

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Тверской государственный технический университет»**  
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал  
№ 1 (21), 2024**

**Print ISSN 2658-5030  
Online ISSN 2687-0029**

Тверь 2024

**Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»**

**Главный редактор:** Болотов А.Н., д.т.н., профессор ТвГТУ

**Заместители главного редактора:**

Измайлов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Яблонев А.Л., д.т.н., профессор ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

**Ответственный секретарь:** Афанасьева Л.Е., к. ф.-м. н., доцент ТвГТУ

**Члены редакционной коллегии:**

*По направлению «Машиностроение»*

Гершман И.С., д.т.н., профессор ВНИИЖТ

Горячева И.Г., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор ИПМех РАН

Иванов А.С., д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Матлин М.М., д.т.н., профессор ВолгГТУ

Мигранов М.Ш., д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН»

Солдатенков И.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

*По направлению «Недропользование и горные науки»*

Валиев Н.Г., д.т.н., профессор УГГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Керопян А.М., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ООО «МНИПИИТИ»

Кондратьев А.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Мисников О.С., д.т.н., доцент ТвГТУ

Рахутин М.Г., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

*По направлению «Информационные технологии и телекоммуникации»*

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

Голенков В.В., д.т.н., профессор БГУИР, Республика Беларусь

Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н. РХТУ им. Д.И. Менделеева

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

Язенин А.В., д.ф.-м.н., профессор ТвГТУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

E-mail: [vestnik\\_tstu\\_tekh@mail.ru](mailto:vestnik_tstu_tekh@mail.ru)

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по разделам «Машиностроение», «Недропользование и горные науки», «Информационные технологии и телекоммуникации». Журнал выходит четыре раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям:

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации;

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

2.5.3. Трение и износ в машинах;

2.8.8. Геотехнология, горные машины.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Козырева Л.В., Козырев В.В., Смирнов А.В.</i> Экологически безопасная технология получения износостойкого покрытия на алюминиевых сплавах.....	5
<i>Измайлов В.В., Гусев А.Ф.</i> Влияние волнистости поверхностей на характеристики контактного взаимодействия деталей машин .....	14
<i>Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А.</i> Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия.....	21
<i>Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.</i> Влияние дисперсных наполнителей на фрикционные свойства керамических покрытий.....	26
<i>Барчуков Д.А.</i> Влияние алмазного выглаживания на структуру и свойства поверхности лазерного реза высоколегированной стали.....	36
<i>Архаров А.П.</i> Установка вала в механизированное приспособление с двумя зажимными механизмами.....	42

### НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Горлов И.В., Поletaева Е.В.</i> Синтез технологических маршрутов изготовления деталей при производстве и ремонте торфяных машин в условиях многономенклатурного производства .....	49
<i>Пухова О.В.</i> Применение вертикального дренажа для подготовки производственной площадки торфяного участка.....	60

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Котляр Д.И., Ломанов А.Н.</i> Математическая модель сканирования криволинейных поверхностей .....	69
<i>Кемайкин В.К., Козлов А.Ю., Храмычев А.А.</i> Характеристики автоматических обнаружителей малозаметных динамических объектов на слабоконтрастных изображениях, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях.....	78
<i>Яконовская Т.Б.</i> Цифровая трансформация предприятий торфяной отрасли. Часть 1. Принципы геомоделирования торфяного месторождения.....	85
<i>Зоренко Д.А.</i> САЕ-моделирование температурных полей сопла скрапового резака, охлаждаемого струей режущего кислорода, с применением сопряженного вычисления.....	95

# CONTENTS

## MECHANICAL ENGINEERING

<i>Kozyreva L.V., Kozyrev V.V., Smirnov A.V.</i> Environment safety technology of creating of a wear-resistant coating on aluminum alloy substrates.....	5
<i>Izmailov V.V., Gusev A.F.</i> Influence of surface waviness on characteristics of contact interaction of machine parts.....	14
<i>Afanasieva L.E., Sakharov K.A.</i> Powder laser cladding of a wear-resistant composite coating.....	21
<i>Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O.</i> Influence of dispens fillers on frictional properties of ceramic coatings.....	26
<i>Barchukov D.A.</i> Influence of diamond burnishing on the structure and properties of the surface of laser cutting high-alloy steel.....	36
<i>Arkharov A.P.</i> Measuring the positional deviation of holes coordinated in the angular direction and relative to the central hole of the part.....	42

## SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

<i>Gorlov I.V., Poletaeva E.V.</i> Synthesis of technological routes for manufacturing parts in the production and repair of peat machines in conditions of multiple production.....	49
<i>Pukhova O.V.</i> Application of vertical drainage for preparation of a peat site production site.....	60

## INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Kotlyar D.I., Lomanov A.N.</i> A curved surface scanning mathematical model.....	69
<i>Kemaykin V.K., Kozlov A.Yu., Khramichev A.A.</i> Characteristics of automatic detectors unobtrusive dynamic objects on low-contrast images generated by optoelectronic device in complex background conditions.....	78
<i>Yakonovskaya T.B.</i> Digital transformation of peat industry. Part 1. Principles of geomodeling of peat deposit.....	85
<i>Zorenko D.A.</i> CAE-modeling of the temperature fields of the nozzle of a scrap cutter cooled by a jet of cutting oxygen using coupled calculation.....	95

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.793.3

## ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

Л.В. КОЗЫРЕВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук, В.В. КОЗЫРЕВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
А.В. СМИРНОВ<sup>1</sup>, асп.

<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: kozyrevalara16@mail.ru

<sup>2</sup>Тверская государственная сельскохозяйственная академия  
170904, Россия, Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), 7

© Козырева Л.В., Козырев В.В., Смирнов А.В., 2024

Приведены результаты научно-исследовательской работы по созданию способа нанесения износостойкого кобальт-хромового покрытия на подложку из алюминиевого сплава путем термического разложения паров металлоорганических соединений. Указано, что способ характеризуется последовательным нанесением адгезионного слоя из смеси нитрозилтрикарбонила кобальта и газа-носителя аргона и поверхностного слоя из гексакарбонила хрома при температуре термического разложения металлоорганических соединений. Отмечено, что металлизация осуществляется по замкнутому циклу, исключающему контакт работников с токсичными веществами и выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, за счет чего обеспечивается безопасность производственного процесса. Получены покрытия с необходимыми физико-механическими свойствами, что доказывает эффективность применяемых подходов, способствует повышению износостойкости деталей и увеличению ресурса техники.

*Ключевые слова:* CVD-метод, алюминиевые сплавы, износостойкое кобальт-хромовое покрытие, упрочнение.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-5-14**

### ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация деталей из алюминиевых сплавов, работающих в сопряжении с деталями, изготовленными из конструкционных сталей, а также использование аварийно-спасательных, дорожно-строительных, почвообрабатывающих, лесозаготовительных машин и других видов техники часто происходит под воздействием агрессивных сред, сопровождается интенсивным износом. Около 60 % шестеренных насосов ежегодно подвергается ремонту из-за износа рабочих поверхностей колодцев корпуса, шестерен, поджимных пластин, валов и подшипников скольжения. Основной причиной снижения производительности насосов НШ становится увеличение зазора между цапфами валов и подшипниками скольжения. Износ подшипников, изготовленных из алюминиевого сплава АК9М2, превышает износ цапф валов (изготовлены из стали 18ХГТ, закалены до HRC 58...62) в 6...10 раз [1–3].

Для обеспечения износостойкости деталей подобных сопряжений перспективны методы их упрочнения путем осаждения металлопокрытий, характеризующихся требуемым сочетанием физико-механических и эксплуатационных свойств [4–6].

Однако из-за особенностей материала подложки (высокого содержания кремния, формирования оксидной пленки на воздухе в нормальных условиях и др.) нанесение упрочняющих покрытий, например карбидохромовых, при равномерной толщине металлического слоя до 5 мкм сопряжено с рядом технологических трудностей по обеспечению необходимой адгезии в системе «покрытие – подложка». Примеры успешного преодоления данных трудностей связаны в основном с получением комплексных покрытий, для нанесения которых применяются последовательно несколько методов металлизации [6–10]. Это значительно усложняет процесс, в том числе в аспектах обеспечения производственной и экологической безопасности всех стадий, а также снижает его экономическую эффективность.

Для устранения указанных недостатков можно рассмотреть CVD-метод (chemical vapor deposition, т.е. метод химического газофазного осаждения) металлоорганических соединений (МОС), которым наносятся функциональные покрытия на подложки сложной конфигурации и различной химической природы, в том числе изготовленные из литейных алюминиевых сплавов с высоким содержанием кремния. CVD-метод МОС характеризуется скоростью роста покрытий до 200 мкм/ч и возможностью осуществления металлизации в замкнутом цикле с контролируемым поступлением загрязняющих веществ в окружающую среду, что особенно важно для обеспечения необходимого уровня экологической безопасности технологического процесса на основе требований энергоэффективности, ресурсосбережения и малоотходности [6, 11, 12].

На базе исследования механизмов термической диссоциации МОС, поиска вариантов их совместного разложения и определения оптимальных технологических режимов металлизации могут быть созданы покрытия с требуемым химическим составом, необходимой степенью сплошности, микротвердости и прочности сцепления с подложкой.

Цель работы – разработка экологически безопасного способа получения кобальт-хромового покрытия на деталях из алюминиевых сплавов для повышения их износостойкости и увеличения ресурса сборочных единиц.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для того чтобы получить покрытия, применяли CVD-метод нитрозилтрикарбонила кобальта  $\text{Co}(\text{CO})_3\text{NO}$  и гексакарбонила хрома  $\text{Cr}(\text{CO})_6$ .

Металлизацию поверхности подложек (деталей) из алюминиевого сплава АК9М2 (ГОСТ 1583-93) осуществляли на лабораторно-промышленной установке, предназначенной для нанесения многослойных покрытий (рис. 1).

Металлизацию проводили следующим образом. В реакторе 1 (рис. 1) осуществляли монтаж подложек; включением вакуум-насоса 2, оснащенного вакуумметром 3, создавали остаточное давление 10 Па. Посредством подвода инертного газа через расходомер 4 осуществляли продувку системы аргоном (скорость подачи – 60 л/ч). Подложку прогревали до температуры 400 °С. Затем из испарителя 5 в реактор со скоростью 1,5 л/ч вводили нагретые термостатом 6 до температуры 20 °С пары нитрозилтрикарбонила кобальта и в течение 5 минут наносили слой покрытия толщиной до 2 мкм. Далее подачу паров нитрозилтрикарбонила кобальта прекращали. Из сублиматора 7 в реактор со скоростью 1,5 л/ч подавали нагретые до температуры 40 °С пары гексакарбонила хрома и в течение 3 минут наносили слой кобальт-хромового покрытия толщиной до 1,5 мкм. Затем подачу паров гексакарбонила хрома прекращали, нагреватель выключали и осуществляли выдержку, охлаждение, демонтаж подложек [13].

Для обеспечения требуемого уровня ресурсосбережения и экологической безопасности технологического процесса установка оснащена регулировочными клапанами 8, расходомером МОС 9, а также печью доразложения паров реагентов 10. Для обеспечения очистки выбросов от оксидов и карбидов металлов и сажи (продукты термической диссоциации МОС) установлен тканевый фильтр тонкой очистки 11.

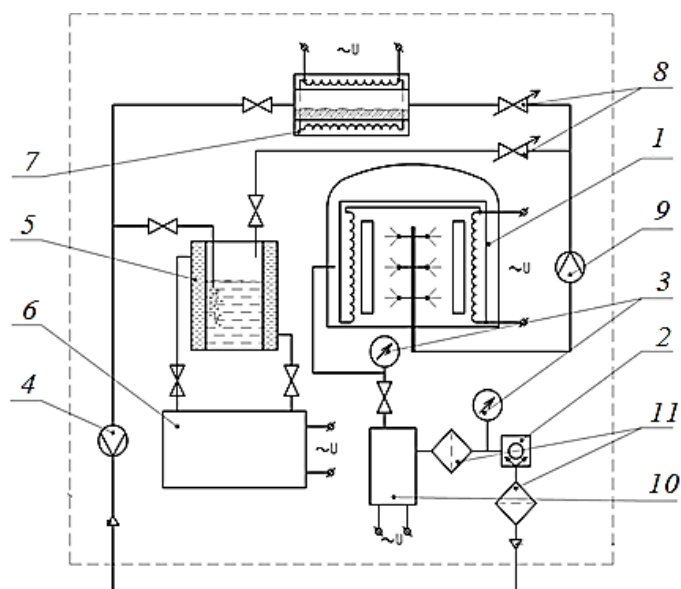


Рис. 1. Схема установки для нанесения многослойных покрытий CVD-методом МОС

Изучение качества полученных покрытий на срезе производили с помощью двулучевой системы (small dual beam, FIB-SEM) в растровом электронном микроскопе Quanta 3D FEG; элементный состав покрытий определяли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Исследование, связанное с определением микротвердости, проводили на образцах в соответствии с ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Прочность сцепления полученных покрытий с подложкой определяли штифтовым методом на испытательной машине FP-10/1. Шероховатость поверхности покрытий проверяли методом ощупывания с использованием профилометра MarSurf PS1. Исследование износостойкости в стендовых испытаниях проводили на испытательной машине модели СМЦ-2 с образцами типа «диск – колодка». Кобальт-хромовые покрытия наносили на поверхность диска, изготовленного из алюминиевого сплава АК9М2 (ГОСТ 1583-93), колодку изготавливали из стали 18ХГТ (ГОСТ 4543-71), закаленной до HRC 58...62. Также исследовали износостойкость сопряжения «подшипник скольжения – цапфа вала» шестеренных насосов НШ-50У. В качестве рабочей жидкости применяли масло индустриальное И20 (ГОСТ 20779-75). Для обеспечения ускоренного изнашивания в рабочую жидкость добавляли абразив, приготовленный из кварцевого формовочного песка (ГОСТ 2138-84) с дисперсностью 3 мкм. Содержание абразивного материала в рабочей жидкости составляло  $3 \pm 0,5$  % по массе масла [11, 13].

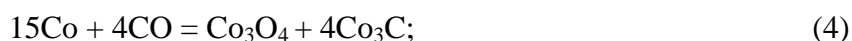
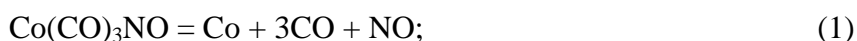
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для деталей узлов трения, эксплуатирующихся под воздействием абразивных частиц (частиц кварцевого песка), поверхностная твердость должна превышать твердость абразива, составляя не менее 11 ГПа. Этому критерию отвечают карбидохромовые покрытия, полученные CVD-методом  $\text{Cr}(\text{CO})_6$  (микротвердость – до 19 ГПа) [6]. Однако формирование качественного покрытия непосредственно на алюминиевых подложках сопряжено с рядом сложностей, вызванных крайне низкой адгезионной совместимостью подложки и покрытия. Требуется нанесение промежуточного (адгезионного) слоя покрытия, микротвердость которого будет ближе к микротвердости алюминиевого сплава по сравнению с карбидохромовым покрытием, что приведет к снижению переходных внутренних напряжений в системе «покрытие – подложка», и, соответственно, повысит прочность их сцепления. При этом необходима технологическая совместимость МОС, составляющего основу промежуточного слоя, и гексакарбонила хрома в общем цикле металлизации [7, 10, 14].

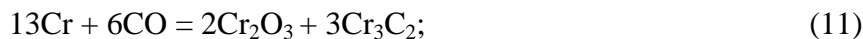
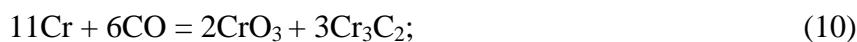
Для формирования адгезионного слоя покрытия в качестве реагента выбран нитрозилтрикарбонил кобальта, имеющий сходный с  $\text{Cr}(\text{CO})_6$  диапазон температуры разложения (90...230 °С). Следовательно, не меняя температуру нагрева подложки, можно получить оптимальную скорость разложения обоих МОС в одном цикле металлизации. При этом микротвердость кобальтовых покрытий, полученных CVD-методом, в зависимости от вида МОС и сочетания технологических факторов металлизации (температурного режима и давления в реакторе, скорости подачи реагентов, концентрации паров МОС и пр.), составляет от 1,5 до 8 ГПа [12].

При исследовании термодинамики процесса и стехиометрии выявлен перечень химических реакций, протекающих на всех стадиях металлизации, и определен потенциальный химический состав покрытия, в том числе соотношение основных металлов и примесей в виде оксидов углерода и азота, оксидов и карбидов кобальта и хрома [12, 15, 16].

При формировании адгезионного слоя кобальтового покрытия на поверхности алюминиевой подложки возможно протекание реакций (1)–(6):



При нанесении хрома на поверхность подложки осуществляются реакции (7)–(12):





Основные реакции термической диссоциации нитрозилтрикарбонила кобальта и гексакарбонила хрома описаны уравнениями (1) и (7) соответственно. Согласно данным термодинамического анализа, в результате реакций (2)–(5) в адгезионном слое могут присутствовать нежелательные примеси  $\text{CoO}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и  $\text{Co}_3\text{C}$ , которые способны провоцировать образование дефектов в покрытии [12]. При этом реакции (3) и (5) в заданном диапазоне температурного режима (350...450 °С) протекают с наибольшей глубиной превращения. В ходе реакции (6) возможно образование оксида азота (IV), который является активным катализатором окисления металлов. Для снижения вероятности протекания данной реакции CVD-процесс осуществляется в среде инертного газа.

В поверхностном слое покрытия помимо  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  возможно присутствие соединений  $\text{CrO}_2$ ,  $\text{CrO}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , формирующихся при реализации реакций (8)–(12).

На рис. 2 представлена структура кобальт-хромового покрытия, полученного в заданном режиме ведения CVD-процесса на образце из алюминиевого сплава АК9М2 (ГОСТ 1583-93).

