеристик медно-оловянных связок для правящего алмазного инструмента, посредством механоактивирования и модифицирования исходной порошковой смеси.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных материалов использованы порошки меди марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-75) и олова марки ПОЭ (ГОСТ 9723-73) грануляцией 20–40 мкм, титана марки ПТОМ1. Количественный состав порошковых смесей по массе $\text{Cu} : \text{Sn} = 80:20$, $\text{Cu} : \text{Sn} : \text{Ti} = 76:19:5$. Механическая активация выполнена в высокоэнергетической шаровой планетарной мельнице (ПШМ) АГО-2 в атмосфере аргона (объем барабана 250 см³, диаметр шаров 5 мм, загрузка 200 г, навеска порошка 10 г, скорость вокруг общей оси ~1000 об/мин). Энергонапряженность мельницы $I = 7$ Вт/г, доза введенной механической энергии определялась как $D = I \cdot t$ (кДж/г), где t – длительность обработки.

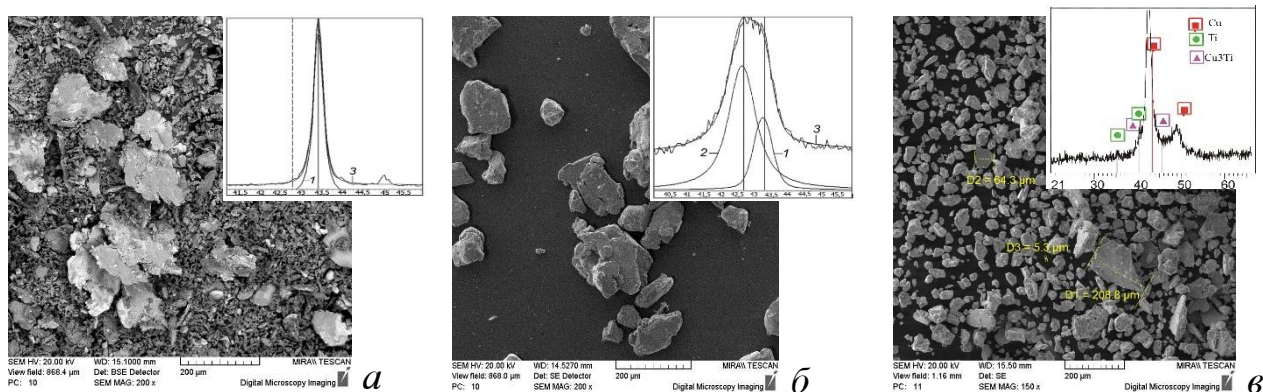
Рентгенодифракционные измерения выполнены на дифрактометре D8 Advance Bruker (Германия) в конфигурации θ – 2θ с шагом 0,05° в $\text{CuK}\alpha$ излучении. Рентгенофазовый анализ (РФА) проведен с использованием базы данных PDF-2. Рентгеноструктурный анализ (РСА) проведен по методу Ритвельда с выполнением полнопрофильного анализа дифрактограмм. Для изучения структуры образцов использовали оптический микроскоп Микро 200 и сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) высокого разрешения MIRA\TESCAN с приставкой для микрорентгеновского спектрального анализа (МРСА). Диаметр электронного зонда составил 5,2 нм, область возбуждения – 100 нм. Испытания механических свойств при сжатии образцов спеченных металлоалмазных блоков проводились на гидравлической испытательной машине InstronSatec 300LX; измерения микротвердости по Виккерсу выполнены на ПМТ-3 при нагрузке 200 г; износостойкость – на машине трения с возвратно-поступательным перемещением (сухое трение, нагрузка 1 МПа, скорость перемещения – 0,1 м/с, контртело – сталь).

Изготовление образцов компактированных механокомпозитов размером Ш10х10мм осуществлялось методами электроконтактного и термобарического спекания на установках ССМ-02 (плотность тока $i = 10$ кА/см², давление $P = 10$ МПа, длительность $t_{cn} = 45$ с) и ДО 138Б (давление $P = 140$ – 150 МПа, температура $T = 780$ – 800 °С; длительность $t_{cn} = 20$ с) соответственно.

Алмазосодержащие элементы с металлической связкой с неориентированным расположением синтетических поликристаллических алмазов марки APC4 (ГОСТ 9206-80) фракции 1000/800 мкм с общей массой 2 карата изготавливались методом термобарического спекания в графитовых нагревателях. Образцы правящих карандашей типоразмера 3908-0069 ГОСТ 607-80 «Карандаши алмазные для правки шлифовальных кругов» изготавливались путем пайки на стальной корпус предварительно спеченных алмазосодержащих элементов.