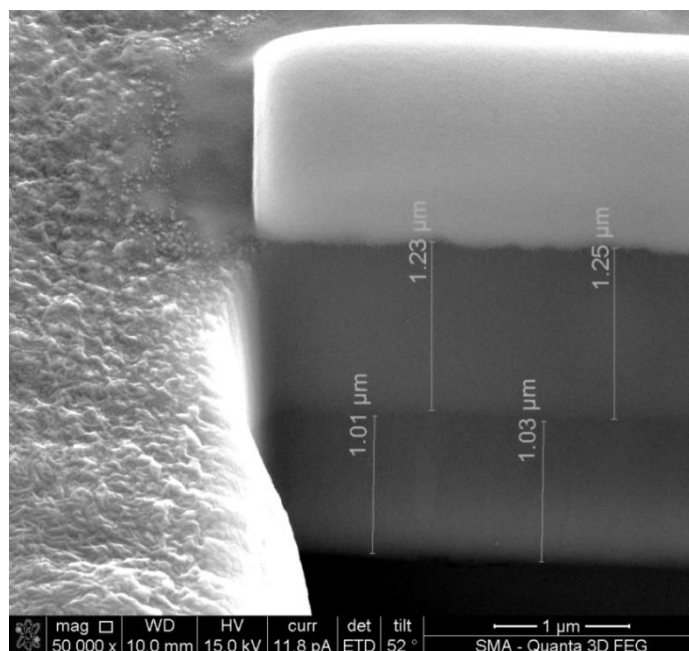
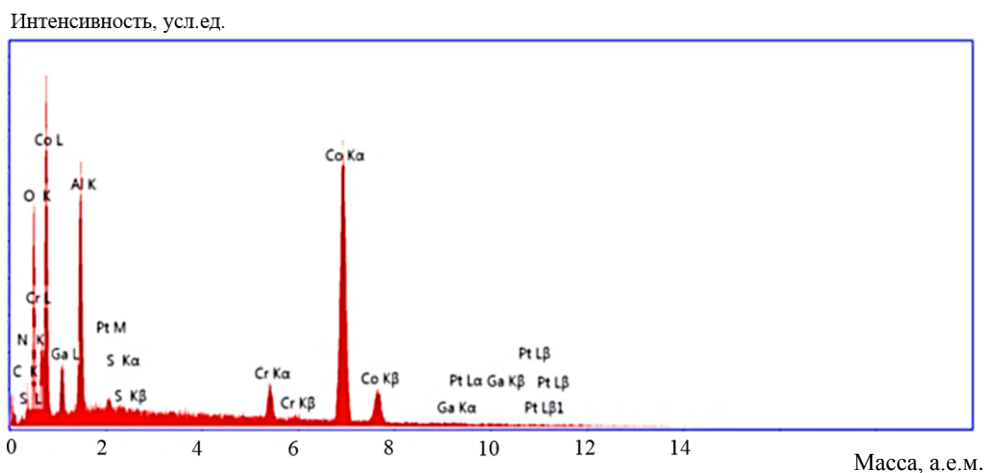


Рис. 2. Изображение кобальт-хромового покрытия на образце

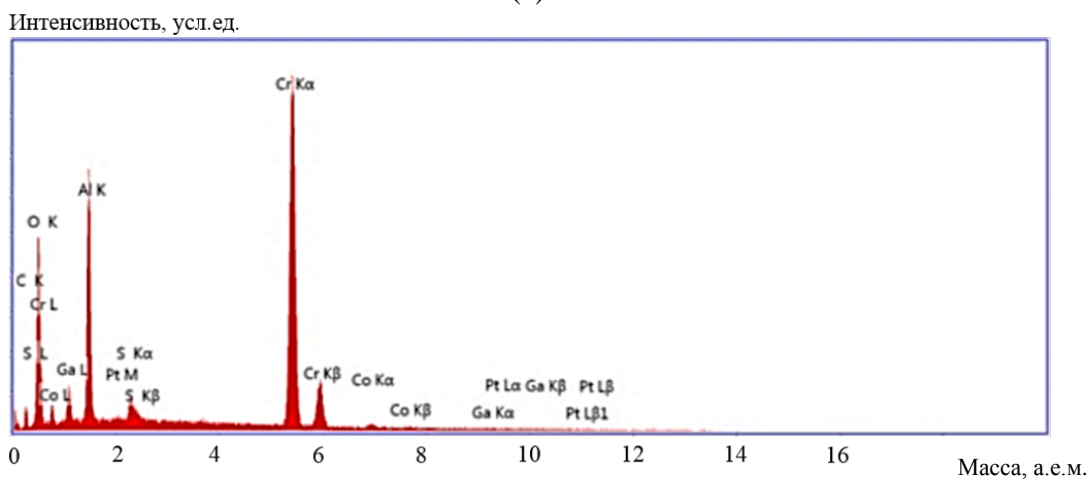
Покрытие характеризуется слоистой структурой. Толщина адгезионного и поверхностного слоев составила 1,00...1,05 и 1,20...1,25 мкм соответственно.

Слои гомогенны, внутренняя структура мелкокристаллическая. На границе слоев не зафиксировано явных дефектов и пор, что свидетельствует о частичной диффузии наносимых материалов и, как результат, о хорошей адгезии покрытия к подложке. В составе адгезионного и поверхностного слоев присутствуют химические соединения обоих металлов, что также подтверждает вероятность активной диффузии при последовательном разложении  $\text{Co}(\text{CO})_3\text{NO}$  и  $\text{Cr}(\text{CO})_6$  в едином цикле металлизации. Адгезионный слой покрытия состоит из кобальта с незначительным содержанием оксидной и карбидной фаз. Поверхностный слой покрытия насыщен карбидом хрома (рис. 3). Это согласуется с результатами теоретических исследований термодинамической возможности осуществления основных и побочных реакций термической диссоциации  $\text{Co}(\text{CO})_3\text{NO}$  и  $\text{Cr}(\text{CO})_6$  в CVD-процессе.



Элемент	Количество	
	% масс.	% ат.
C	1,04	3,6
N	3,17	9,42
O	6,26	16,31
Al	8,18	12,63
S	0,23	0,3
Cr	3,72	2,96
Co	77,41	54,76

(а)



Элемент	Количество	
	% масс.	% ат.
C	3,83	12,06
O	6,55	15,73
Co	4,3	2,76
Al	10,23	14,34
S	1,26	149
Cr	73,73	63,63

(б)

Рис. 3. Результаты масс-спектро스코пического анализа покрытий: адгезионный слой (а); поверхностный слой (б)

Прочность сцепления кобальт-хромового покрытия с подложкой составила 80...90 МПа. Максимальная микротвердость покрытий (18 ГПа) получена при температуре подложки 400 °С. С изменением температуры нагрева подложки (понижение до 350 °С или повышение до 450 °С) покрытие приобретало вертикально-столбчатую структуру, морфология поверхности образцов становилась высокодисперсной, «зернистой». Повышение температуры способствовало разогреву среды вокруг подложки и диссоциации исходных реагентов в объеме реактора с выделением высокодисперсного углерода, который «загрязнял» поверхность подложки, формируя дефекты в виде пор с включениями частиц сажи. При понижении температуры возникали сложности с получением равномерного покрытия необходимой толщины. Это приводило к нежелательным изменениям микротвердости (12...14 ГПа) и прочности сцепления покрытия с подложкой (30...60 МПа).

В качестве примера эффективности применения разработанных материалов проведены сравнительные стендовые испытания сопряжений «подшипник скольжения – цапфа вала» шестеренных насосов НШ-50У с серийными подшипниками, а также подшипниками, упрочненными пластической деформацией и нанесением кобальт-хромового покрытия CVD-методом МОС; определена износостойкость сопряжений (рис. 4).

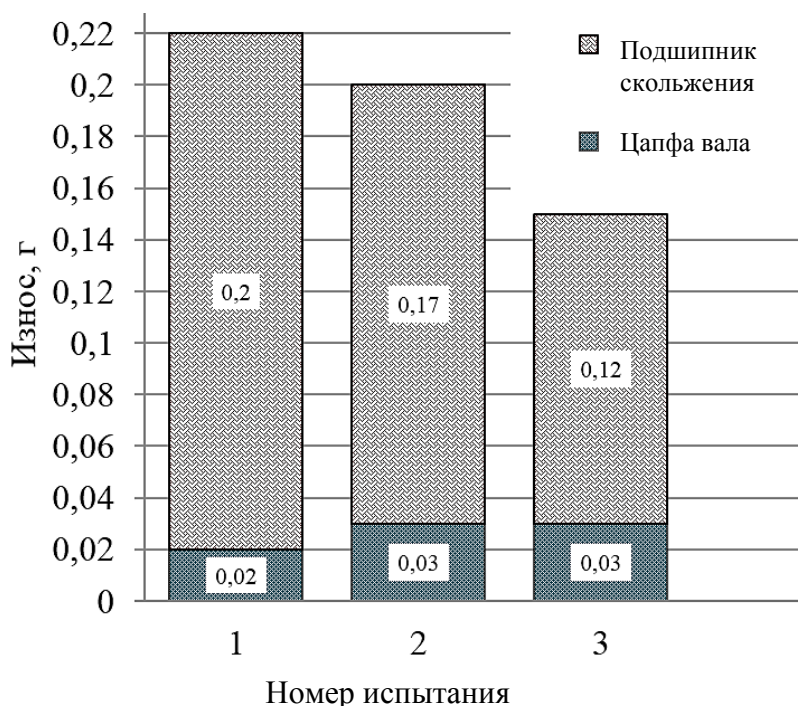


Рис. 4. Износ деталей в сопряжении «подшипник скольжения – цапфа вала»: 1 – сопряжения с серийными подшипниками; 2 – сопряжения с подшипниками, упрочненными пластической деформацией; 3 – сопряжения с подшипниками, упрочненными нанесением кобальт-хромового покрытия CVD-методом МОС

Установлено, что все подшипники имели одинаковый характер износа, отслоения или скалывания кобальт-хромового покрытия не наблюдалось. Наибольшей износостойкостью обладали сопряжения с подшипниками, упрочненными посредством нанесения кобальт-хромового покрытия (средний суммарный износ деталей в сопряжении не более 0,15 г).

Разработанные кобальт-хромовые покрытия рационально применять для упрочнения деталей из алюминиевых сплавов, работающих в сопряжениях с деталями, изготовленными из конструкционных сталей. Результаты исследований могут быть использованы при изготовлении аварийно-спасательных, дорожно-строительных, почвообрабатывающих, сельскохозяйственных, лесозаготовительных машин.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан способ получения кобальт-хромового покрытия на подложках из алюминиевых сплавов CVD-методом МОС; определены оптимальные технологические режимы стадий металлизации: температура подложки  $400 \pm 10$  °С, остаточное давление в системе  $15 \pm 5$  Па, скорость подачи аргона  $60 \pm 5$  л/ч, скорость подачи паров МОС  $1,5 \pm 5$  л/ч. Формирование адгезионного слоя происходит при температуре нагрева нитрозилтрикарбонила кобальта от 18 до 23 °С, формирование поверхностного карбидохромового слоя – при температуре нагрева гексакарбонила хрома от 35 до 45 °С.

При изучении морфологии и элементного состава кобальт-хромового покрытия установлено, что покрытие имеет плотную слоистую структуру с незначительным количеством дефектов. Последовательное термическое разложение нитрозилтрикарбонила кобальта и гексакарбонила хрома в одном цикле металлизации способствует диффузионному насыщению покрытия (адгезионного и поверхностного слоев) кобальтом и хромом, обеспечивая общую гомогенность структуры при минимальном значении остаточных напряжений в системе «адгезионный слой – подложка» и максимальном насыщении основного слоя карбидом хрома.

Получение кобальт-хромового покрытия осуществлено с учетом требований экологической безопасности: не вступившие в реакцию МОС, а также продукты реакции, не вошедшие в состав покрытия, направляются в печь доразложения паров реагентов для термического обезвреживания. Снижение риска негативных последствий от использования токсичного МОС (а именно  $\text{Co}(\text{CO})_3\text{NO}$ ) в технологическом процессе достигается автоматизацией работ на этапе введения МОС в испаритель, герметичностью испарителя и реактора установки для нанесения многослойных покрытий CVD-методом.

При нанесении кобальт-хромового покрытия на подложки из алюминиевых сплавов получают оптимальные для эксплуатации сочетания значений износа в парах трения с деталями, изготовленными из конструкционных сталей (0,15...0,20 г); микротвердости 17...18 ГПа; прочности сцепления 80...90 МПа; шероховатости ( $R_a = 0,16...0,32$  мкм) полученных покрытий с подложкой, что обеспечивает увеличение износостойкости упрочняемых деталей в 2,0...2,5 раза по сравнению с серийно выпускаемыми деталями.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зуевский В.А., Климюк Д.О., Шемберев И.А. Причины потери работоспособности шестеренчатого наноса и методы их устранения // *Технический сервис машин*. 2020. № 3 (140). С. 98–107.

2. Столяров А.В., Червяков С.В., Рогонова О.В. Исследование износов деталей регулируемых аксиально-поршневых насос-моторов // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2021. Т. 13. № 4. С. 159–166.

3. Сидристый Д.В., Дихтиевская К.К., Просвирнин Д.В., Апхудов Х.А. Изменение структуры и микротвердости стали 18ХГТ в результате износа шестерни гидронасоса // *Гидравлика*. 2022. № 14. С. 52–62.

4. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О влиянии упрочняющей обработки поверхностей трения на ресурс трибосопряжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 4–12.

5. Carr G.E., Conde R.H. Tribology of Hard Coating Alloys Deposited by Thermal Methods: Applications to Industrial Components // *Surface and Coatings Technology*. 2008. V. 203. № 5–7. P. 685–690.

6. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятов Н.Н. Способы модифицирования поверхностей трения деталей машин. М.: СГТУ им. В.П. Горячкина. 2014. 140 с.

7. Гафуров И.И., Панарин А.В. Пиролитическое хромирование как способ упрочняющей обработки литейных алюминиевых сплавов с высоким содержанием кремния // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2015. Т. 16. № 6 (2). С. 412–415.

8. Абрамов А.А. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. Достижения и перспективы. Ч. II. Технологические процессы // *Литейное производство*. 2021. № 3. С. 2–8.

9. Патент РФ 2569199. Способ осаждения износостойкого покрытия на алюминиевые сплавы с высоким содержанием кремния / Каблов Е.Н., Семенычев В.В., Салахова Р.К., Панарин А.В., Тихообразов А.Б.; Заявл. 10.06.2014. Оpubл. 20.11.2015. Бюл. № 32.

10. Семенычев В.В., Смирнова Т.Б., Панарин А.В. Электрохимическая совместимость литейных алюминиевых сплавов с карбидохромовым покрытием // *Коррозия: материалы, защита*. 2016. № 7. С. 7–11.

11. Козырева Л.В. Обеспечение экологической безопасности при организации малых инновационных предприятий технического сервиса. Тверь: ТвГТУ. 2019. 160 с.

12. Сыркин В.Г. CVD-метод. Химическая парофазная металлизация. М.: Наука. 2000. 496 с.

13. Патент РФ № 2791115. Способ нанесения износостойкого кобальт-хромового покрытия на подложки из алюминиевых сплавов / Козырева Л.В., Голубева Е.Б., Козырев В.В.; Заявл. 13.10.2022. Оpubл. 02.03.2023. Бюл. № 7.

14. Щитов Н.Н., Лозован А.А. Совершенствование технологии нанесения защитных хромовых покрытий осаждением из металлоорганических соединений // *Сварочное производство*. 2020. № 12. С. 43–51.

15. Алешин Н.П., Коберник Н.В., Панкратов А.С., Петрова В.В. Термодинамическое моделирование образования карбидов хрома в наплавленном металле // *Вестник машиностроения*. 2020. № 7. С. 67–71.

16. Vasiliev V.Y., Morozova N.B., Basova T.V., Igumenov I.K., Hassan A. Chemical Vapor Deposition of IR-based Coatings: Chemistry, Processes and Applications // *RSC Advances*. 2015. V. 5. № 41. P. 32034–32063.

**Для цитирования:** Козырева Л.В., Козырев В.В., Смирнов А.В. Экологически безопасная технология получения износостойкого покрытия на алюминиевых сплавах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 5–14.

## ENVIRONMENT SAFETY TECHNOLOGY OF CREATING OF A WEAR-RESISTANT COATING ON ALUMINUM ALLOY SUBSTRATES

L.V. KOZYREVA<sup>1</sup>, Dr. Sc., V.V. KOZYREV<sup>2</sup>, Dr. Sc., A.V. SMIRNOV<sup>1</sup>, Postgraduate

<sup>1</sup>Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: kozerevalara16@mail.ru

<sup>2</sup>Tver State Agricultural Academy  
7, Marshal Vasilevskij sr. (Saharovo), Tver, 170904

The results of research work on the creation of a method of applying wear-resistant cobalt-chromium coating on aluminium alloy substrate by thermal decomposition of organometallic compound vapours are presented. It is stated that the method is characterised by sequential application of an adhesive layer of a mixture of nitrosyltricarboxyl cobalt and argon carrier gas and a surface layer of chromium hexacarbonyl at the temperature of thermal decomposition of organometallic compounds. It is noted that metallisation is carried out in a closed cycle, excluding the contact of workers with toxic substances and emissions of pollutants into the atmosphere, thus ensuring the safety of the production process. Coatings with necessary physical and mechanical properties are obtained, which proves the effectiveness of the applied approaches, contributes to the increase of wear resistance of parts and the increase of the service life of machinery.

*Keywords:* CVD-method, aluminum alloy, wear-resistant cobalt-chromium coating, hardening.

Поступила в редакцию/received: 02.10.2023; после рецензирования/revised: 16.10.2023;  
принята/accepted: 23.10.2023

УДК 539.3

## ВЛИЯНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Гусев А.Ф., 2024

Исследовано влияние волнистости технических поверхностей на контактное взаимодействие деталей машин. Приведены параметры шероховатости и волнистости поверхностей экспериментальных образцов по ГОСТ Р ИСО 4287-2014, механические свойства материалов образцов, дано описание методики эксперимента. Предложены теоретические зависимости контурной площади контакта от номинального давления, параметров шероховатости и волнистости контактирующих поверхностей и механических свойств материалов контактирующих деталей. Теоретически и экспериментально показано, что волнистость существенно влияет на величину площади контакта деталей машин. Отмечено, что в зависимости от величины номинального контактного давления контурная площадь, образовавшаяся в результате упругой

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (21), 2024*

деформации волн, составляет от нескольких единиц до нескольких десятков процентов от номинальной площади контакта.

*Ключевые слова:* контактное взаимодействие, шероховатость, волнистость, контурная площадь контакта.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-14-20**

## ВВЕДЕНИЕ

Вследствие шероховатости и волнистости поверхностей деталей машин их контакт является дискретным и осуществляется на малых площадках, которые образуются в результате деформации отдельных неровностей под действием приложенной к контакту сжимающей нагрузки.

В механике контактного взаимодействия технических поверхностей плодотворной оказалась концепция трех площадей контакта: номинальной, контурной и фактической.

Номинальная площадь контакта  $A_n$  соответствует геометрическим размерам детали и задается чертежом. Площадки фактического контакта неровностей шероховатости  $\Delta A_{ri}$  в сумме составляют фактическую площадь контакта (ФПК)  $A_r = \sum \Delta A_{ri}$ . Они группируются на контурных площадках контакта отдельных волн  $\Delta A_{ci}$ , которые в сумме образуют контурную площадь контакта (КПК)  $A_c = \sum \Delta A_{ci}$ . Фактическая площадь контакта обычно составляет от номинальной десятые и сотые доли процента, при больших контактных нагрузках может достигать до нескольких процентов. Контурная площадь от номинальной составляет десятые или сотые доли в зависимости от нагрузки на контакт, однако при малых размерах контактирующих тел может стремиться к номинальной.

Понятие КПК впервые было введено в работах Н.Б. Демкина [1]. Оно позволило уточнить расчеты таких характеристик контактного взаимодействия, как контактная жесткость, контактная электро- и теплопроводность и др. Однако использование понятия КПК в расчетных методиках осложнялось отсутствием нормативных документов на характеристики волнистости, а также соответствующего метрологического обеспечения их измерения. ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 25142-82 нормируют только параметры шероховатости. Лишь с появлением ГОСТ Р ИСО 4287-2014 параметры волнистости были включены в число нормированных параметров рельефа технических поверхностей. Современные приборы для измерения этих параметров, в том числе профильным методом, позволяют путем фильтрации первичного профиля разделять его на профилограмму и волнограмму и рассчитывать нормируемые и нестандартные параметры шероховатости и волнистости.

Цели настоящей работы заключаются в экспериментальной оценке влияния волнистости технических поверхностей на площадь контакта деталей машин и теоретическом описании зависимости КПК от параметров микрогеометрии поверхностей и механических свойств материалов контактирующих деталей.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

В том случае, когда шероховатость и волнистость имеют высоту одного порядка, необходимо в расчетах характеристик контакта учитывать их совместную деформацию. Эта задача решается на основании следующих предпосылок [2]. Волны считаются сферическими (по крайней мере, выше средней плоскости), поэтому КПК имеют форму круга (в общем случае эллипса). Наличие шероховатости трансформирует эпюру давления на КПК (рис. 1). При этом радиус площадки контакта увеличивается по сравнению с герцевским радиусом, следовательно, КПК двух шероховатых волн  $\Delta A_c$  пре-

восходит значение площади контакта двух гладких  $\Delta A_{cH}$  по Герцу:

$$\Delta A_c = \Delta A_{cH}(1 + 2\Phi)(1 + \Phi)^{-\frac{1}{2\nu+5}}, \quad (1)$$

где  $\Delta A_{cH} = \pi \left( \frac{3}{4} \frac{Nr}{E^*} \right)^{\frac{2}{3}}$ ;  $\Phi$  – безразмерный комплекс физико-механических и геометрических параметров:

$$\Phi = \frac{1}{2} \left( \frac{R_p}{r} \right) \cdot \left( \frac{R_p}{\rho} \right)^{-\frac{1}{2\nu+1}} \left( \frac{4}{3} \frac{E^* r^2}{N} \right)^{\frac{4\nu}{3(2\nu+1)}} \quad (2)$$

( $R_p$  – максимальная высота пика (выступа) профиля шероховатости;  $\rho$  – средний радиус кривизны вершин выступов профиля шероховатости;  $r$  – радиус сферической поверхности;  $\nu$  – параметр, характеризующий функцию распределения высот выступов шероховатости;  $E^*$  – эквивалентный модуль упругости). Параметр  $\nu$  входит в качестве показателя степени в аппроксимацию опорной кривой [3] и определяется по формуле  $\nu = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1$ , где  $t_m$  – относительная опорная длина профиля шероховатости на уровне средней линии,  $R_a$  – арифметическое среднее отклонение профиля шероховатости.

В формуле (2) безразмерный комплекс  $(R_p/r)$  характеризует относительную толщину шероховатого слоя; безразмерный комплекс  $(R_p/\rho)$  характеризует форму выступов; безразмерный комплекс  $\left( \frac{4}{3} \frac{E^* r^2}{N} \right)$  характеризует степень нагруженности контакта.

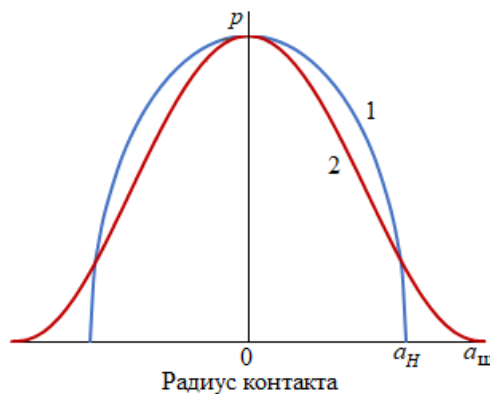


Рис. 1. Распределение нормального давления  $p$  по радиусу контакта сферических тел: 1 – гладких; 2 – шероховатых;  $a_H$  – радиус контакта по Герцу;  $a_ш$  – радиус контакта с учетом шероховатости

Обобщение зависимости (1) на случай контакта волнистых поверхностей с учетом распределения волн по высоте связано с рядом аппроксимаций, поэтому приведем окончательное выражение для расчета КПК  $A_c$  шероховатых волнистых поверхностей:

$$A_c = A_n K_w v_w \left( \frac{t_m v_w}{2\pi} \right)^{\frac{v_w}{2(v_w+\delta)}} \left( \frac{W S m}{W_p} \right)^{\frac{v_w}{v_w+\delta}} \left( \frac{p_n}{E^*} \right)^{\frac{v_w}{v_w+\delta}}, \quad (3)$$

где коэффициент  $K_w = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{R_p}{W_p}$ , параметр  $\delta = \frac{1}{2} + 0,8 \left( \frac{R_p}{W_p} \right)^{\frac{2}{3}}$ ;  $A_n$  – номинальная площадь контакта;  $v_w$  – параметр, характеризующий функцию распределения волн по



высоте (аналогичен параметру  $v$  для шероховатости);  $t_{mw}$  – относительная опорная длина профиля волнистости на уровне средней линии (аналогично  $t_m$  для шероховатости);  $W_p$  – максимальная высота пика (выступа) профиля волнистости;  $W_{Sm}$  – средняя ширина элементов профиля волнистости (средний шаг волн).

Параметры  $Ra$ ,  $Rp$ ,  $Wp$ ,  $WSm$  стандартные<sup>1</sup> (ГОСТ Р ИСО 4287-2014), а параметры  $v$ ,  $v_w$ ,  $t_m$ ,  $t_{mw}$  – нестандартные, однако последние часто используются в механике контактного взаимодействия и трибологии.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТУРНОЙ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА

Для исследования КПК номинально плоских волнистых поверхностей были изготовлены образцы цилиндрической формы диаметром 20 мм и высотой 25 мм. Торцевая поверхность образцов была обработана цилиндрической фрезой на горизонтально-фрезерном станке. Образцы обрабатывали при различных режимах, в результате чего были получены поверхности с различной микрогеометрией.

Для расчета КПК шероховатых волнистых поверхностей необходимо знать механические характеристики материалов контактирующих деталей и параметры шероховатости и волнистости. Механические характеристики материалов исследованных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Механические характеристики волнистых образцов

№ образца	Материал	Микротвердость $H$ , МПа	Модуль Юнга $E$ , ГПа
1, 2	Сталь У8	9 000	209
3–6	Сталь 45	4 460	209
7, 8	Сталь 12Х18Н9Т	4 600	195
9, 10	Бронза БрБ2	3 320	127
11, 12	Алюминий АД1	420	70

Микротвердость определялась с помощью прибора ПМТ-3 по стандартной методике ГОСТ 9450-76, значения модуля упругости были приняты на основании справочных данных.

Для установления КПК был использован метод тонких угольных пленок – один из вариантов метода определения площадок контакта с помощью информаторов [3]. Этот метод в оригинале предназначен для определения ФПК и предполагает достаточно жесткие требования к качеству подготовки образцов и нанесению слоя информатора на их поверхность. Слой угольной пленки и подслоя – тонкая пленка смазки – должны наноситься испарением в вакууме. В настоящее время способ является отработанным, хотя и может давать значительную погрешность, так как с увеличением толщины пленки отдельные отпечатки пятен фактического контакта

<sup>1</sup> Параметры, нормируемые ГОСТ Р ИСО 4287-2014, обозначаются двумя и более символами ( $Rp$ ,  $RSm$  и т.п.). Такие обозначения неудобны для использования в математических выражениях, особенно в научных публикациях, так как составное обозначение из нескольких символов может быть ошибочно интерпретировано как произведение нескольких количественных величин. Эта проблема решена в российском стандарте ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014. В данном нормативном документе за каждым термином следует его параметр (сокращенный термин), а затем его символ, состоящий из одной буквы с индексом (при необходимости), например  $Sq$ ,  $S_q$  или  $Smr(c)$ ,  $S_{mr}(c)$ . В настоящей статье мы придерживаемся такого же принципа: в тексте для обозначения параметра используется сокращенный термин, а в уравнениях – соответствующий символ.

могут сливаться друг с другом. Поскольку для определения КПК это обстоятельство не влияет на конечный результат измерения, то способ угольных пленок можно перенести на измерения КПК, значительно упростив методику.

Образцы промывали в бензине, исследуемую поверхность очищали ацетоном и спиртом и протирали насухо. На поверхность наносили тонкий слой технического вазелина. Затем поверхность протирали хлопчатобумажной тканью и на нее наносили тонкий слой ламповой копоти (пламенной сажи). Толщину полученной угольной пленки контролировали визуально и по цвету пленки.

Контакт образца, на поверхность которого был нанесен слой информатора, и образца, имеющего чистую поверхность, осуществляли на приборе для измерения контактных деформаций [3]. Нормальная сжимающая нагрузка прикладывалась при помощи ходового винта и контролировалась по образцовому динамометру сжатия. Номинальное давление в экспериментах составляло от 1 до 15 МПа. Контурную площадь контакта определяли планиметрированием увеличенного изображения поверхности образцов. Параметры микрогеометрии поверхностей исследованных образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры микрогеометрии образцов

№ образца	Шероховатость			Волнистость		
	$R_p$ , мкм	$R_{Sm}$ , мм	$tm$	$W_p$ , мкм	$W_{Sm}$ , мм	$tmw$
1	2,5	0,25	0,55	5,1	3,3	0,54
2	0,8	0,07	0,56	0,9	4,8	0,61
3	13	0,23	0,44	32	3,5	0,39
4	20	0,29	0,50	19	2,1	0,48
5	10	0,21	0,50	12	1,5	0,43
6	14	0,17	0,41	13	1,4	0,47
7	5,0	0,32	0,59	15	2,3	0,43
8	6,5	0,25	0,37	15	2,3	0,45
9	6,1	0,25	0,53	14	3,0	0,45
10	7,5	0,28	0,51	12	2,7	0,53
11	8,0	0,35	0,50	31	3,4	0,38
12	8,0	0,28	0,53	24	3,0	0,39

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные значения относительной КПК приведены на рис. 2 в сравнении с теоретическими зависимостями по формуле (3). Расчетные зависимости КПК от номинального давления в основном разумно согласуются с характером экспериментальных зависимостей (пунктирные линии на рис. 2), при этом отклоняются от последних как в большую, так и в меньшую сторону. Это свидетельствует о случайном характере данных отклонений.

Оценивая расхождения теоретических и экспериментальных зависимостей КПК от номинального давления, следует учитывать следующее. Контурная площадь оказывает сравнительно небольшое влияние на основные характеристики контакта шероховатых поверхностей – ФПК, число и размер пятен фактического контакта. Например, ФПК шероховатых поверхностей зависит от контурной площади в степени  $1/5$  и менее, так что 50%-я погрешность в величине КПК дает ошибку в величине ФПК менее 10 %.

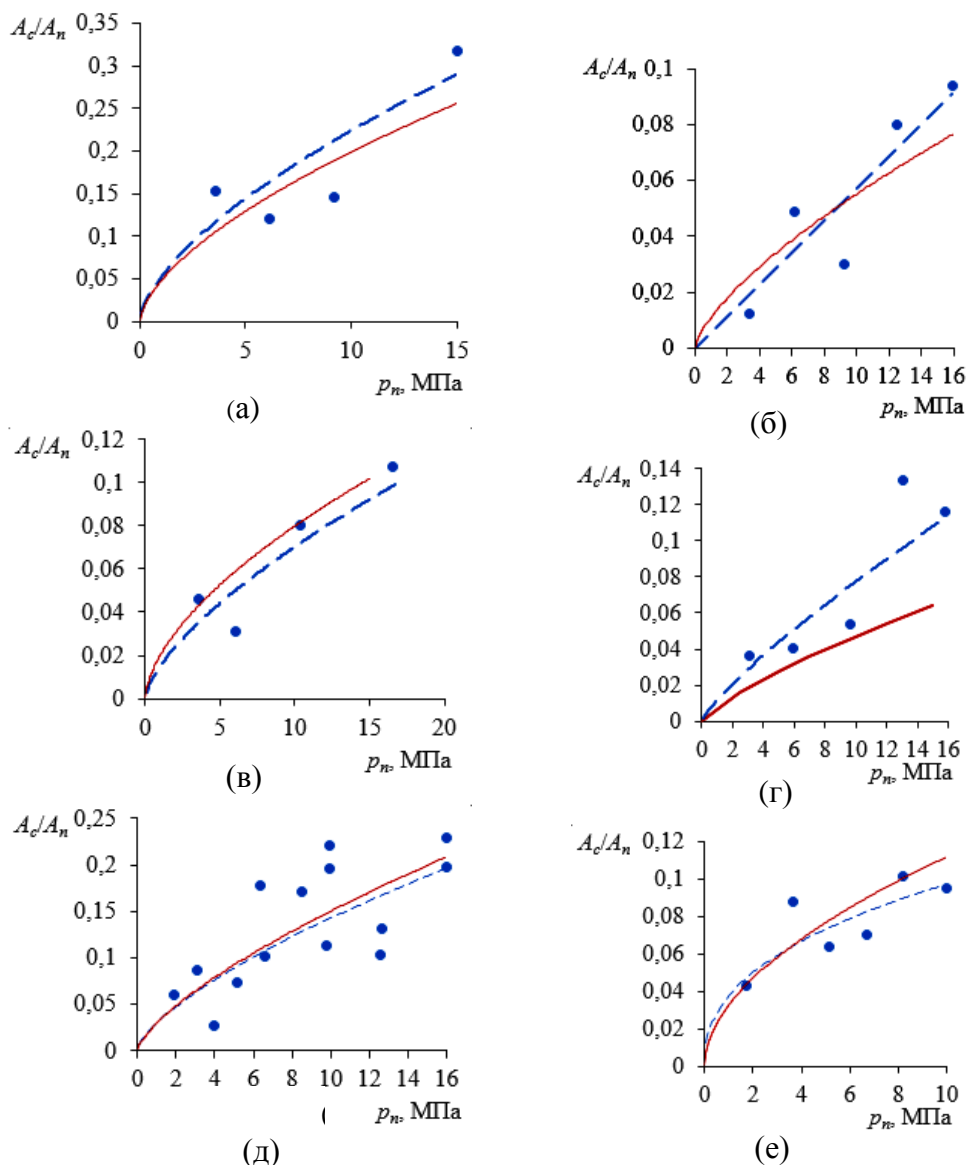


Рис. 2. Зависимость относительной КПК от номинального давления для контактных пар (см. табл. 2): 1, 2 (а); 3, 4 (б); 5, 6 (в); 7, 8 (г); 9, 10 (д); 11, 12 (е); точки – экспериментальные данные; сплошная линия – расчет по формуле (3); пунктир – степенная аппроксимация экспериментальных данных по методу наименьших квадратов

Эксперименты подтверждают теоретические оценки величины КПК от нескольких сотых до нескольких десятых долей номинальной площади в зависимости от контактного давления. С ростом номинального давления величина КПК увеличивается, и данное увеличение можно описать степенной зависимостью. Согласно экспериментальным результатам, показатель степени в этой зависимости изменяется в пределах 0,4–1 и равен в среднем 0,7. Теоретические значения показателя степени в зависимости КПК от номинального давления лежат в пределах 0,54–0,77 при среднем значении 0,66, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе эксперимента показано, что площадь контакта деталей машин, рельеф поверхности которых включает шероховатость и волнистость, существенно меньше

площади контакта деталей, рельеф поверхности которых содержит только шероховатость. Контурная площадь контакта, образовавшаяся в результате деформации волн под действием приложенного к контакту нормального давления, составляет от нескольких единиц до нескольких десятков процентов от номинальной площади контакта. Предложенные теоретические зависимости позволяют оценить величину КПК по известным параметрам микрогеометрии контактирующих поверхностей и механическим характеристикам материалов деталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука. 1970. 227 с.
2. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: ТвГТУ. 2019. 164 с.
3. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография. Тверь: ТГТУ. 2010. 116 с.

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Гусев А.Ф. Влияние волнистости поверхностей на характеристики контактного взаимодействия деталей машин // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 1 (21). С. 14–20.

#### INFLUENCE OF SURFACE WAVINESS ON CHARACTERISTICS OF CONTACT INTERACTION OF MACHINE PARTS

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., A.F. GUSEV, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The influence of waviness of technical surfaces on the contact interaction of machine parts has been studied. The parameters of roughness and waviness of the surfaces of experimental samples according to GOST R ISO 4287-2014, the mechanical properties of the sample materials and a description of the experimental methodology are given. Theoretical dependences of the contour contact area on the nominal pressure, the parameters of roughness and waviness of the contacting surfaces and the mechanical properties of the materials of the contacting parts are proposed. It has been shown theoretically and experimentally that waviness significantly affects the size of the contact area of machine parts. It is observed that, depending on the magnitude of the nominal contact pressure, the contour area formed by elastic wave deformation ranges from a few units to several tens of per cent of the nominal contact area.

*Keywords:* contact interaction, roughness, waviness, contour contact area.

Поступила в редакцию/received: 27.11.2023; после рецензирования/revised: 12.12.2023;  
принята/accepted: 15.12.2023

## ПОРОШКОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук, К.А. САХАРОВ, асп.

Тверской государственный технический университет  
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А., 2024

Методом порошковой лазерной наплавки получено металлокерамическое покрытие NiCrBSi–WC на конструкционной стали 40X. Показано, что при наплавке высоколегированной порошковой смеси с помощью многоканального лазера формируется практически беспористое покрытие, обеспечивается металлургическое сплавление с основой. Отмечено, что линия сплавления однородна по строению, и это подтверждает высокую однородность интегрального тепловложения во время наплавки данным типом лазера. Установлено, что благодаря высоким скоростям нагрева и охлаждения расплава при порошковой лазерной наплавке растворение карбидов WC в ванне расплава незначительное. Выделение хрупкой фазы на границе карбид-металлическая матрица не выявлено.

*Ключевые слова:* микроструктура, металлокерамическое покрытие, порошковая лазерная наплавка, многоканальный лазер.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-21-26**

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных видов применения сплавов на основе никеля является нанесение наплавки и напыления износостойких и коррозионностойких покрытий различными методами [1–9]. Для повышения эксплуатационных свойств нанесенного слоя нередко применяют порошковые смеси, содержащие частицы высокотвердых соединений, например карбидов WC, TiC, а также некоторых других.

Анализ практического использования износостойких покрытий показывает, что для работы в тяжелых условиях их качество и свойства не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям. Нанесенные покрытия могут иметь слабое адгезионное сцепление с основой и отслаиваться, содержать поры, трещины и в целом обладать недостаточно высокой прочностью [1–3]. При дуговой наплавке из-за большого тепловложения возможно глубокое проплавление основы, что изменяет химический состав покрытия [9].

Одним из передовых современных методов нанесения покрытий является порошковая лазерная наплавка, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с другими традиционными методами. За счет точного контроля энергетических параметров порошковая лазерная наплавка позволяет решить часть отмеченных выше проблем [3–7, 10, 11]. Для нанесения композиционных покрытий в настоящей работе использовали многоканальный лазерный CO<sub>2</sub>-излучатель (40 лучей) отечественной разработки мощностью 3 кВт с оптимизированным распределением плотности мощности в пятне (патент РФ № 2580350) [11]. В отличие от однолучевых, эти лазеры имеют более однородное распределение плотности мощности излучения в зоне обработки.

Цель работы – изучить структурное состояние армированного частицами карбида вольфрама никелевого покрытия, полученного порошковой лазерной наплавкой с помощью многоканального лазера.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

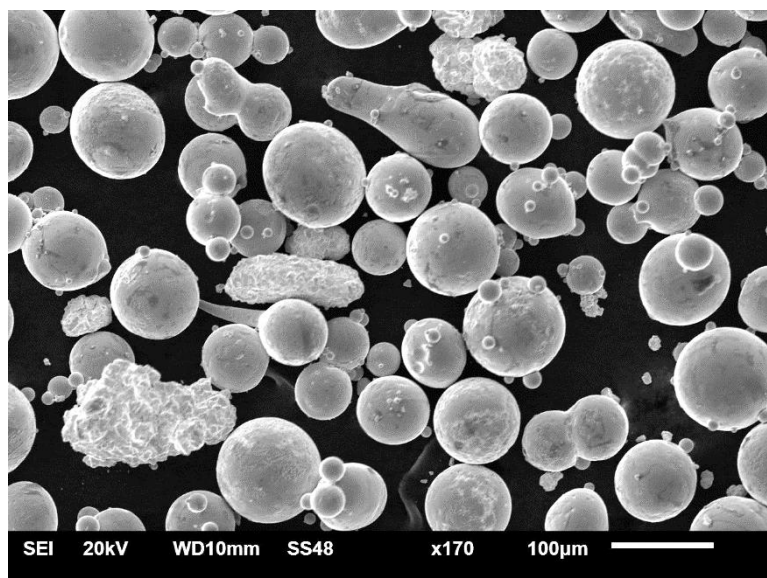
В качестве материала подложки использовали конструкционную сталь 40Х (ГОСТ 4543-71). Порошковую смесь ПС-12НВК-01 (ГОСТ 28377-89), состоящую из карбида вольфрама WC в количестве 35 % и гранулированного порошка марки ПГ-10Н-01 (ТУ 48-19-383-91) состава % (масс.) 0,6...1,0 С; 14...20 Cr; 2,8...4,2 В; 4,0...4,5 Si; 3,0...7,0 Fe (остальное – Ni), предварительно наносили на поверхность подложки с использованием специального трафарета и равномерно распределяли. Наплавку выполняли с помощью непрерывного лазерного излучения на комплексе модели АЛТКУ-3 на следующих режимах: мощность – 2,4 кВт, скорость сканирования луча – 5 мм/с, диаметр пятна на обрабатываемой поверхности – 6 мм. Перекрытие валиков – 30 %.

Исследования микроструктуры проводили с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT и растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-6610LV. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазного индентора в виде пирамиды согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002). При измерении микротвердости металлической матрицы использовали нагрузку на индентор 0,98 Н, твердости карбидных частиц – 0,29 Н.