Испытания алмазных карандашей проводились в соответствии с ГОСТ 607-80 на круглошлифовальном станке с начальной рабочей скоростью круга – 35 м/с, скорость продольной подачи – 0,5 м/мин, поперечная подача – 0,03 мм/ход, охлаждение – эмульсия, расход 20–22 л/мин. Удельная производительность съема q (см³/мг) определялась как отношение снятого объема шлифовального абразивного круга $V_{кр}$ (см³) к израсходованной при этом массе алмазов карандаша (мг).

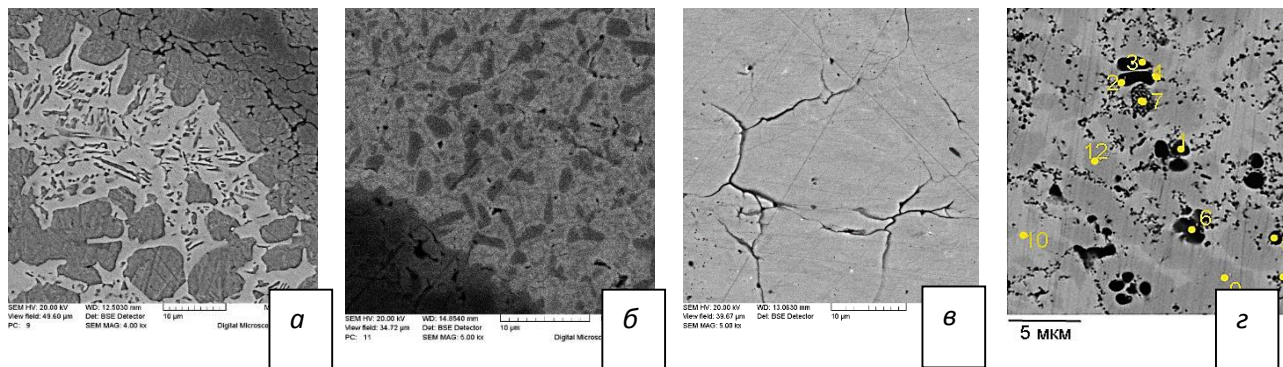
Результаты и их обсуждение. При обработке в планетарной шаровой мельнице в зависимости от дозы синтеза D порошковая смесь состава Cu+20 масс.%Sn, аналогичного связке M2-01, проходит стадии эволюции от механически активированной смеси до образования композиционных порошков в виде твердого раствора Cu/Cu(Sn) с обогащенными оловом границами зерен. По данным РФА и РСА, получаемые при дозе обработки $D = 0,42$ кДж/г механоактивированные порошки сохраняют фазовый состав (медь и олово), но имеют композиционную, фрагментированную структуру с размером кристаллитов меди $L = 40–60$ нм, а дисперсный состав порошков находится в диапазоне $d_{ч} = 10–30$ мкм (рис. 1, а). Механосинтезированные порошки в виде твердого раствора олова в меди (бронзы) Cu/Cu(Sn) с параметром $a_{Cu(Sn)} = 3,680$ Е, получаемые при дозах $D = 6–8$ кДж/г, характеризуются нанокристаллической структурой с размерами кристаллитов $L_{Cu(Sn)} = 15–16$ нм с обогащенным оловом зернограничным слоем [10]. При этом получаемые порошки имеют крупный размер частиц $d_{ч}$ Cu/Cu(Sn) = 60–160 мкм (рис. 1, б).



1 – медь, 2 – твердый раствор Cu(Sn), 3 – аппроксимируемый профиль линии
Рисунок 1 – Морфология порошков связки: а – МА, б – МХС, в – Cu-Sn-Ti

При последующем легировании механокомпозита Cu/Cu(Sn) титаном (5 масс.%) при дозе $D = 8,4$ кДж/г формируются порошки дисперсностью $d_{ч} = 15–40$ мкм в виде пересыщенного твердого раствора на основе меди ($a_{Cu(Sn,Ti)} = 3,703$ Е, $L = 6$ нм), а титан распределяется по границам зерен в рентгеноаморфном состоянии с образованием незначительного количества интерметаллида Cu₃Ti (рис. 1, в).

Предварительная механическая активация порошков системы Cu-Sn уже способствует без изменения режимов электроконтактного спекания получать материал с субмикро- и нанокристаллической структурой эвтектоида (рис. 2, а, б), при этом фаза α -Cu(Sn) является пересыщенной с содержанием олова 8.9 ат.%Sn ($a_{\text{Cu(Sn)}} = 3,702 \text{ \AA}$).