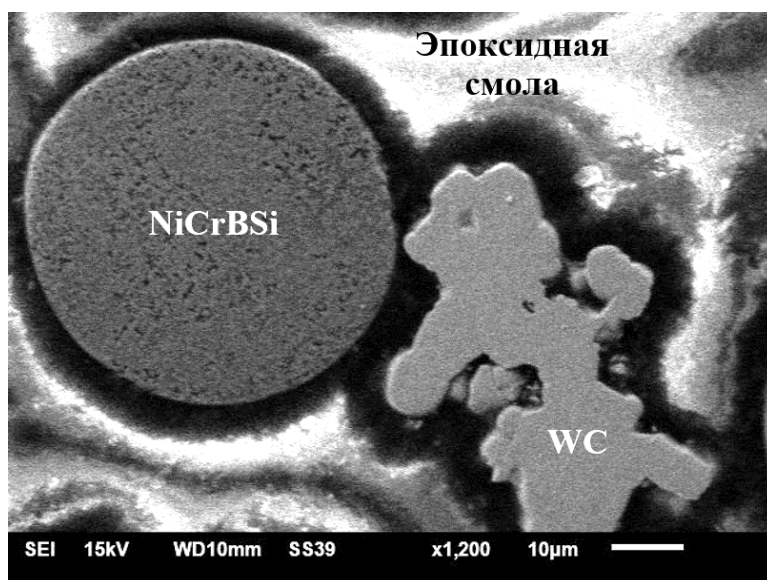
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены РЭМ-изображения порошковой смеси и ее шлиф в эпоксидной смоле. Порошок никелевого сплава имеет размер частиц 25...120 мкм, получен методом газоструйного распыления расплава. У частиц в основном сферическая форма, на поверхности некоторых из них встречаются сателлиты. Карбиды WC имеют произвольную форму. В статье [2] отмечается, что форма частиц карбида вольфрама (сферическая или произвольная) не оказывает заметного влияния на износостойкость покрытий. В то же время существует очевидное преимущество в использовании более крупных частиц размером 750...1 200 мкм в жестких условиях эксплуатации, а покрытия с более мелкими частицами (40...160 мкм) улучшают сопротивление износу в условиях скольжения.

Известно, что карбид WC обладает благоприятным сочетанием свойств, высокой твердостью, некоторой пластичностью, хорошей смачиваемостью расплавом. По сравнению с карбидами других переходных металлов WC имеет более высокий модуль упругости, меньший коэффициент термического расширения, стабильность свойств при нагреве вплоть до 1 000 °С [12]. Высокая плотность энергии при наплавке и длительность термического воздействия могут вызвать значительное растворение карбида WC в матрице, в результате возможно образование сложных карбидов ( $\eta$ -фазы), которые существенно охрупчивают покрытие и снижают его эксплуатационные свойства. Если плотности энергии и время воздействия при наплавке недостаточны, то диффузная граница по поверхности карбидов не успеет образоваться, керамика и матрица могут быть плохо связаны. Для получения качественного покрытия с требуемыми свойствами необходимо тщательно выбирать и обосновывать технологические режимы наплавки.



(a)



(б)

Рис. 1. РЭМ-изображения порошковой смеси (а) и ее шлифа (б)

На рис. 2 дано изображение непротравленного шлифа наплавленного образца. Толщина полученного покрытия – около 0,7 мм. Линия сплавления параллельна поверхности покрытия, однородна по строению. Распределение частиц WC в наплавленном металле равномерное. Пор и трещин в плоскости шлифа не обнаружено. Частицы WC имеют микротвердость  $HV_{30}$  около  $20\,200 \pm 800$  МПа; частицы сплава NiCrBSi –  $HV_{100}$  около  $7\,900 \pm 350$  МПа. Микротвердость металлической матрицы наплавленного покрытия выше,  $HV_{100} = 9\,000 \pm 150$  МПа. Повышение микротвердости матрицы композиционного покрытия, если сравнивать с микротвердостью отдельных металлических частиц, возможно, связана с влиянием подповерхностных карбидов WC.

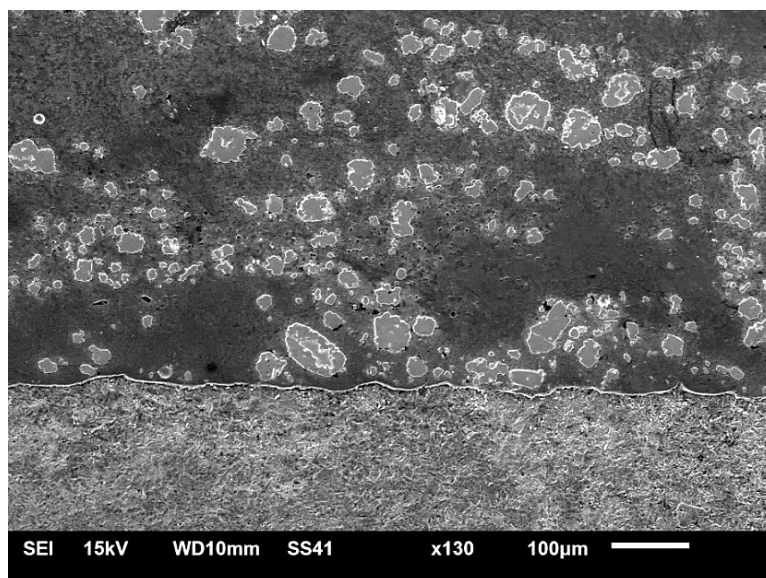


Рис. 2. РЭМ-изображение наплавленного покрытия  
вблизи линии сплавления с основой

При формировании наплавленного слоя частицы никелевого сплава полностью расплавляются и смачивают карбиды WC. В первую очередь при наплавке должна сформироваться диффузная граница по поверхности карбидов, чтобы керамика и металлическая матрица были хорошо связаны и обеспечивалась высокая прочность. Для анализа качества полученного покрытия использовали селективное химическое травление шлифов реактивом Мураками (это одна часть 20%-го водного раствора KOH или NaOH и одна часть 20%-го водного раствора  $K_3[Fe(CN)_6]$ ), позволяющее выявить наличие хрупкой  $\eta$ -фазы по границам частиц карбидов [13]. Исследования протравленных шлифов с помощью оптической микроскопии показали, что заметного растворения карбидов вольфрама в материале матрицы не наблюдается и  $\eta$ -фаз не образуется (рис. 3).

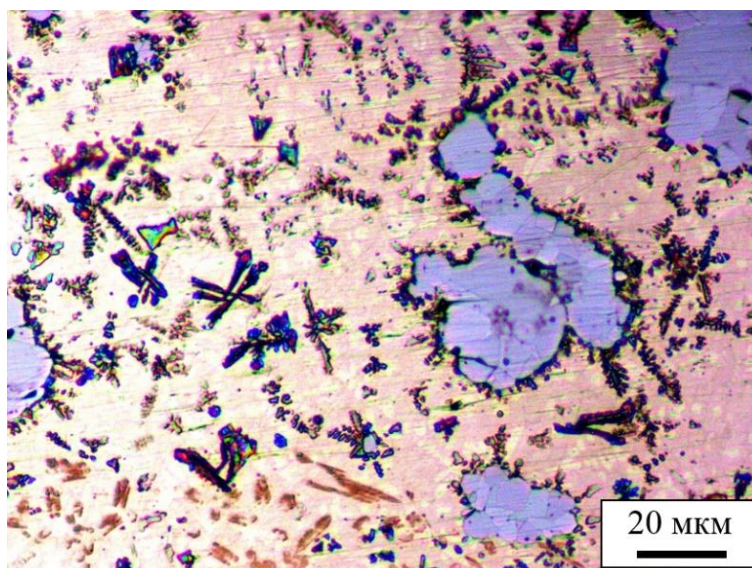


Рис. 3. Микроструктура покрытия. Оптическая микроскопия



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом порошковой лазерной наплавки на конструкционную сталь 40Х было нанесено композиционное покрытие толщиной 0,7 мм. Использовали высоколегированную порошковую смесь NiCrBSi–WC. Распределение частиц WC в наплавленном металле равномерное. Пор и трещин в плоскости шлифа не выявлено. Частицы WC имеют микротвердость  $HV_{30}$  около  $20\ 200 \pm 800$  МПа. Микротвердость металлической матрицы  $HV_{100} = 9\ 000 \pm 150$  МПа. Селективное химическое травление шлифов реактивом Мураками не выявило хрупкую  $\eta$ -фазу по границам частиц карбидов. При высоких скоростях нагрева и охлаждения расплава, которые обеспечивает технология лазерной наплавки, заметного растворения карбидов вольфрама в материале матрицы не наблюдается. Получено высококачественное износостойкое покрытие благодаря тому, что используемый многоканальный CO<sub>2</sub>-лазер имеет высокую степень однородности интегрального тепловложения в зоне обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Tobar M.J., Alvarez C., Amado J.M., Rodríguez G., Yáñez A. Morphology and Characterization of Laser Clad Composite NiCrBSi–WC Coatings on Stainless Steel // *Surface and Coatings Technology*. 2006. V. 200. № 22–23. P. 6313–6317.
2. Deschuyteneer D., Petit F., Gonon M., Cambier F. Influence of Large Particle size – up to 1.2 mm – and Morphology on Wear Resistance in NiCrBSi/WC Laser Cladded Composite Coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2017. V. 311. P. 365–373.
3. Lisiecki A., Kurc-Lisiecka A. Laser Cladding of NiCrBSi/WC + W<sub>2</sub>C Composite Coatings // *Coatings*. 2023. V. 13. № 3. P. 576.
4. Афанасьева Л.Е., Раткевич Г.В. Лазерная наплавка покрытия NiCrBSiFe–WC с помощью многоканального лазера // *Письма о материалах*. 2018. Т. 8. № 3 (31). С. 268–273.
5. Афанасьева Л.Е., Раткевич Г.В., Новоселова М.В. Роль структурного фактора в повышении износостойкости Ni – Cr – В – Si-покрытия после лазерной обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2019. № 9. С. 55–60.
6. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. Формирование композиционного покрытия NiCrBSi–TiC с повышенной абразивной износостойкостью методом газопорошковой лазерной наплавки // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. № 11. С. 38–44.
7. Li Q., Lei T.C., Chen W.Z. Microstructural Characterization of WCp Reinforced Ni–Cr–B–Si–C composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 1999. V. 114. Is. 2-3. P. 285–291.
8. Appiah A.N.S., Bialas O., Czupryński A., Adamiak M. Powder Plasma Transferred Arc Welding of Ni-Si-B + 60 wt% WC and Ni-Cr-Si-B + 45 wt% WC for Surface Cladding of Structural Steel // *Materials*. 2022. V. 15. № 14. P. 4956.
9. Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е. Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 16–22.
10. Югов В.И. Эффективное направление развития лазерной технологии – создание лазерных комплексов // *Главный механик*. 2020. № 1. С. 38–50.
11. Патент РФ 2580350. *Устройство для упрочнения поверхности детали* / Югов В.И. [и др.]; Заявл. 05.11.2014. Опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10.

12. Курлов А.С., Гусев А.И. Фазовые равновесия в системе WC и карбиды вольфрама // *Успехи химии*. 2006. Т. 75. № 7. С. 687–708.

13. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: справ. изд. М.: Металлургия. 1988. 400 с.

**Для цитирования:** Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 21–26.

## **POWDER LASER CLADDING OF A WEAR-RESISTANT COMPOSITE COATING**

L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc., K.A. SAKHAROV, Postgraduate

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

Metal-ceramic NiCrBSi-WC coating on 40X structural steel has been obtained by laser powder surfacing method. It is shown that cladding of high-alloyed powder mixture with the help of multichannel laser forms practically porous coating and provides metallurgical alloying with the base. It is noted that the fusion line is homogeneous in structure, and it confirms high homogeneity of integral heat input during cladding by this type of laser. It is established that due to high speeds of heating and cooling of the melt during powder laser cladding the dissolution of WC carbides in the melt bath is insignificant. No emission of brittle phase at the carbide-metal matrix interface was detected.

*Keywords:* microstructure, metal-ceramic coating, laser powder surfacing, multi-channel laser.

Поступила в редакцию/received: 19.11.2023; после рецензирования/revised: 30.11.2023;  
принята/accepted: 05.12.2023

УДК 621.891

## **ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук,  
О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vnvkv@yandex.ru

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2024

Исследованы триботехнические характеристики инновационного материала, представляющего собой композиционное покрытие с матрицей из оксида алюминия и наполнителями из нанодисперсного магнетита и микродисперсных дисульфида молибдена, графита. Установлено, что минимальные значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания при сохранении высоких прочностных свойств материалов достигаются при концентрации дисперсных частиц в электролите: для

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (21), 2024*

магнетита – не более 20 г/л; графита – не более 40 г/л; дисульфида молибдена – 45 г/л. Подчеркнуто, что испытания показали стабильность коэффициента трения исследуемых покрытий в течение 90 часов. Изучено влияние контактного давления на интенсивность линейного износа. Предложен критерий перехода от упругого контакта к пластическому. На основании этого получено расчетное соотношение для оценки перехода от стабильной работы трибосопряжения к его катастрофическому изнашиванию.

*Ключевые слова:* микродуговое окислирование, антифрикционные наполнители, керамическое покрытие, трение, износ.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-26-36**

## ВВЕДЕНИЕ

Успешное развитие космической техники, приборостроения и геодезического оборудования определяет необходимость создания новых твердых смазочных материалов и покрытий [1–3]. Эти материалы особенно востребованы при производстве трибоузлов, работающих длительное время в вакууме, агрессивных газовых средах, при экстремальных температурах, а также при длительном отсутствии технического обслуживания [4–6]. Материалы, первоначально использовавшиеся для узлов сухого трения на основе полимерных связей с твердыми смазочными наполнителями (ТСН), не отвечают повышенным требованиям к несущей способности и долговечности узлов трения. Наиболее перспективной альтернативой полимерным матрицам с ТСН являются оксидные керамические связки, содержащие в своей структуре дисперсные микро- и нанонаполнители с низким сопротивлением сдвигу [7].

В статьях [8, 9] предложена технология получения композиционных материалов, синергетически сочетающих высокие прочностные свойства керамической матрицы с антифрикционными свойствами дисперсного наполнителя. Покрытия образуются на поверхности вентильных металлов, в частности алюминия, под действием искрового разряда. Неоднородное электрическое поле встраивает взвешенные в электролите частицы ТСН в формирующуюся матрицу керамического покрытия. Структура материала представляет собой матрицу из оксида алюминия преимущественно  $\alpha$ -модификации, в которую внедрены частицы ТСН. Наполнителями являются микродисперсные частицы графита, дисульфида молибдена и наноразмерные частицы магнетита. Первые два типа наполнителей известны своими антифрикционными свойствами, а частицы магнетита повышают механические свойства покрытий и способствуют уменьшению адгезионных связей между взаимодействующими поверхностями.

Предложенная технология способствовала успешному решению задачи формирования композиционных материалов, связанной с негативным влиянием ТСН с различными диэлектрическими свойствами на процесс электрохимического окисления. Предварительные результаты испытаний показали хорошие антифрикционные характеристики полученных покрытий [8]. Однако влияние концентрации дисперсных частиц ТСН на триботехнические параметры композиционных материалов детально не изучено. Недостаточно данных для определения оптимальных режимов работы новых материалов, поэтому в настоящее время нельзя рекомендовать область применения полученных оксидных покрытий с антифрикционными наполнителями.

Цели работы заключаются в изучении триботехнических характеристик оксидных покрытий с антифрикционными наполнителями (графитом, дисульфидом молибдена и магнетитом) в зависимости от их концентрации и определении оптимальных режимов работы покрытий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытуемые образцы имеют материал покрытия, сформированный на основе алюминиевого сплава Д1 (ГОСТ 4784-97). Основной состав электролита: щелочь NaOH, силикат натрия, дистиллированная вода, частицы ТСН. В зависимости от типа наполнителя концентрация  $\nu$  основных компонентов варьировалась (табл. 1).

Дисперсные компоненты графита и дисульфида молибдена имели средний размер частиц 2...10 мкм. Чтобы нивелировать влияние электрических свойств ТСН на формирование композиционного материала, авторы выбрали метод модификации активной поверхности дисперсных частиц полярной жидкостью, в качестве которой выступал глицерин [10].

Частицы магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, использованные как ТСН, имели средний размер около 7 нм. Наноразмерный размер Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> обеспечивается технологией получения магнитных частиц методом химического осаждения Элмора [11]. Приготовление ТСН включало защиту магнитных частиц от окисления и предотвращение их коагуляции [12].

Таблица 1. Состав электролитов

Дисперсная фаза ТСН	Концентрации элементов в электролите, масс.%				Дистиллированная вода
	Едкий натрий NaOH	Жидкое стекло Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	ТСН	Глицерин	
Графит	0,1	1,5	4...40	2	
Дисульфид молибдена	0,1	1,1	4...50	3	
Магнетит	0,1	1,5	3...20	–	

Технология получения антифрикционного покрытия реализована на оборудовании [13], используемая плотность тока – 10 А/дм<sup>2</sup>. Триботехнические испытания проводились на установке МТП [14], реализующей схему трения «штифт с тестовым покрытием – контрообразец в виде диска». Материалом контрообразца является инструментальная легированная сталь ХВГ (твердость 50...55 HRC). Дополнительная смазка не применялась. Конструкция машины трения обеспечивает относительную погрешность не более 17 % для определения линейного износа и 10 % для определения коэффициента трения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Увеличение концентрации  $\nu$  ТСН всех типов значительно улучшает антифрикционные свойства композитных покрытий. Коэффициент трения  $f$  и линейная скорость износа  $I_h$  линейно уменьшаются с увеличением концентрации графита и магнетита (рис. 1). Дальнейшее увеличение тестируемого содержания ТСН ограничено нарушением процесса электролитического формирования покрытия. Линейная кривая скорости износа для материала, содержащего дисульфид молибдена в матрице, имеет экстремальный характер. Когда концентрация MoS<sub>2</sub> в электролите превышает 45 г/л, процесс формирования композиционного материала возможен, но его физико-механические свойства значительно снижаются. Уменьшение твердости материала и прочности адгезии клея к алюминиевой основе приводит к увеличению линейной скорости износа.

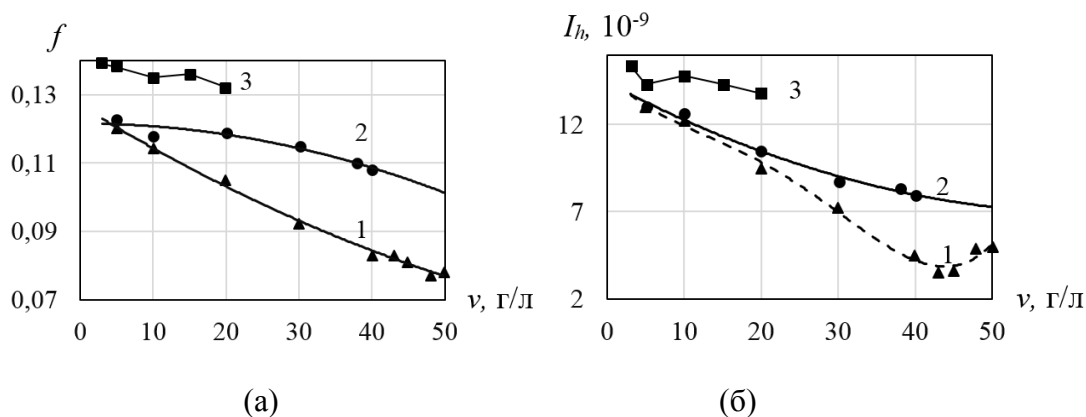


Рис. 1. Влияние концентрации ТСН в электролите на коэффициент трения (а) и интенсивность линейного износа (б).

Твердые смазочные наполнители: 1 –  $\text{MoS}_2$ ; 2 – графит; 3 – магнетит.

Скорость скольжения – 0,47 м/с, давление на контакте – 1,5 МПа

Авторы настоящей статьи провели исследование скорости линейного износа полученных антифрикционных покрытий в зависимости от давления в зоне контакта  $P$  (рис. 2). В диапазоне давлений от 0,3 до 6 МПа материал, модифицированный частицами дисульфида молибдена, показал наилучший результат. Меньшее значение линейного износа этого материала, если сравнивать с покрытиями с модифицированным графитом и магнетитом, обусловлено лучшими смазывающими свойствами  $\text{MoS}_2$ . Положительный эффект также оказывает более высокая технологически возможная концентрация  $\text{MoS}_2$  в композиционном материале. Базовое покрытие без антифрикционного наполнителя имеет самую высокую линейную скорость износа.

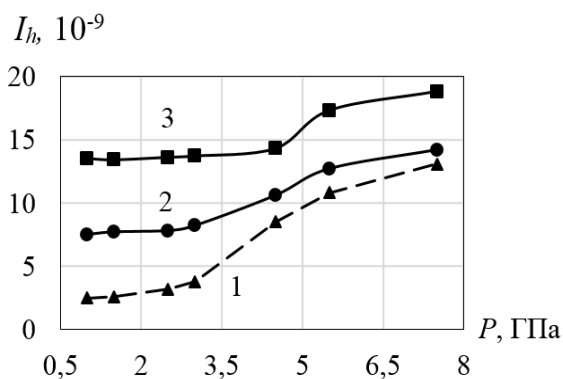


Рис. 2. Влияние контактного давления на интенсивность линейного износа.

Твердые смазочные наполнители: 1 –  $\text{MoS}_2$ ; 2 – графит; 3 – магнетит.

Скорость скольжения – 0,47 м/с, концентрация графита и  $\text{MoS}_2$  в электролите – около 40 г/л, магнетита – 20 г/л

Немонотонная форма линейных зависимостей износа, показанная на рис. 2, позволяет предположить изменение типа деформации композиционных материалов покрытия с увеличением контактного давления. Анализ микрогеометрии трибоповерхностей образцов с исследуемым покрытием на нескольких этапах испытаний дал возможность уточнить механизм контактного взаимодействия в зоне трения.

На профилограмме рабочей поверхности образца, имеющего композиционное покрытие с графитовым наполнителем, видны микрошероховатости, характеризующиеся периодичностью и значительным перепадом высот (рис. 3а). После 4 секунд с начала испытаний периодичность неровностей существенно нарушилась, на профилограмме (рис. 3б) видно существенное выглаживание профиля поверхности. По окончании приработки (по истечении времени около 20 секунд) профиль поверхности трения стал практически гладким (рис. 3в).

Анализ профилограмм и результаты трибоиспытаний оксидных покрытий с антифрикционными наполнителями позволяют описать процессы, происходящие в зоне трения. Достаточно малая начальная шероховатость композитного материала за счет предварительного тонкого шлифования позволяет сблизить контактирующие поверхности до такой степени, что нагрузка на наиболее выступающие микрошероховатости распределяется относительно равномерно. Во время фрикционного контакта вершины керамических микрошероховатостей и антифрикционных частиц изнашиваются, в результате чего образуются участки, вдоль которых происходит дальнейший контакт.

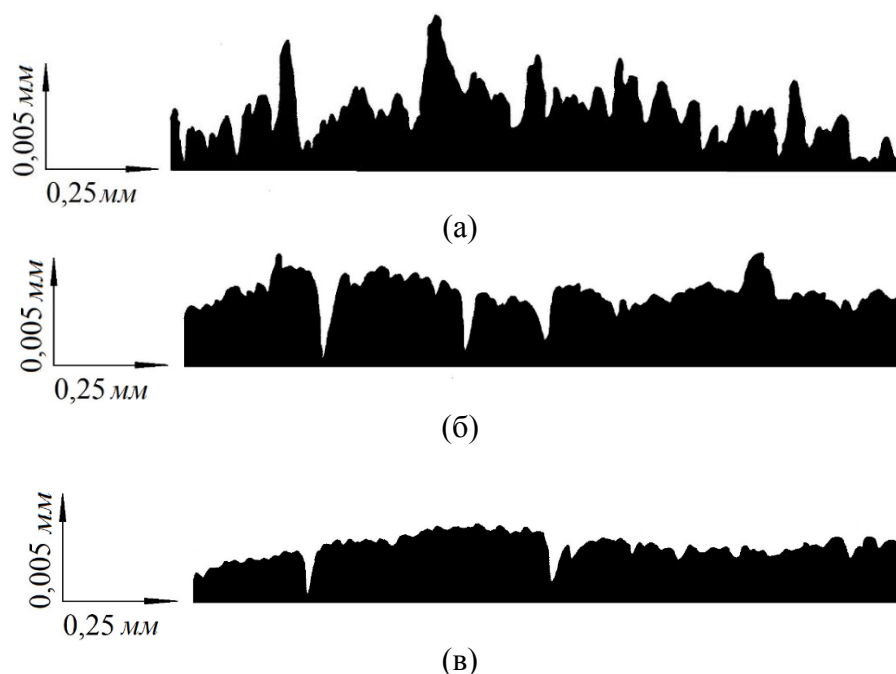


Рис. 3. Профилограммы поверхности трения керамического материала с графитовым наполнителем: до испытаний (а); в процессе приработки (б); при установившемся режиме работы (в)

В процессе трения горизонтальные участки взаимного контакта увеличивают площадь, формируя плоскость, нормальную к прикладываемой нагрузке. Частицы графита, дисульфида молибдена или магнетита, окружающие микрошероховатости из оксида алюминия, частично разрушаются на вершинах выступов, распределяются по поверхности материалов пары трения, играя роль твердой смазки. В установившемся режиме трения контур контробразца также выравнивается, обе контактирующие поверхности выглаживаются до глянцевого блеска, взаимная деформация микронеровностей носит преимущественно упругий характер. При дальнейшем увеличении нагрузки на поверхности трения появляются очаги разрушения в виде трещин. Когда контактное давление превышает некоторое критическое значение, скорость

разрастания микроочагов разрушения поверхности трения увеличивается, что приводит к ее катастрофическому износу.

Известно, что в случае усталостного износа достижение высокой твердости контактирующих поверхностей довольно проблематично, поскольку увеличение твердости обычно сопровождается исчерпанием запаса пластичности и способностью к дальнейшему накоплению деформаций. При применении предлагаемых авторами покрытий повышенная износостойкость и низкий коэффициент трения сочетаются с высокой твердостью материалов. Для керамических материалов этот факт известен, однако предлагаемые оксидные покрытия с антифрикционными наполнителями (графитом, дисульфидом молибдена или магнетитом) показывают наилучшие результаты по износостойкости. При введении в состав керамического композиционного материала низкомолекулярных смазочных компонентов происходит снижение прочностных характеристик материала по мере приближения к поверхности трения и реализуется правило «положительного градиента механических свойств». Это позволяет локализовать деформационные процессы в тонком поверхностном слое твердой смазочной пленки, не снижая конструкционную прочность узла в целом.

Морфологические исследования поверхности трения композиционных покрытий подтверждают сделанные выводы. На рис. 4 представлены микроструктурные изображения антифрикционного покрытия, модифицированного частицами дисульфида молибдена, перед испытанием и после испытания, а также контрольного образца после испытания. На рис. 4б и 4в показаны темные области, образованные твердой смазочной пленкой  $\text{MoS}_2$ , нанесенной на соприкасающиеся поверхности.

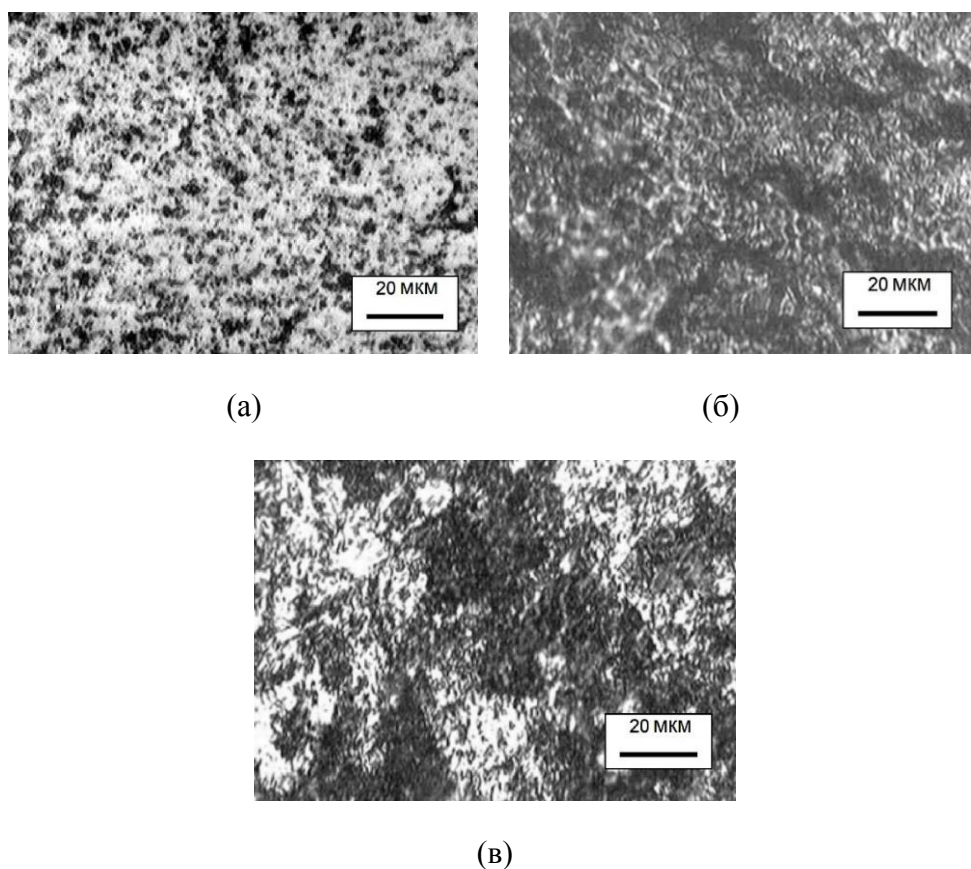


Рис. 4. Поверхность трения образца оксидного покрытия с  $\text{MoS}_2$  до испытаний (а), после испытаний (б) и контрольного образца после испытаний (в)

Принимая во внимание проведенный анализ, авторы предполагают, что при превышении определенного значения давления усталостный характер износа при преимущественно упругом деформировании материала сменяется резким увеличением интенсивности износа при пластическом деформировании [15, 16]. Для оценки оптимальных режимов работы полученных антифрикционных материалов необходимо определить режимы нагрузки, соответствующие упругой деформации и усталостному износу материала.

Для определения критического давления в зоне контакта и описания контактного взаимодействия при трении оксидных покрытий с износостойкими наполнителями будем исходить из предположения, что упругий контакт микронеровностей при установившемся режиме изнашивания сменяется пластическим в случае интенсивного разрушения трибоповерхностей [17]. В качестве критерия перехода примем нагрузку, создающую среднее упругое давление на пятне контакта, равное микротвердости материала HV. Переход от нагрузки на единичном пятне контакта к величине критического номинального давления  $q_{кр}$  в контакте реального трибосопряжения проведен согласно модели И.В. Крагельского, Н.Б. Демкина [18]:

$$q_{ax} = \left( \frac{t_m v H V \pi^2}{2} \right)^{2\nu+1} \times \left[ \frac{1,5\pi I_e}{t_m v (v-1) K_3} \left( \frac{R}{R_p} \right)^{0,5} \right]^{2\nu},$$

где  $R_p$ ,  $\nu$ ,  $t_m$ ,  $K_3$  – параметры шероховатости контактирующих поверхностей [18];  $I_e = \frac{1-\mu_c^2}{E_c} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$  ( $E_c$ ,  $E_k$  и  $\mu_c$ ,  $\mu_k$  – модули упругости и коэффициенты Пуассона оксидного покрытия с наполнителями и материала контробразца). Рассчитанные по предложенной формуле теоретические значения критического давления приведены в табл. 2.

Таблица 2. Теоретические и экспериментальные значения критического номинального давления оксидных материалов с ТСН

Материал наполнителя	Толщина покрытия, мм	Микротвердость, ГПа	Теоретический расчет, МПа	Экспериментальное значение, МПа
MoS <sub>2</sub>	0,1...0,3	10...12	2,51	2,9
Графит	0,1...0,25	9...11	2,61	2,75
Магнетит	0,1...0,2	11...13	3,82	4,2

Тот факт, что полученные теоретически значения критического номинального давления ниже экспериментальных данных, можно пояснить следующим образом. При номинальной нагрузке, соответствующей расчетному значению, в реальном контакте среднее упругое давление, равное HV, возникает на единичных, более высоких микронеровностях. Катастрофическое разрушение контактирующих поверхностей происходит при увеличении давления в 1,05...1,4 раза выше критического. В табл. 2 также показано, что наполнитель магнетит не только обладает антифрикционными свойствами, но и увеличивает прочностные свойства композиционного материала в целом.

Расчет по предложенной формуле поможет уточнить диапазон рабочих давлений узла трения с композиционными оксидными ТСН-покрытиями. Расчетные значения



удовлетворительно коррелируют с экспериментальными результатами, погрешность не превышает 14 %.

Прогнозируемая область применения полученных материалов предполагает длительную эксплуатацию при отсутствии технического обслуживания. В связи с этим важно оценить сохранение триботехнических свойств материалов в течение длительного времени  $t$ . Результаты испытаний (рис. 5) показали, что за 90 часов непрерывной работы коэффициент трения композиционных покрытий с ТСН дисульфидом молибдена увеличивается в 1,4 раза, с графитом – в 1,25 раза, магнетитом – в 1,2 раза. Коэффициент трения покрытия без наполнителя существенно не изменяется в течение всего периода испытаний. Незначительное изменение коэффициента трения в течение длительного периода эксплуатации подтверждает возможность использования этих материалов для узлов трения, эксплуатируемых при отсутствии жидкой смазки. Можно отметить, что многие узлы трения космических аппаратов, сложные измерительные приборы не предполагают постоянного активного использования, т.е. они работают непродолжительное время с длительными периодами простоя. Разработанные антифрикционные материалы больше всего подходят для таких узлов трения.

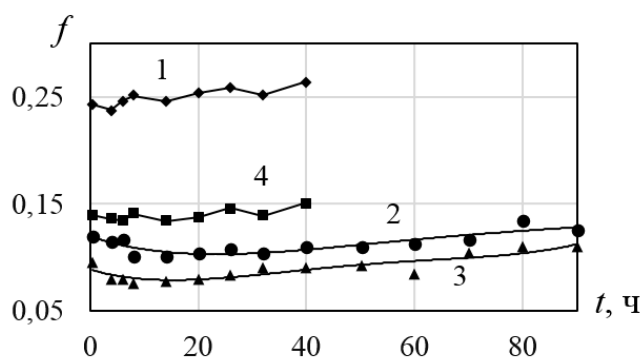


Рис. 5. Реологические изменения коэффициента трения композиционных антифрикционных керамических покрытий.

Твердые смазочные наполнители: 1 – без наполнителя; 2 – графит; 3 – дисульфид молибдена; 4 – магнетит

Были проведены испытания триботехнических характеристик композиционных керамических материалов с ТСН на основе различной температуры в зоне контакта. Максимальная рабочая температура составила 450 °С. Наиболее значимые фрикционные характеристики – коэффициент трения и скорость износа – изменялись под влиянием температуры для покрытий, модифицированных дисульфидом молибдена, и практически не изменялись для покрытий с графитовым наполнителем и традиционных (без наполнителя).

Покрытия с антифрикционным дисперсным наполнителем  $\text{MoS}_2$  обладают более высокими триботехническими характеристиками при температурах до 150 °С. В диапазоне температур от 200 до 450 °С наилучшие свойства проявляют покрытия с частицами графита. Этот результат объясняется более низкой структурной стабильностью частиц молибдена по сравнению с графитовыми при активирующем воздействии более высоких температур. Помимо снижения антифрикционных свойств из-за окисления частиц молибдена, сказывается их более высокая концентрация (25 об.%) в сравнении с графитовыми (около 20 об.%) в керамической матрице.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены триботехнические испытания композиционных материалов с антифрикционными наполнителями из микродисперсного дисульфида молибдена, графита и нанодисперсного магнетита. Установлены оптимальные концентрации дисперсных частиц в электролите: для магнетита – не более 20 г/л, графита – не более 40 г/л; дисульфида молибдена – 45 г/л. В этих условиях обеспечиваются минимальные значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания при сохранении высоких прочностных свойств материалов. Наилучшими триботехническими свойствами обладает покрытие, модифицированное частицами дисульфида молибдена. Коэффициент трения покрытий с  $\text{MoS}_2$  в 1,3 раза ниже, чем у покрытий с  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , и в 1,15 раза ниже, чем у покрытий с графитом. Коэффициент трения основного покрытия без антифрикционных наполнителей в 1,7...3 раза выше покрытий с ТСН.

Теоретически и экспериментально найден диапазон давлений, при которых полученные антифрикционные покрытия эксплуатируются в условиях упругого контакта и усталостного разрушения. Предложено расчетное соотношение для оценки перехода от стабильной работы трибосопряжения к его катастрофическому изнашиванию.

Экспериментально установлено, что коэффициент трения полученных материалов меняется незначительно в процессе длительных испытаний. Морфологический анализ показал, что частицы наполнителя переносятся на взаимодействующие поверхности трения, образуя антифрикционный слой с низким сопротивлением сдвигу.

Полученные покрытия можно использовать в узлах трения, эксплуатирующихся длительное время в условиях отсутствия смазочного материала и технического обслуживания. В частности, речь идет о технике в отраслях космического машиностроения и прецизионного приборостроения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Huang Q., Shi X., Xue Y., Zhang K., Wu C. Recent Progress on Surface Texturing and Solid Lubricants in Tribology: Designs, Properties, and Mechanisms // *Materials Today Communications*. 2023. V. 35. P. 105854.
2. Yin J., Yan H., Cai M., Song S., Fan X., Zhu M. Bonded Flake  $\text{MoS}_2$  Solid Lubricant Coating: An Effective Protection against Fretting Wear // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2023. № 117. P. 450–460.
3. Hudec T., Mikula M., Satrapinsky L., Roch T. Structure, Mechanical and Tribological Properties of Mo-S-N Solid Lubricant Coatings // *Applied Surface Science*. 2019. № 486. P. 1–14.
4. Ouyang J.H., Li Y.F., Zhang Y.Z., Wang Y.M., Wang Y.J. High-temperature Solid Lubricants and Self-lubricating Composites: a Critical Review // *Lubricants*. 2022. V. 10. № 8. P. 177.
5. Sarkar M., Mandal N. Solid Lubricant Materials for High Temperature Application: a Review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. № 66. P. 3762–3768.
6. Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н. Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 5–13.
7. Dodun O., Nagiț G., Hrițuc A., Slatineanu L. Optimization of Friction Behavior Characteristics by Coating with Solid Lubricants // *Machines*. 2019. V. 7. № 1. P. 17.

8. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.
9. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 150–158.
10. Hrenechen J.M., Duarte C. de A., Filho N.P.M., Ribeiro E. Electrical and Optical Properties of Silicone Oil/Carbon Nanotube Nanocomposites // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2021. V. 21. № 4. P. 2185–2195.
11. Khoperia T., Zedginidze T. Electroless Metallization of Nano-sized Particles, Composites Fabrication // *ECS Transactions*. 2008. № 13. P. 95–109.
12. Ramazanov M.A., Maharramov A.M., Ali-zada R.A., Shirinova H.A., Hajiyeva F.V. Theoretical and Experimental Investigation of the Magnetic Properties of Polyvinylidene Fluoride and Magnetite Nanoparticles-based Nanocomposites // *Journal of Theoretical and Applied Physics*. 2018. № 12. P. 7–13.
13. Гордиенко П.С., Достовалов В.А., Ефименко А.В. Микродуговое оксидирование металлов и сплавов. Владивосток: ДВФУ. 2013. 522 с.
14. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных смазочных сред. Часть 3 // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2015. № 8. С. 66–70.
15. Johnson K.L. Contact Mechanics. Cambridge etc., Cambridge University Press. V. XII. 1985. 452 p.
16. Tabor D., Bowden F.P. The Friction and Lubrication of Solids. Repr. Oxford: Clarendon press. V. XVIII. 1986. 374 p.
17. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты. Минск: Беларуская навука. 2012. 319 с.
18. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение. 1981. 244 с.

**Для цитирования:** Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Влияние дисперсных наполнителей на фрикционные свойства керамических покрытий // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 26–36.