а – M2-01; б – MA- Cu-Sn; в – MXC- Cu-Sn; г – MXC Cu-Sn-Ti
Рисунок 2 – Структура материала связки

Это позволяет повысить микротвердость сплава, а также предел прочности при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ металлоалмазных композитов в 1,6 раза (до $\sigma_{\text{сж}} = 806 \text{ МПа}$) (табл. 1). Стоит отметить, что для металлалмазных композитов на связке M2-01 предел прочности при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ оказывается сопоставим с пределом текучести при сжатии материала бронзы состава M2-01 ($\sigma_{\text{T}} = 527 \text{ МПа}$), в то время как для механоактивированных связок состава Cu-Sn предел текучести повышается.

Применение термобарического спекания механосинтезированных композитов в виде твердых растворов позволяет сохранить в спеченном материале наноструктурное строение (рис. 1, б) с обогащенным зернограничной областью, что позволяет обеспечить не только повышение прочностных свойств, но и снизить скорость рекристаллизационных процессов при последующем нагреве за счет дисперсионного зернограничного упрочнения интерметаллидом δ -Cu₄₁Sn₁₁. В сравнении со связкой M2-01 микротвердость H_{μ} сплава MXC-композита Cu-20Sn после отжига при $T = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ повышается в 2,3–2,7 раза (табл. 1).

Таблица 1 – Структура и свойства медно-оловянного сплава полученного различными способами

Состав	Структурное состояние	Микротвердость H_{μ} при 20 °С / 500 °С	Предел прочности $\sigma_{\text{сж}}$ связки	Предел прочности $\sigma_{\text{сж}}$ композита	Удлинение δ , %	Интенсивность изнашивания, мг/м
Cu-20Sn	M2-01	1300–1350/ 600–800	830–889	520	18,9	0,0051– 0,0063
	MA	1460–1490/ 1320–1390	892	806	22,5	0,0041– 0,0049
	MXC-	3000–3040/ 2600–2750	986	882	19,2	0,0059– 0,0087
Cu(Sn)/Ti	MXC	3500–3750/ 3800–4000	1230	1061	30	0.0014– 0.0025

При термобарическом спекании легированного титаном механокомпозита Cu(Sn) с алмазом, имеющиеся дисперсные включения титана (рис.1 в) способствуют повышению адгезионного взаимодействия с алмазом за счет образования тонких локальных переходных зон (толщиной 2–3 мкм) с возможным образованием карбидов, что приводит к росту предела прочности композита ($\sigma_{сж} = 1061$ МПа) в 2 раза по отношению к связке М2-01 (табл.1), который оказывается сопоставимым с аналогичным показателем для связи на кобальтовой основе системы WC-Cu-Co (связка М2-05 – $\sigma_{т,} = 833$ МПа, $\sigma_{сж,} = 1097$ МПа, $H\mu = 3260–3280$ МПа [5]), при этом увеличивается пластичность композита до $\delta = 30$ %

Эксплуатационные показатели полученных экспериментальных образцов правящих карандашей 3908-0069 тип 04 (ГОСТ 607-80) (рис. 3) оценивались по результатам испытаний при правке шлифовальных кругов типоразмера 300x40x127.



Рисунок 3 – Правящие карандаши 3809-0069 тип 04 на связке МХС CuSn/Ti

Результаты эксплуатационных испытаний показали, что значения удельной производительности для правящих карандашей с применением материалов связки из наноструктурированных механокомпозитов на основе меди в 1,24 раза превышает значения для связки М2-01 (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты испытаний правящих карандашей для круга 25А 40Н СМ1 6К

Материал связки	Суммарный срезанный объем шлифовального круга $V_{кр.}$, см ³	Удельная производительность карандаша q , см ³ /мг
М2-01	12876	32,2
МА-Cu-Sn	14635	36,6
МХС-Cu(Sn)	14880	37,2
МХС-Cu(Sn)/Ti	15923	39,8