## **INFLUENCE OF DISPENS FILLERS ON FRICTIONAL PROPERTIES OF CERAMIC COATINGS**

A.N. BOLOTOV, Dr Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.,  
O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: vnvkv@yandex.ru

Tribotechnical characteristics of an innovative material representing a composite coating with a matrix of aluminium oxide and fillers of nanodispersed magnetite and microdispersed molybdenum disulphide and graphite have been studied. It is established that the minimum values of friction coefficient and wear intensity while maintaining high strength properties of materials are achieved at the concentration of dispersed particles in the electrolyte: for magnetite – not more than 20 g/l; graphite – not more than 40 g/l;

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (21), 2024*

molybdenum disulphide – 45 g/l. It is emphasised that the tests showed the stability of the friction coefficient of the investigated coatings during 90 hours. The influence of contact pressure on the intensity of linear wear has been studied. The criterion of transition from elastic contact to plastic contact is proposed. On the basis of it the calculation relation for estimation of transition from stable operation of tribo-conjugation to its catastrophic wear is received.

*Keywords:* microarc oxidation, antifriction fillers, ceramic coating, friction, wear.

Поступила в редакцию/received: 30.11.2023; после рецензирования/revised: 12.12.2023;  
принята/accepted: 15.12.2023

УДК 621.791

## **ВЛИЯНИЕ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНОГО РЕЗА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ**

Д.А. БАРЧУКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: bda@mail.ru

© Барчуков Д.А., 2024

Представлены результаты исследований микроструктуры, микротвердости, микрогеометрии поверхности лазерного реза наплавленной быстрорежущей стали марки Р9М4К8 после алмазного выглаживания. Показано, что шероховатость поверхности лазерного реза уменьшается в 3...4 раза, что позволяет получать рабочую поверхность без последующего механического шлифования. Отмечено, что алмазное выглаживание приводит к измельчению микроструктуры, повышению микротвердости стали до  $9\ 700 \pm 130$  МПа.

*Ключевые слова:* лазерная резка, сталь, алмазное выглаживание, шероховатость, микроструктура, микротвердость.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-36-42**

### **ВВЕДЕНИЕ**

По масштабам применения лазерная резка занимает лидирующие позиции в мире, если сравнивать с другими видами лазерных технологий, благодаря своим преимуществам: возможности разделения широкого класса материалов независимо от их твердости и теплофизических характеристик; отсутствию механического воздействия на материал во время разделения; высокой производительности с возможностью автоматизации и контроля процесса, а также некоторым другим [1–6].

Основными показателями качества поверхности реза металлов являются точность, шероховатость, протяженность зоны термического влияния, ширина реза, количество грата [1]. Поверхность лазерного реза имеет специфическую бороздчатую структуру, и ее шероховатость зависит от тепловых характеристик лазерного излучения, параметров струи газа, погрешности устройства перемещения [1–4]. Снижение шероховатости поверхности реза является важной задачей, так как значения параметров шероховатости оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства функциональных поверхностей деталей и инструментов, например на интенсивность износа, несущую способность, контактные деформации и контактную

жесткость, скорость коррозии поверхностного слоя и некоторые другие [5, 6]. Наименьшие параметры шероховатости поверхности достигаются при резке на стационарных режимах [2]. Для разделения высоколегированных сталей больших толщин реализация стационарного режима лазерной резки является сложной задачей.

Эффективный способ модификации – поверхностное пластическое деформирование [7–10]. Пластическая деформация может изменять как механические, так и физические свойства металла, при этом возможно снижение параметров шероховатости в 5...10 раз, создание благоприятной для повышения износостойкости формы микронеровностей [7].

Метод алмазного выглаживания характеризуется достаточно высокой производительностью, универсальностью и возможностью обработки различных поверхностей, простотой технологической наладки и оснастки. В результате применения этого метода улучшаются эксплуатационные характеристики поверхности за счет отсутствия растягивающих напряжений в поверхностном слое металла и его упрочнения, отсутствия неровностей заостренной формы, увеличения контактной поверхности [8, 9]. Цель работы заключается в исследовании влияния алмазного выглаживания на структуру и свойства поверхности лазерного реза высоколегированной стали.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

На заготовки из среднеуглеродистой низколегированной стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-71) дугой прямого действия на постоянном токе обратной полярности в защитной среде аргона осуществляли наплавку порошковой проволокой, по химическому составу близкой к быстрорежущей стали Р9М4К8 (табл. 1). Наплавку выполняли на следующих режимах: сила тока – 180...190 А, напряжение – 21...22 В, скорость – 12 м/час. После наплавки заготовки подвергали низкотемпературному отпуску при 200 °С с выдержкой 1 час для снижения уровня остаточных напряжений, предотвращения образования холодных трещин [11, 12]. Затем полученные заготовки разрезали вдоль наплавленного валика с помощью лазерной резки на комплексе BySprint 3015 компании Bystronic. Параметры резки были следующие: мощность излучения – 3 200 Вт; скорость – 1,0 м/мин; давление вспомогательного газа азота – 1,5 МПа. Толщина разрезаемых образцов составляла около 4,4 мм.

Таблица 1. Химический состав стали Р9М4К8 (ГОСТ 19265-73)

С	Mn	Si	Cr	W	V	Co	Mo	Fe
1...1,1	0,2...0,5	0,2...0,5	3...3,6	8,5...9,5	2,3...2,7	7,5...8,5	3,8...4,3	Остальное

Выглаживание поверхности реза выполняли по упругой схеме [13] с использованием выглаживателя из синтетического поликристаллического алмаза с радиусом вершины  $R = 1,5$  мм. Обработку производили на одностоечном вертикальном координатно-расточном станке 2Е450АФ30 с числовым программным управлением, классом точности А и дискретностью отсчета координат 1 мкм по осям X, Y, Z. Выглаживатель устанавливали в головку плунжерного типа, позволяющую изменять усилие обработки  $P$  от 100 до 300 Н. Усилие контролировали по лимбу головки. Пластическое деформирование поверхности проводили с применением масла И-20А. Параметры были следующие: сила выглаживания – 200 Н; подача – 0,02 мм/об; скорость – 200 м/мин.

Количественную оценку микрогеометрии поверхности реза выполняли по профилограммам, записанным перпендикулярно ходу лазерного луча с помощью цифрового измерителя шероховатости TIME Group Inc. (модель TR-200). По профилограммам определяли высотные и шаговые параметры микрогеометрии для профиля шероховатости согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014: среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$ ; максимальную высоту пика профиля  $Rp$ ; общую высоту профиля  $Rt$ .

Исследования микроструктуры образцов проводили с использованием металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 при усилии 1,96 Н.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сущность процесса алмазного выглаживания заключается в упругопластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – алмазным индентором. При этом неровности поверхности, оставшиеся от предшествующей обработки, сглаживаются, повышается твердость поверхностного слоя. Изображение поверхности образца после лазерной резки и алмазного выглаживания представлено на рис. 1. Параметры микрогеометрии исследованных поверхностей приведены в табл. 2, распределение микротвердости – на рис. 2. Анализ табл. 2 показал, что шероховатость поверхности лазерного реза уменьшается в 3...4 раза после алмазного выглаживания. Этот факт позволяет получать рабочую поверхность инструмента без последующего механического шлифования.

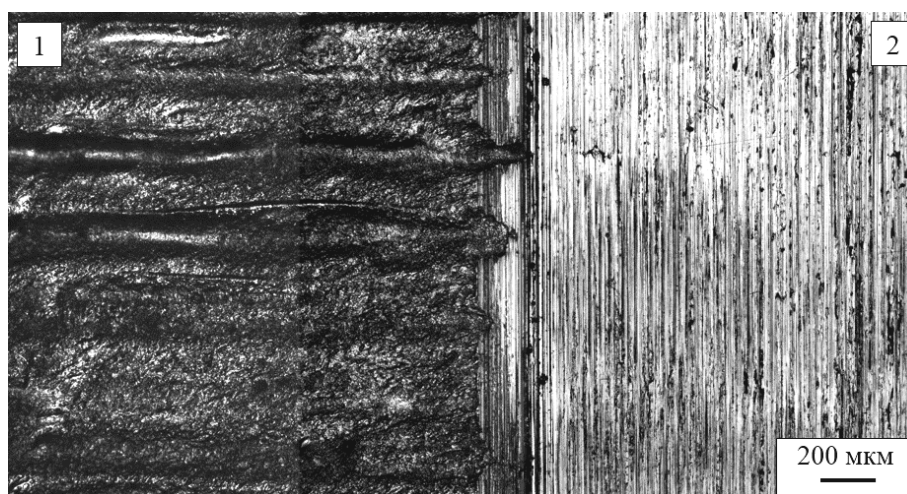


Рис. 1. Изображение поверхности образца:  
1 – после лазерной резки; 2 – после алмазного выглаживания

Таблица 2. Характеристики микрогеометрии поверхности

Обработка	Параметры шероховатости, мкм		
	$Ra$	$Rt$	$Rp$
Лазерная резка	1,4	12	5,3
Алмазное выглаживание	0,32	1,6	0,60

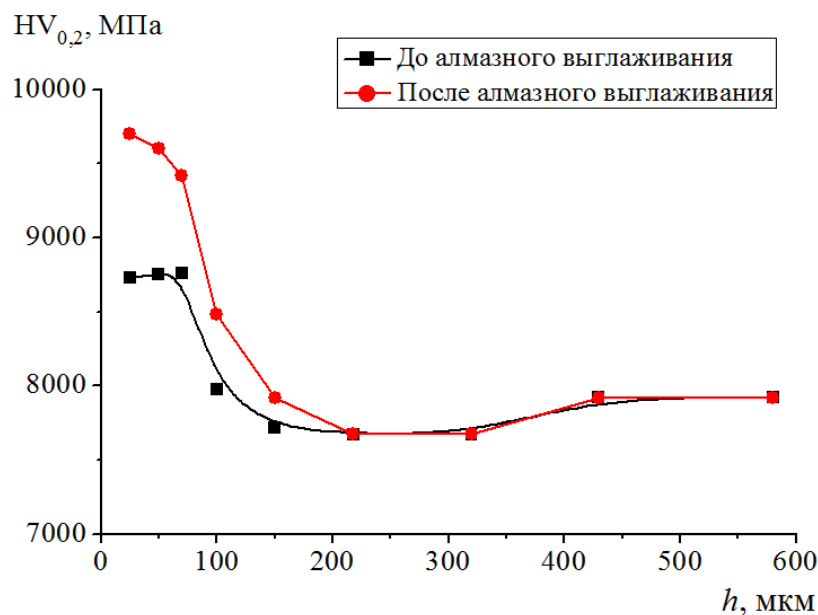
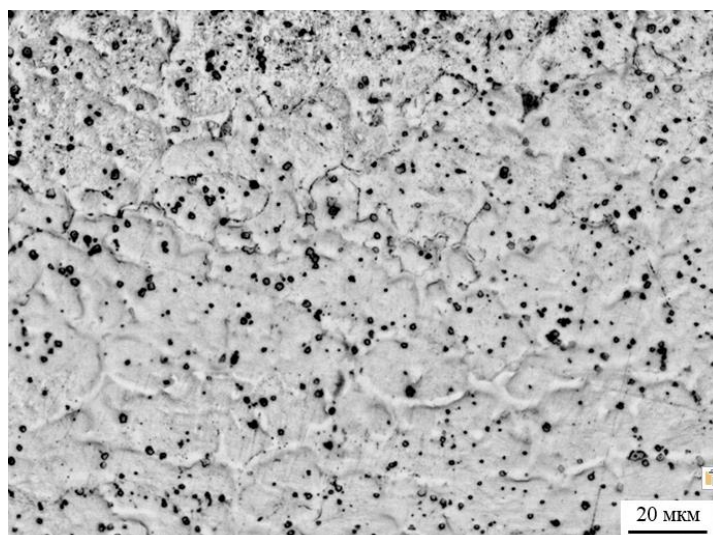


Рис. 2. Распределение микротвердости

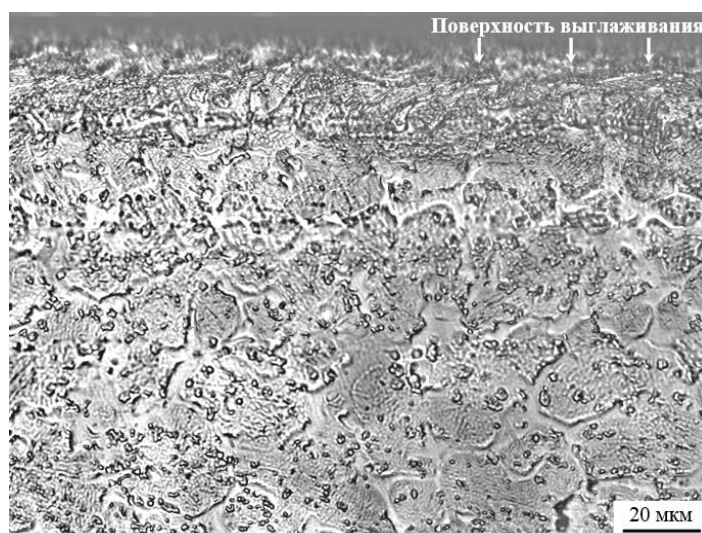
При тепловом воздействии лазерного излучения в стали происходят структурные превращения, приводящие к изменению свойств, в частности дополнительному упрочнению поверхностей реза [1]. Этот факт, наряду с макро- и микрогеометрическими свойствами поверхности реза, является одним из основных критериев, определяющих место лазерной обработки в технологическом процессе изготовления изделий и качество обработки.

При лазерной резке быстрорежущих сталей формируется зона термического влияния, имеющая слоистое строение [1, 7]. В поверхностном слое реза на глубину до 120...150 мкм произошла повторная закалка (см. рис. 2). Нижняя граница зоны закалки определяется нагревом до температуры точки  $A_{c1}$ , при которой образуется аустенит. Для стали марки P9M4K8 эта температура равна 800 °С. Фазовый состав стали в этом слое – остаточный аустенит, мартенсит и нерастворенные карбиды. Микроструктура наплавленной быстрорежущей стали в зоне закалки представлена на рис. 3а. Сталь в данной зоне имеет повышенную микротвердость  $HV_{0,2} = 8\,760 \pm 150$  МПа и обладает высокой устойчивостью к действию химических травителей, что косвенно свидетельствует о насыщении твердого раствора углеродом и легирующими элементами за счет растворения избыточных фаз.

Зона отпуска образуется при нагреве стали ниже точки  $A_{c1}$ , т.е. ниже температуры 800 °С. Протяженность зоны отпуска – около 200 мкм, микротвердость  $HV_{0,2} = 7\,700 \pm 120$  МПа. В этом слое имеет место незначительное понижение микротвердости (по сравнению с наплавленным металлом), связанное с началом распада мартенсита. Степень разупрочнения стали в зоне отпуска и ее протяженность зависят от режимов лазерной резки. Чем меньше по длительности термическое воздействие, тем выше твердость стали в зоне отпуска. Микроструктура быстрорежущей стали после наплавки и низкотемпературного отпуска представляет собой игольчатый мартенсит, остаточный аустенит и карбиды. Наплавленный слой вне зоны термического влияния имеет микротвердость  $HV_{0,2} = 8\,000 \pm 200$  МПа.



(а)



(б)

Рис. 3. Микроструктура наплавленной быстрорежущей стали  
вблизи поверхности лазерного реза: до (а) и после (б) алмазного выглаживания

Так как быстрорежущая сталь в зоне закалки содержит, помимо мартенсита и карбидов, значительное количество остаточного аустенита, то во время алмазного выглаживания возможно превращение  $Fe\gamma$  в  $Fe\alpha$ , т.е. остаточный аустенит будет превращаться в мартенсит деформационный. Кроме фазового превращения, в пластически деформированном слое происходит измельчение микроструктуры (см. рис. 3б). Все эти процессы приводят к заметному повышению микротвердости. Особенно значительное ее повышение происходит в поверхностном слое на глубину до 50 мкм (до значений 9 600...9 700 МПа (см. рис. 2)).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При лазерной резке быстрорежущей стали Р9М4К8 формируется зона термического влияния. В частности, на глубину до 150 мкм происходит повторная



закалка стали. В этой зоне наплавленная быстрорежущая сталь имеет микротвердость  $HV_{0,2} = 8\ 760 \pm 150$  МПа. Алмазное выглаживание поверхности лазерного реза позволяет в 3...4 раза снизить характеристики шероховатости, что дает возможность отказаться от механической обработки рабочих поверхностей инструмента. Кроме этого, в поверхностном слое происходит измельчение микроструктуры, повышение микротвердости до  $HV_{0,2} = 9\ 700 \pm 130$  МПа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрин А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ. 2006. 664 с.
2. Sobih M., Crouse P.L., Li L. Striation-free Fibre Laser Cutting of Mild Steel Sheets // *Applied Physics A*. 2008. V. 90. № 1. P. 171–174.
3. Tani G., Tomesani L., Campana G., Fortunato A. Quality Factors Assessed by Analytical Modelling in Laser Cutting // *Thin Solid Films*. 2004. V. 453. P. 486–491.
4. Wee L.M., Li L. An Analytical Model for Striation Formation in Laser Cutting // *Applied Surface Science*. 2005. V. 247. Is.1-4. P. 277–284.
5. Genna S., Menna E., Rubino G., Tagliaferri V. Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality // *Applied Sciences*. 2020. № 10 (14). P. 4956.
6. Kanyilmaz A. The Problematic Nature of Steel Hollow Section Joint Fabrication, and a Remedy Using Laser Cutting Technology: A Review of Research, Applications, Opportunities // *Engineering Structures*. 2019. № 183. P. 1027–1048.
7. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Измайлов В.В., Барчуков Д.А. Исследование триботехнических свойств поверхностей, полученных воздействием концентрированных потоков энергии. Тверь: ТвГТУ. 2022. 164 с.
8. Zhang Y., Fu H., Wang X., Liang H., Puzoza J.C., Ji J., Hua X., Xu X., Fu Y. Additional Tribological Effect of Laser Surface Texturing and Diamond-like Carbon Coating for Medium Carbon Steel at Near Room Temperature // *Coatings*. 2020. V. 10. № 10. P. 929.
9. Zablotskiy V., Moroz S., Tkachuk A., Prystupa S., Zabolotnyi O. Influence of Diamond Smoothing Treatment Power Parameters on Microgeometry of Working Surfaces of Conjugated Parts // *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes*. Cham: Springer International Publishing. 2019. P. 372–381.
10. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Интеллект. 2009. 472 с.
11. Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е. Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 16–22.
12. Барчуков Д.А., Вавилов Р.В., Якимюк Р.И. Исследование факторов, влияющих на образование трещин в наплавленных быстрорежущих сталях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 21–27.
13. Абрамов Ю.А. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение. 1985. Т. 2. 496 с.

**Для цитирования:** Барчуков Д.А. Влияние алмазного выглаживания на структуру и свойства поверхности лазерного реза высоколегированной стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 36–42.

# INFLUENCE OF DIAMOND BURNISHING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SURFACE OF LASER CUTTING HIGH-ALLOY STEEL

D.A. BARCHUKOV, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: bda@mail.ru

The results of studies of the microstructure, microhardness, microgeometry of the laser cut surface of deposited high-speed steel grade R9M4K8 after diamond burnishing are presented. It has been shown that the surface roughness of a laser cut is reduced by 3...4 times, which makes it possible to obtain a working surface without subsequent mechanical grinding. It is noted that diamond smoothing leads to microstructure refinement, increase of steel microhardness up to  $9\ 700 \pm 130$  MPa.

*Keywords:* laser cutting, steel, diamond burnishing, roughness, microstructure, microhardness.

Поступила в редакцию/received: 05.12.2023; после рецензирования/revised: 11.12.2023;  
принята/accepted: 15.12.2023

УДК 621.914.3

## УСТАНОВКА ВАЛА В МЕХАНИЗИРОВАННОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ С ДВУМЯ ЗАЖИМНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

© Архаров А.П., 2024

Представлен анализ известных способов и приспособлений для установки валов на металлорежущие станки при обработке шпоночных пазов. Изложена сущность разработанного способа установки ступенчатого вала. Раскрыты устройство и принцип действия спроектированного приспособления с двумя зажимными механизмами. Проведены сравнительные анализы предложенных способа и устройства с аналогичными известными решениями. Отражены оригинальность разработок и достигаемый технический результат.

*Ключевые слова:* вал, установка, шпоночный паз, расположение, способ, точность, приспособление, зажимной механизм.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-42-48**

### ВВЕДЕНИЕ

Многие изделия машиностроительного производства имеют валы с разнообразными конструктивными элементами. Среди них встречаются валы со шпоночными пазами на одном из концов и другими конструктивными элементами в

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (21), 2024*

виде, например, поперечных отверстий, торцовых пазов или граней, расположенных на другом конце. При этом допуски расположения шпоночного паза в поперечном и продольном направлениях задаются относительно базовой плоскости симметрии, проходящей через ось шейки, на которой он выполнен [1–3].

Для обработки валов на фрезерных и сверлильных станках используют приспособления с двумя неподвижными призмами, на которые устанавливают вал подшипниковыми шейками [4, 5]. Технологической базой в этом случае является общая ось упомянутых шеек. Данная технологическая база не совпадает с конструкторской, поэтому возникающая погрешность базирования снижает точность расположения обработанного паза.

При установке ступенчатого вала на фрезерно-центровальный станок используют наладку, содержащую привод и самоцентрирующий механизм с двумя ползунами, на каждом из которых закреплена пара призматических губок. Этим механизмом базируют и закрепляют вал одновременно по двум цилиндрическим поверхностям [6]. Однако при таком способе установки отклонения диаметров упомянутых поверхностей и погрешность их взаимного расположения приводят к деформациям закрепляемого вала.

Упомянутые деформации устраняются путем установки вала в питатель загрузочного устройства [7]. Это происходит за счет того, что губкам каждого из двух самоцентрирующих зажимных механизмов сообщают переменные движения. В результате закрепление вала выполняют губками только после прилегания их всех к закрепляемым поверхностям. Тем не менее применение двух самоцентрирующих механизмов для базирования и закрепления вала по двум поверхностям не устраняет погрешность базирования при фрезеровании шпоночного паза.

Для установки заготовки на центрах токарного станка применяют способ [8], в котором при базировании в качестве базы используют общую ось центровых отверстий. Однако при установке вала для обработки шпоночного паза, расположение которого нормируется относительно оси шейки вала, необходимо иное базирование.

При закреплении вала, установленного на центрах станка, применяют клиновой патрон с самоустанавливающимися кулачками [9]. В то же время в случае фрезерования шпоночного паза необходимо устанавливать вал не на центрах, а в приспособлении с базированием его той поверхностью, относительно которой задано расположение паза. Для такой схемы базирования требуются другие установочные элементы приспособления.

Известен способ установки заготовки при протягивании, в котором ее размещают, центрируют и предварительно зажимают верхним прижимом, а затем дополнительно зажимают с боков двумя рычагами. Эти рычаги совершают движения независимо друг от друга с момента соприкосновения с заготовкой и до ее зажима с двух сторон. Упомянутый способ позволяет устанавливать заготовку в виде втулки или диска при ее наружном контуре, смещенном относительно оси, а также заготовку несимметричного профиля [10]. Однако данный способ не может использоваться для установки ступенчатого вала, например, на обрабатывающий центр с числовым программным управлением. На таком оборудовании за один установочный цикл выполняется ряд переходов, таких как фрезерование шпоночного паза и обработка поверхностей, расположенных на разных участках по длине вала. При обработке шпоночного паза необходимо обеспечить точность его расположения относительно оси шейки, на которой он расположен, а при обработке конструктивных элементов, расположенных удаленно от упомянутой шейки, – устойчивость положения вала. В связи с этим необходима разработка нового способа и приспособления для установки ступенчатого вала. Решению данной задачи и посвящена настоящая статья.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании применялся структурный анализ используемых на практике, описанных в научной литературе и в патентной документации методов и приспособлений для установки валов на технологическое оборудование. При разработке нового способа и средства применялся синтез таких элементов, которые в совокупности образуют единое целое, отвечающее критерию оригинальности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основы разработанного способа принят способ установки ступенчатого вала в питатель загрузочного устройства [7].

В разработанном способе используют механизированное приспособление с самоцентрирующим и несамоецентрирующим зажимными механизмами и ложементом с уступом. В качестве несамоецентрирующего используют зажимной механизм с переменным движением губок. На ложементе размещают ступенчатый вал, располагая его базовой поверхностью между губками самоцентрирующего механизма и прижимая буртиком к уступу. Перемещают одновременно все губки зажимных механизмов на сближение с валом. При этом в момент, когда обе губки самоцентрирующего механизма коснутся вала, приостанавливают их движение при продолжении движений пары губок несамоецентрирующего механизма. При этом касанием обеих губок самоцентрирующего механизма обеспечивают центрирование и, соответственно, завершение базирования вала. При сближении с валом пары губок несамоецентрирующего механизма прерывают перемещение той его губки, которая первой коснется вала, при продолжении перемещения губки, не коснувшейся вала. В момент касания с валом второй губки несамоецентрирующего механизма возобновляют все прерванные перемещения губок и закрепляют вал одновременно всеми губками.

Использование приспособления, в котором только один из механизмов является самоцентрирующим, а другой – несамоецентрирующим, позволяет выполнять центрирование ступенчатого вала только самоцентрирующим механизмом, а закрепление его – одновременно обоими механизмами.

Сообщение губкам несамоецентрирующего механизма переменных движений обеспечивает им при одновременном прижатии к валу, вызванном погрешностью формы закрепляемой поверхности, а также погрешностями ее расположений относительно базовой поверхности вала и губок, неизменность положения вала, достигнутого при центрировании самоцентрирующим зажимным механизмом.

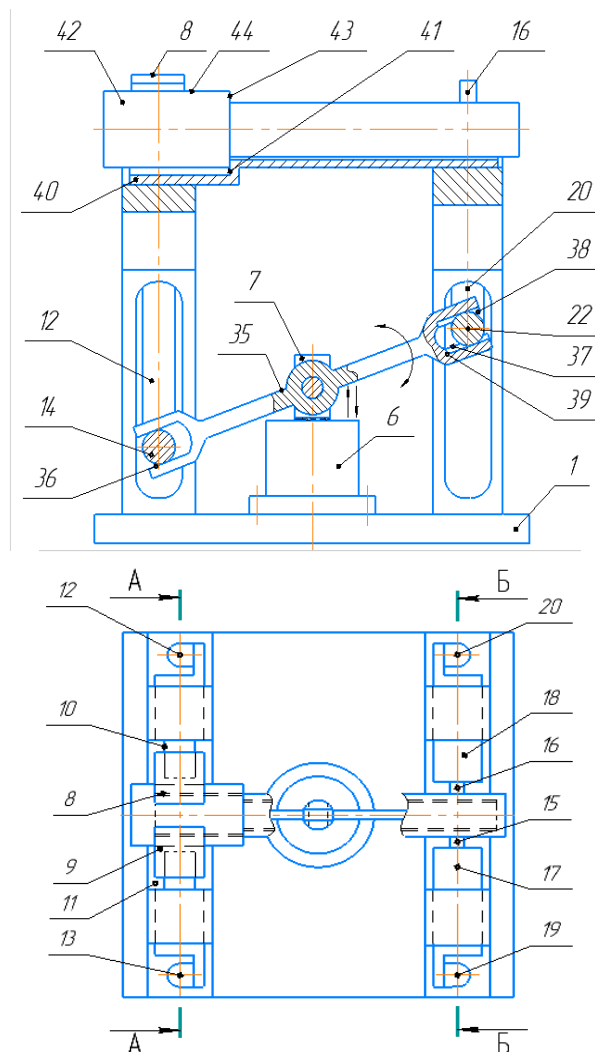
Использование ложементов с уступом и выполнение прижатия ступенчатого вала к этому уступу позволяют ориентировать этот вал в осевом направлении.

Для осуществления разработанного способа необходимо приспособление, у которого один из зажимных механизмов был бы выполнен самоцентрирующим, а другой – самоустанавливающимся.

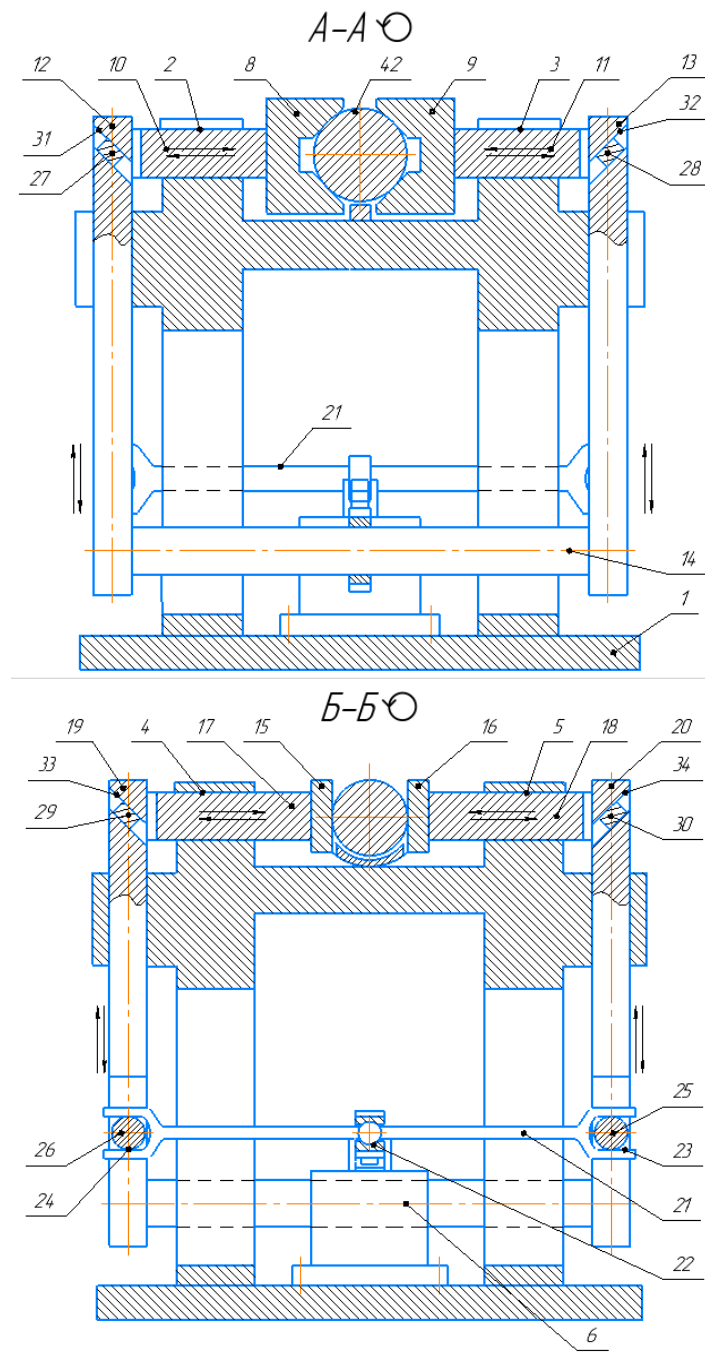
На рисунке показан общий вид приспособления.

Приспособление включает корпус 1 с пазами 2, 3, 4 и 5, привод 6 со штоком 7, установленный на корпусе 1, два зажимных механизма и передаточное звено. Один зажимной механизм выполнен самоцентрирующим и содержит две призматические губки 8 и 9, два ползуна 10 и 11, установленных соответственно в пазах 2 и 3 с возможностью их перемещения для сведения и разведения, толкатели 12 и 13, размещенные в направляющих корпуса 1 с возможностью перемещения вдоль своих продольных осей, и стержень 14, закрепленный на толкателях 12 и 13. Другой зажимной механизм содержит две плоские губки 15 и 16, два ползуна 17 и 18, установленных соответственно в пазах 4 и 5 с возможностью их перемещения для сведения и разведения, толкатели 19 и 20, размещенные в направляющих корпуса 1 с

возможностью перемещения вдоль своих продольных осей, и качалку 21, выполненную в ее средней части со сферической поверхностью 22, а по концам – с продолговатыми пазами 23 и 24 с возможностью сопряжения упомянутых пазов соответственно с цилиндрическими осями 25 и 26, закрепленными на толкателях 20 и 19. Губки 8 и 9 закреплены соответственно на ползунах 10 и 11, а губки 15 и 16 – на ползунах 17 и 18. Каждая пара губок размещена своими рабочими поверхностями напротив друг друга. На ползунах 10 и 11, 17 и 18 выполнены наклонные относительно их продольных осей выступы 27 и 28, 29 и 30 соответственно, расположенные в каждой паре разнонаправленно друг к другу. На толкателях 12 и 13, 19 и 20 выполнены наклонные пазы 31 и 32, 33 и 34, сопряженные соответственно с упомянутыми выступами. Передаточное звено выполнено в виде двулучевого рычага 35 с продолговатыми пазами 36 и 37 на концах его плеч и установленного на штоке 7 с возможностью поворота вокруг оси, расположенной перпендикулярно продольной оси штока 7. Упомянутый рычаг размещен с возможностью сопряжения продолговатым пазом 36 со стержнем 14, а радиусными канавками 38 и 39, выполненными на боковых сторонах продолговатым пазом 37, – со сферической поверхностью 22 качалки 21. Лоток 40 с уступом 41 закреплен на корпусе 1. Устанавливаемый ступенчатый вал 42 содержит буртик 43 и базовую поверхность 44.



Приспособление для установки вала



Продолжение рисунка

Устройство работает следующим образом. Вал 42 (см. рисунок) размещают на лотке 40, располагая его концом с базовой поверхностью 44 между призматическими губками 8 и 9, а другим концом – между плоскими губками 15 и 16. При этом прижимают его буртиком 43 к уступу 41. При закреплении срабатывает привод 6, который через шток 7 передает движение двуплечему рычагу 35. Упомянутый рычаг через сопряжение «продолговатый паз 36 – стержень 14» передает движение толкателям 12 и 13, а затем через сопряжение наклонного паза 31 с наклонным выступом 27 – ползуну 10, а через сопряжения наклонного паза 32 с наклонным выступом 28 – ползуну 11.

Одновременно другим плечом двуплечего рычага 35 движение через сопряжение «радиусные канавки 38 и 39 – сферическая поверхность 22» передается качалке 21, от которой через сопряжения продолговатых пазов 23 и 24 с соответствующими цилиндрическими осями 25 и 26 – толкателям 20 и 19, а далее через сопряжения наклонных пазов 33 и 34 с соответствующими наклонными выступами 29 и 30 – ползунам 17 и 18. После касания призматических губок 8 и 9 с валом 42 заканчивается его базирование, при этом движение упомянутых губок приостанавливается за счет сопряжения «продолговатый паз 36 – стержень 14». В то же время движение на сближение плоских губок 15 и 16 продолжается. В момент касания одной из плоских губок с валом 42 ее движение приостанавливается, а другой продолжается за счет сопряжения «радиусные канавки 38 и 39 – сферическая поверхность 22». После касания обеих плоских губок 15 и 16 с валом 42 возобновляются приостановленные движения всех губок и происходит одновременный зажим вала 42 обоими зажимными механизмами. Таким образом, центрируют ступенчатый вал самоцентрирующим зажимным механизмом, а закрепляют его одновременно двумя механизмами.

В разработанном приспособлении качалка и ее связь с толкателями второго зажимного механизма, а также связь качалки с двуплечим рычагом обеспечивают губкам упомянутого механизма возможность совершать переменные движения и самоустанавливаться по закрепляемой поверхности без выполнения этим механизмом центрирования ступенчатого вала. Причем за счет переменных движений губки перед закреплением могут самоустанавливаться по поверхности, имеющей погрешность формы и расположенной с отклонением от симметричности относительно упомянутых губок и от соосности относительно базовой поверхности вала. При этом не нарушается центрирование, выполненное первым механизмом. Клиновые сопряжения для передачи движения от толкателей к ползуну повышают надежность закрепления вала. Таким образом и обеспечивается решение поставленной задачи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ уровня техники и области способов и приспособлений для установки валов на технологическое оборудование позволил выявить достоинства и недостатки известных решений. Кроме того, он показал, что устранение выявленных недостатков является актуальной задачей. В разработанном способе установки базирование вала выполняют только самоцентрирующим зажимным механизмом, а его закрепление – одновременно обоими механизмами. В спроектированном приспособлении второй зажимной механизм выполнен самоустанавливающимся с переменным движением его губок. Это позволяет исключить влияние погрешности формы и расположения той поверхности, за которую самоустанавливающийся механизм закрепляет вал, на точность базирования. Техническим результатом является повышение точности установки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Палей М.А., Романов А.Б., Брагинский В.А. Допуски и посадки: справочник в 2 ч. СПб.: Политехника. 2009. Ч. 2. 629 с.
2. Анухин В.И. Допуски и посадки: учебное пособие. СПб.: Питер. 2007. 206 с.
3. Марков Н.Н., Осипов В.В., Шабалина М.Б. Нормирование точности в машиностроении: учебник / под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Высш. шк.; Академия. 2001. 335 с.
4. Горохов В.А., Схиртладзе А.Г. Проектирование и расчет приспособлений. Старый Оскол: ТНТ. 2009. 304 с.

5. Схиртладзе А.Г., Новиков В.Ю. Станочные приспособления: учебное пособие. М.: Высш. шк. 2001. 110 с.

6. Справочник технолога – машиностроителя: в 2 т. / А.М. Дальский [и др.]. М.: Машиностроение-1. 2003. Т. 1. 912 с.

7. Малов А.Н. Загрузочные устройства для металлорежущих станков. М.: Машиностроение. 1972. С. 208–211.

8. Архаров А.П., Митюшин С.С. Способ установки заготовки на центрах токарного станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 36–39.

9. Архаров А.П. Патрон клиновой механизированный для установки заготовки на центрах токарного станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 1 (5). С. 21–26.

10. Скиженок В.Ф., Лебедев Н.Ф., Ковзель Н.И. Автоматизация и механизация протяжных работ. М.: Машиностроение. 1974. С. 43–44.

**Для цитирования:** Архаров А.П. Установка вала в механизированное приспособление с двумя зажимными механизмами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 42–48.

## **MEASURING THE POSITIONAL DEVIATION OF HOLES COORDINATED IN THE ANGULAR DIRECTION AND RELATIVE TO THE CENTRAL HOLE OF THE PART**

A.P. ARKHAROV, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

Analysis of the known methods and devices for shaft installation on metal-cutting machines when processing keyways is done. The essence of the developed method for installing a stepped shaft is outlined. The device and operating principle of the designed device with two clamping mechanisms are presented. Comparative analyzes of the developed method and device with similar known solutions are carried out. The development originality and the achieved technical result are reflected in this work.

*Keywords:* shaft, installation, keyway, positioning, method, accuracy, device, clamping mechanism.

Поступила в редакцию/received: 08.12.2023; после рецензирования/revised: 12.12.2023;  
принята/accepted: 15.12.2023



# НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.331.002.5

## СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И РЕМОНТЕ ТОРФЯНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук, Е.В. ПОЛЕТАЕВА, к.т.н.

Тверской государственной технической университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gorloviv@yandex.ru

© Горлов И.В., Полетаева Е.В., 2024

Изложен новый подход при производстве деталей торфяных машин в условиях многономенклатурного производства. Установлено, что при синтезе технологического маршрута изготовления деталей торфяных машин в условиях непрофильного многономенклатурного производства часто возникает проблема загрузки существующих гибких производственных систем (ГПС). Рекомендовано обеспечивать производство дефицитных деталей торфяных машин в непрофильном производстве за счет рационального распределения технологических задач для каждого гибкого производственного модуля. Указано, что для повышения эффективности технологической подготовки используются системы автоматизированного проектирования технологических процессов, а также отмечено, что они не в полной мере обеспечивают достижение качественного решения, поскольку конкретная ГПС может не соответствовать типовому подходу для рассматриваемой детали. Для решения этой проблемы предложено провести анализ конструкторско-технологических элементов (КТЭ) детали и определить возможные способы их получения с учетом существующего оборудования. Обозначено, что для достижения высокой эффективности и необходимого качества продукции в условиях многономенклатурного производства с постоянно изменяющейся нагрузкой гибкого производственного модуля необходимо расширять технологические возможности ГПС за счет использования для имеющихся станков дополнительных технологических модулей, отвечающих за изготовление проблемных КТЭ.