Таким образом, применение материала связки из наноструктурированного механокомпозита на основе меди может быть рекомендовано для изготовления правящего инструмента, предназначенного для операций правки шлифовальных (абразивных) кругов с твердостью связки СМ1, СМ2 и зернистостью 16–40.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Аверченков, В. И. Формообразование поверхностей с использованием инструментальных материалов СВ-алмазов / В. И. Аверченков, В. В. Надуваев, Е. Н. Фролов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. – Вып. 8., Ч. 1 – С. 306–314.
2. Коротовских, В. К. Напряженное состояние системы «зерно-связка» алмазных кругов на органических связках / В. К. Коротовских [и др.] // Вестник КГУ. Серия «Технические науки». – 2010. – № 1. – Вып. 5 – С. 115–118.
3. Сидоренко, Д. А. Связка на основе меди для изготовления алмазного инструмента / Д. А. Сидоренко [и др.]. // RU 2432249 (RU 2432249C1, опубл. 27.10.2011).
4. Шарин, П. П. Структурно-фазовое состояние межфазной зоны алмаз-металл при металлизации алмаза переходными металлами / П. П. Шарин, М. П. Акимова, В. И. Попов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – № 4. – С. 5–16.
5. Витязь, П. А. Изменение структуры и свойств спеченных сплавов под влиянием наноразмерных углеродных добавок / П. А. Витязь [и др.] // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2014. – № 4. – С. 12–18.

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТОТЕХНИКА

Заика А. В., Иголкин А. А., Илюхин В. Н.

Исследование глушителей шума выхлопа систем пневмоавтоматики 4

Кокудович Д. В., Прокопеня О. Н.

Мехатронные модули и мехатронные системы 7

Олиферович Н. М., Анкуда М. А., Карнович Д. С.

Чувствительные элементы газоанализаторов, на основе покрытий, получаемых методом магнетронного распыления 13

Сааков А. В., Прокопеня О. Н., Вабищевич Л. И.

Система управления приводом шагового конвейера 17

Супрунчук П. Д., Прокопеня О. Н., Прожижко О. Г.

Оптимальный электропривод постоянного тока 20

Ярошевич А. В.

Моделирование адаптивной системы компенсации реактивной мощности 25

НАДЕЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН

Акулич Я. А.

Влияние способа чистовой обработки поверхностей пар трения на эффективность их приработки 30

Василевич Ю. В., Неумержицкая Е. Ю., Чигарев В. А., Власов Ф. В.

Методика и анализ результатов натуральных экспериментальных исследований виброзащиты верхнего строения пути метрополитена неглубокого заложения виброизоляционными блоками ebs 34

Голуб В. М.

Технологические методы повышения надежности уплотнений валов гидромашин 37

Горбунов В. П.¹, Тюшкевич В. В.²

Ресурсные испытания технологического оборудования пищевой промышленности 41

Горбунов В. П., Тюшкевич В. В.

Прогнозирование ресурса технологического оборудования в зависимости от скорости изнашивания 45

Григорьев В. Ф., Дакало Ю. А.

Мобильные приложения для проверки шумовых характеристик металлорежущих станков 49

Дакало Ю. А., Ишин Н. Н., Гоман А. М., Скороходов А. С.

Методический подход к оценке остаточного ресурса подшипников качения по результатам вибродиагностики 53

Кострицкий В. В.	
Повышение эффективности определения технического состояния элементов электронной системы управления двигателем.....	58
Ляшук Н. У., Дакало Ю. А., Лазарук В.Р., Заречный Я.О.	
Технологическая линия убоя и разделки крупного рогатого скота	63
Ляшук Н. У., Дакало Ю. А., Данилюк Д. С., Василюк Е. Д.	
Технологическая линия убоя и разделки свиней	69
Парфиевич А. Н., Сокол В. А., Саливончик Ю. Н.	
Относительные показатели в виброакустической диагностике локальных повреждений зубчатых колес многовальных приводов	74
Савчук С. В., Парфиевич А. Н., Сокол В. А.	
Использование граблей-валкователей модели гв-9,6 в кормозаготовке	79
Шелег В. К., Ма Минь, Леванцевич М. А., Кравчук М. А.	
О применении покрытий для снижения шума металлорежущих станков	84
Шелег В. К.¹, Романович А. С². Конопляник И. А.²	
Система мониторинга нагруженности зубчатых приводов исполнительных органов горного комбайна	87
Ялковский Н. С.	
Износостойкость газотермических покрытий из оксидов в условиях гидроабразивного воздействия.....	92

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

Босяков М. Н., Моисеенко А. Н., Саханько С. А., Нерода М. В., Парфиевич А. Н.	
К вопросу об информативности параметров процесса ионного азотирования .	96
Ванюк Э.А., Соколов И.О. , Куис Д.В. , Раковец А.С. , Кришталь С.А.	
Исследование влияния нанокремниевых модификаторов на микротвердость самофлюсующегося покрытия из порошкового материала Ti-6Al-4V , оплавленного лазерным лучом	103
Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Хвиевич В.М., Сосновский А.А.	
Моделирование пробивки отверстия цилиндрическим пуансоном	107
Игнатюк В. И.	
К определению рациональных параметров подкрепления тонкостенных цилиндрических элементов, подверженных внешнему давлению.....	111
Крупнич Б., Барсуков В.Г., Хвиевич В.М. Илькевич М.А., Онысько С.Р.³	
Механизмы газоабразивного изнашивания лопаток роторов центробежных машин	116
Мицирук О. М., Нерода М. В., Веремейчик А. И.	
Особенности лазерного упрочнения сталей.....	121

Нерода М.В., Холодарь Б.Г. Моделирование работы зерен электрошлифовального круга.....	125
Овчинников Е. В.¹, Хвисевич В. М.², Эйсымонт Е. И.¹, Веремейчик А. И.², Лявшук И. А.¹ Структурные особенности функциональных композиционных материалов...	130
Онысько С.Р., Чекан Н.М., Мартиновская О.В. Определение и анализ поперечной деформации пуансона в процессе пробивки.....	133
Сазонов М. И., Ессипчук А. М., Овчинников Е. В., Хвисевич В. М., Онысько С. Р., Веремейчик А. И., Хеук М. В., Аббасов К. Т. Плазменно-дуговое упрочнение деталей и инструмента.....	138
Сотник Л. Л., Дремук В. А., Винничек К. С. Влияние амплитудных и частотных характеристик вибровалкового агрегата на производительность и энергоэффективность процесса измельчения силвинита.....	145
Хвисевич В.М., Чекан Н.М., Веремейчик А.И., Овчинников Е.В., Акула А.П. Криогенная модификация вакуумных покрытий	150
Чекан Н. М., Акула И. П.¹, Горельчик А. Н., Макаров А. В., Кузнецов В. П. Наноструктурированные покрытия AlCrN.....	154
Цыганов Д. Л., Веремейчик А. И., Сазонов М. И. Использование CVD-метода для увеличения износостойкости твердосплавных пластин из карбида ВОЛЬФРАМА Т15К6	161

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Иванов В. П., Вигерина Т. В. Повышение качества проектов производственных участков автотранспортных предприятий путем их реконструкции и технического перевооружения	166
Монтик С. В. Особенности расчета модифицированного ресурса подшипников качения....	170
Монтик С. В. Имитационное моделирование работы подразделений автосервиса	174

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Бондаренко С. В., Босяков М. Н., Жук Д. В., Капленко В. С., Моисеенко А. Н., Олешук И. Г., Поболь И. Л., Суворова О. Ю. Получение глубоких азотированных слоев на изделиях из стали 40ХМФА..	181
Грачев О. А. Идеи и традиции, заложенные академиком Борисом Евгеньевичем Патоном в исследованиях, проводимых академической наукой	186

<i>Левданский А. М.</i>	
Программа для автоматизации расчета составляющих силы резания при алмазном точении	203
<i>Медведев О. А., Апанович А. Ю. Мартынов Д. В.</i>	
Теоретико-вероятностный расчет количества неподвижных компенсаторов разной толщины при достижении точности сборки методом регулирования.....	207
<i>Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Сидоров В. А., Оковитый В. В., Володько А. С., Асташинский В. М.</i>	
Обработка лазером многослойных плазменных покрытий из материалов на основе оксидной керамики	231
<i>Пилипенко С. В., Штемпель О. П.</i>	
Оптимизация параметров калибровки холоднопрокатного инструмента для прокатки труб, используемых в гидравлических системах машин и механизмов	218
<i>Холодарь Б. Г.</i>	
Напряжения и деформации в сечении упруго-пластического стержня при реверсе нагрузки	221
<i>Шелег В. К., Жорник В. И., Ковалева С. А.</i>	
Правящие алмазные карандаши с механоактивированной медно-оловянной связкой	224

Научное издание

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

**Сборник статей
международной научно-технической конференции, посвященной
55-летию Брестского государственного технического университета**

(Брест, 29–30 сентября 2021 года)

Ответственный за выпуск: Парфиевич А. Н.
Редактор: Митлошук М. А.
Компьютерная верстка: Митлошук М. А.
Корректор: Дударук С. А.

Издательство БрГТУ.

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных
изданий № 1/235 от 24.03.2014 г., № 3/1569 от 16.10.2017 г.

Подписано в печать 27.09.2021 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.

Бумага «Performer». Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 13,7. Уч. изд. л. 14,75. Заказ № 1039. Тираж 40 экз.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Брестский государственный технический университет».

224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

ISBN 978-985-493-530-0



9 789854 935300