*Ключевые слова:* торфяные машины, технология машиностроения, автоматизация, технологическая подготовка производства, структурная модель, групповая технология, гибкие производственные системы.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-49-59**

### ВВЕДЕНИЕ

Вследствие прекращения серийного производства ряда торфяных машин возникла глобальная проблема отсутствия необходимого количества качественных запасных частей для ремонта. В связи с этим организации, производящие капитальный и текущий ремонт оборудования для добычи торфа, были вынуждены изготавливать необходимые комплектующие самостоятельно (на базе имеющегося на балансе универсального оборудования) в условиях единичного производства, что в большинстве случаев не обеспечивает требуемого качества деталей и приводит к росту их

стоимости. В то же время большое количество машиностроительных предприятий в области дорожных и строительных машин столкнулось с проблемой сокращения производства, что может повлечь за собой снижение загрузки, а в перспективе даже банкротство. С другой стороны, предприятия, ушедшие с рынка, создают дефицит некоторых изделий, замещение которых другими производителями не всегда возможно, особенно в условиях санкционного давления на Россию.

Предприятия, продолжающие свою деятельность, для сохранения производства вынуждены браться за выпуск несвойственных им изделий в рамках малой серийности, что вызывает в их производственной системе значительные проблемы, связанные с адаптацией существующих технологических процессов к новым задачам. Решение данной проблемы возможно за счет использования технологических процессов, обладающих высокой гибкостью.

При использовании традиционного подхода в ходе изготовления деталей малой серийности использовалось универсальное оборудование, которое не отвечает двум основным требованиям – эффективности и стабильного качества. В настоящее время для достижения высокой эффективности и качества в многономенклатурном производстве существует несколько подходов. Одними из наиболее перспективных являются групповые технологии, которые основаны на применении гибких производственных систем (ГПС) [1].

Тем не менее в условиях реального производства не всегда получается реализовать требуемые параметры технологического процесса при изготовлении новой номенклатуры деталей. Может потребоваться существенное изменение имеющейся производственной системы. Следовательно, основной целью исследования является разработка алгоритма формирования маршрута обработки новой номенклатуры деталей в условиях группового производства.

### **СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТАЛЕЙ И РАЗРАБОТКА МАРШРУТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Для реализации групповой технологии необходима предварительная классификация деталей с последующей селекцией их на основе конструктивных и технологических признаков. Классификация деталей при подготовке к производству происходит с целью определения основных групп для технологически однородных деталей, что впоследствии обеспечит их совместное изготовление в рамках групповой технологии. При осуществлении классификации деталей учитывается ряд основных признаков:

- общность обработки конструкторско-технологических элементов (КТЭ);
- типоразмер;
- материал детали;
- способ получения заготовки (не всегда);
- требуемая точность размеров и шероховатость обрабатываемых поверхностей.

Следует учитывать также общность решения основных технологических задач. Нежелательно использование при изготовлении широкой номенклатуры деталей специальной технологической оснастки. Наиболее рациональный вариант заключается в том, что, например, для всех деталей группы на токарных операциях можно использовать трехкулачковый патрон одного типоразмера [2]. При разработке групповых технологических процессов необходимо выбирать такие детали, для обработки которых потребуется минимальное время на переналадку оборудования, т.е. минимум подготовительно-заключительного времени. Сходство маршрутов обработки также будет положительным критерием для объединения деталей в группу.

При включении в группу новой детали производится структурный анализ [3–6] для сравнения ее КТЭ с существующей номенклатурой КТЭ группы. Затем выбирают деталь-лидер, которая обладает самым большим количеством КТЭ среди деталей группы. На базе детали-лидера формируется комплексная деталь путем структурного обогащения ее недостающими КТЭ.

Рассмотрим группу, состоящую из деталей – тел вращения, которые относятся к типу дисков-втулок. Среди них есть корпуса подшипников, направляющие втулки, крышки, ступицы и др. Детали принадлежат к одному размерному ряду до 200 мм и имеют схожий набор КТЭ (таблица). На основе структурного анализа деталей группы была разработана комплексная деталь (рис. 1).

Сводная таблица КТЭ группы

Конструкторско-технологические элементы											
Цилиндр IT 8	Цилиндр IT 12	Цилиндр IT 14	Фасонная канавка IT 14	Торец IT 14	Торец IT 12	Отверстие IT 12	Отверстие IT 7	Резьбовое отверстие	Канавка IT 14	Фаска IT 12	Конус IT 7

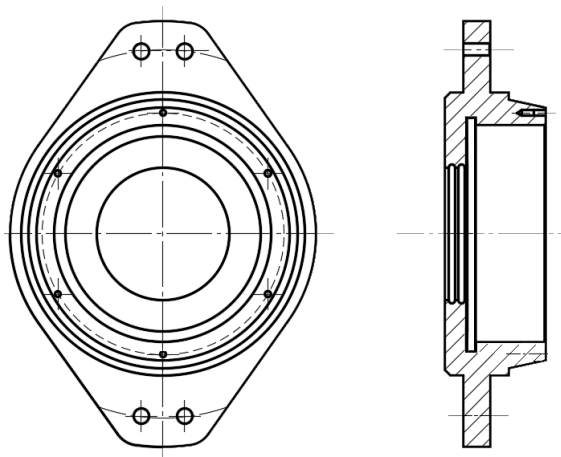


Рис. 1. Эскиз комплексной детали

Деталью-лидером в рассматриваемой группе является корпус подшипника. Эта деталь содержит максимальное количество КТЭ деталей группы. Корпус подшипника изготавливается из серого чугуна СЧ20, имеет центральное отверстие, выполненное по седьмому качеству, несоосные сквозные отверстия по двенадцатому качеству, торцевые поверхности, выполненные по четырнадцатому и двенадцатому качествам. Шероховатость поверхностей находится в пределах от Ra 0,63 до Rz 40. Для получения комплексной детали к детали-лидеру были добавлены глухие отверстия с резьбой и конусная поверхность. Другие детали группы изготавливаются из стали 45, 35Л.

В группу входят детали, которые производятся по условиям среднесерийного, мелкосерийного и единичного производства. Групповые технологические процессы строятся на основе принципов серийного производства и реализуются с помощью ГПС [7].

На основе анализа комплексной детали был разработан комплексный маршрут, состоящий из девяти операций:

- токарной черновой левой стороны;
- токарной черновой правой стороны;
- токарной чистовой левой стороны (включая получистовые переходы);
- токарной чистовой правой стороны (включая получистовые переходы);
- фрезерной левой стороны;
- фрезерной правой стороны;
- внутришлифовальной левой стороны;
- внутришлифовальной правой стороны;
- круглошлифовальной.

Ниже представлены технологические переходы и указано, на каком оборудовании они выполняются:

- токарный черновой – на ТС1625Ф3;
- токарный получистовой – ТС1730Ф4;
- токарный чистовой – ТС1730Ф4;
- фрезерный – ФС85МФ3;
- сверлильный – ФС85МФ3;
- зенковочный – ФС85МФ3;
- резьбонарезной – ФС85МФ3;
- закалка токами высокой частоты – индукционной печи с числовым программным управлением (ЧПУ) Delta NC30;
- внутришлифовальный – ОШ-525Ф3;
- круглошлифовальный – ОШ-525Ф3.

Способы и последовательность обработки КТЭ:

1) цилиндры, торцы и соосные отверстия до 9 качества включительно могут обрабатываться на токарных операциях точением и растачиванием (черновые, получистовые и чистовые переходы при условии достижения требуемой точности). На черновых операциях используется станок нормальной точности ТС1625Ф3, на получистовых и чистовых – станок повышенной точности ТС1730Ф4 с расширенными технологическими возможностями (имеются инструментальные позиции с приводом инструмента);

2) внутренние канавки прорезаются расточными резцами на получистовых или чистовых операциях (в зависимости от требования к поверхности, на которой они расположены);

3) наружные и внутренние фаски выполняются на получистовых и чистовых операциях (в зависимости от требований к поверхности, на которой они расположены);

4) фасонные поверхности фрезеруются обходом по контуру на станке ФС85МФ3 после токарных операций;

5) термообработка производится с помощью индукционной печи с ЧПУ Delta NC30. На ней ведутся различные виды термообработки в автоматическом режиме с учетом конструктивных особенностей деталей;

6) наружные цилиндры и конусы, внутренние соосные отверстия до IT6 обрабатываются на шлифовальных операциях после токарных на станке ОШ-525Ф3, который предназначен для наружного и внутреннего шлифования гладких и прерывистых

цилиндрических и конических поверхностей в телах вращения (детали типа валы, оси, штоки, оправки, фланцы и др.), закрепленных в центрах или патроне.

В группу, включающую детали – тела вращения, которые относятся к типу дисков-штулок, может быть добавлена любая деталь, КТЭ которой будут соответствовать указанным. Если новая деталь содержит элементы, не соответствующие элементам группы, для включения ее в группу потребуется изменение группового маршрута.

Решить названную проблему можно несколькими методами. Наиболее простой – с помощью специального инструмента с добавлением перехода на соответствующей операции. Это, например, использование фасонной фрезы для получения сложно-контурной поверхности. В данном случае затраты на изменение группового маршрута будут незначительные.

Второй путь – использование специализированной оснастки, расширяющей технологические возможности имеющегося оборудования [8]. Это, к примеру, применение дополнительных поворотных осей с ЧПУ для фрезерных станков с ЧПУ. Такие устройства позволяют изготавливать детали, у которых есть сложные поверхности, связанные между собой пространственными связями (зубчатые венцы или шлицы и др.). Если таких КТЭ относительно немного, то обработку можно проводить фасонным инструментом методом копирования (относительно недорогой вариант). Если таких элементов много, для повышения производительности следует использовать червячные фрезы, работающие методом обката (более дорогое решение).

Аналогично можно расширить технологические возможности станка ТС1730Ф4 за счет приводных блоков, установленных в револьверную головку. Такие блоки имеют унифицированные присоединительные поверхности, что дает возможность без дополнительных затрат монтировать их на станки с приводными позициями инструментальной головки. Приводные блоки дополнительно к имеющимся технологическим возможностям станка могут выполнять долбление поверхностей различной формы, фрезерование эвольвентных контуров до 8-й степени точности и звездочек методом обката.

Третий путь – добавление в групповой маршрут дополнительной операции с соответствующим оборудованием. Это, например, использование зубофрезерного станка с ЧПУ 53С11Ф5 при изготовлении зубчатых венцов, звездочек, шлицев. Данное решение является наиболее затратным, но самым эффективным при изготовлении большого количества зубчатых венцов, звездочек, шлицев.

Допустим, что нам нужно изготовить партию звездочек для бункерных торфяных уборочных машин. Звездочка (рис. 2) представляет собой деталь типа «диск», имеет два одинаковых зубчатых венца, ступицу с базовым отверстием, в котором имеются два шпоночных паза.

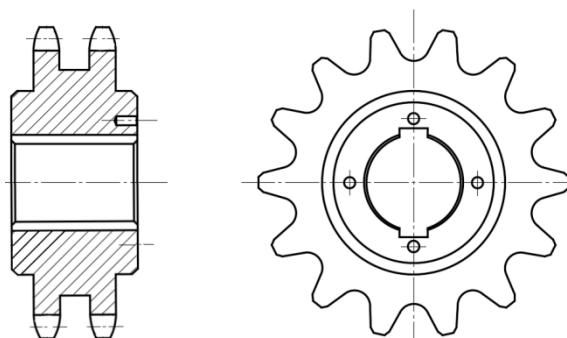


Рис. 2. Эскиз звездочки

На торце ступицы также имеются четыре резьбовых отверстия. Звездочка подвергается термической обработке – закалке.

Перед включением данной детали в рассматриваемую группу был проведен структурный анализ и разработана структурная модель (рис. 3). Анализ показал, что при изготовлении звездочки по рассмотренному групповому технологическому маршруту есть два лимитирующих КТЭ – шпоночный паз и зубчатый венец, которые не могут быть выполнены без изменения технологического процесса.

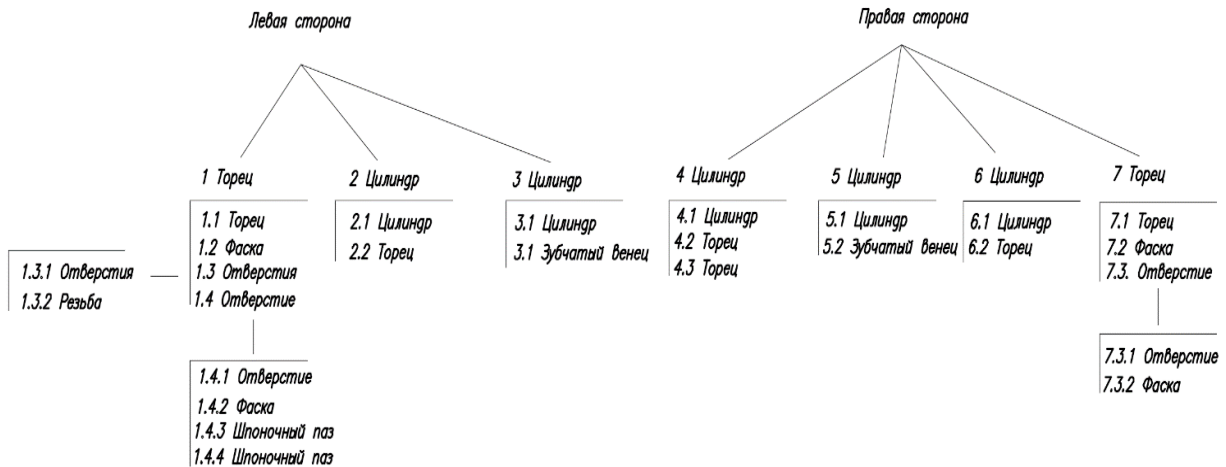


Рис. 3. Структурная модель детали «звездочка» с точки зрения конструкторских и технологических свойств

Традиционно шпоночные пазы в отверстиях изготавливаются протягиванием (в серийном производстве) или долблением (в единичном и мелкосерийном производстве). Однако в рассматриваемом групповом технологическом процессе нет соответствующего оборудования, поэтому при решении технологической задачи можно использовать долбежный блок для токарного станка с ЧПУ (рис. 4).

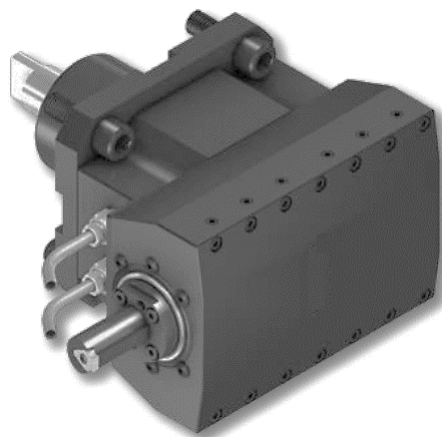


Рис. 4. Общий вид приводного долбежного блока для токарного станка с ЧПУ

Зубчатый венец звездочки может быть изготовлен на зубофрезерном станке, но в рассматриваемом групповом технологическом процессе такого оборудования нет. Следует использовать имеющийся фрезерный станок ФС85МФ3, оборудованный дополнительной поворотной осью с ЧПУ. Так как этот станок вертикально-фрезерный,

то обработку зубчатого венца можно проводить только методом копирования с использованием концевой фасонной фрезы, что приведет к низкой производительности. Другой вариант – использование зубофрезерного блока для токарного станка с ЧПУ ТС1730Ф4 (рис. 5).

Зубофрезерный блок позволяет обрабатывать зубчатые венцы методом обката с помощью червячных фрез, что дает высокую производительность процесса и более высокую точность изготовления. Следовательно, в рассматриваемом случае этот вариант будет предпочтительным.

Выбор конкретного решения зависит от большого количества факторов, но основным является загрузка оборудования [9]. При использовании групповых технологий в гибком автоматизированном производстве проблема распределения загрузки станков наиболее сложная.

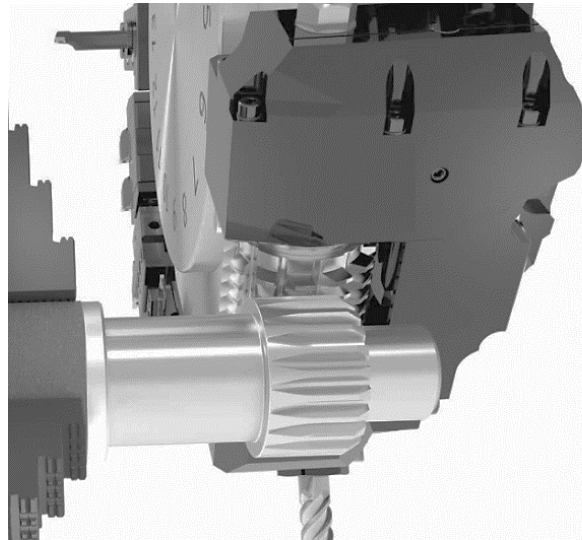


Рис. 5. Общий вид приводного зубофрезерного блока для токарного станка с ЧПУ

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ ГПС

Для представления процесса взаимодействия элементов производственной системы во времени проанализируем текущую задачу [9]. Например, на производственном участке с  $n$  количеством станков требуется произвести  $a$  номенклатуру деталей в количестве  $b_\varphi$  штук. Считается, что  $\varphi$ -я деталь может изготавливаться по  $a_\varphi$  маршрутам на рассматриваемом производственном участке. В общем виде формализовать эту задачу можно следующими выражениями:

$$D = \begin{cases} (t_1^{a,1}, c_1^{a,1}), (t_2^{a,1}, c_2^{a,1}), \dots, (t_{\beta_a^1}^{a,1}, c_{\beta_a^1}^{a,1}); \\ (t_1^{a,2}, c_1^{a,2}), (t_2^{a,2}, c_2^{a,2}), \dots, (t_{\beta_a^2}^{a,2}, c_{\beta_a^2}^{a,2}); \\ (t_1^{a,1}, c_1^{a,1}), (t_2^{a,1}, c_2^{a,1}), \dots, (t_{\beta_a^2}^{a,1}, c_{\beta_a^2}^{a,1}); \end{cases}$$

$$D_\varphi = \begin{cases} (t_1^{\varphi,1}, c_1^{\varphi,1}), (t_2^{\varphi,1}, c_2^{\varphi,1}), \dots, (t_{\beta_\varphi^1}^{\varphi,1}, c_{\beta_\varphi^1}^{\varphi,1}); \\ (t_1^{\varphi,2}, c_1^{\varphi,2}), (t_2^{\varphi,2}, c_2^{\varphi,2}), \dots, (t_{\beta_\varphi^2}^{\varphi,2}, c_{\beta_\varphi^2}^{\varphi,2}); \\ (t_1^{\varphi,a_\varphi}, c_1^{\varphi,a_\varphi}), (t_2^{\varphi,a_\varphi}, c_2^{\varphi,a_\varphi}), \dots, (t_{\beta_\varphi^{a_\varphi}}^{\varphi,a_\varphi}, c_{\beta_\varphi^{a_\varphi}}^{\varphi,a_\varphi}); \end{cases}$$

$$D_1 = \begin{cases} (t_1^{1,1}, c_1^{1,1}), (t_2^{1,1}, c_2^{1,1}), \dots, (t_{\beta_a^1}^{1,1}, c_{\beta_a^1}^{1,1}); \\ (t_1^{1,2}, c_1^{1,2}), (t_2^{1,2}, c_2^{1,2}), \dots, (t_{\beta_a^2}^{1,2}, c_{\beta_a^2}^{1,2}); \\ (t_1^{1,a_1}, c_1^{1,a_1}), (t_2^{1,a_1}, c_2^{1,a_1}), \dots, (t_{\beta_{a_1}^{1,a_1}}^{1,a_1}, c_{\beta_{a_1}^{1,a_1}}^{1,a_1}), \end{cases}$$

где  $D_\varphi$  – соответствующий номер для  $\varphi$ -й детали;  $t_i^{\varphi,j}$  – штучное время для обработки  $\varphi$ -й детали на  $i$ -й операции по  $j$ -му маршруту;  $a_\varphi$  – количество возможных маршрутов изготовления  $\varphi$ -й детали;  $c_i^{\varphi,j}$  – номер соответствующего станка, который выполняет  $i$ -ю операцию для обработки  $\varphi$ -й детали по  $j$ -му маршруту;  $\beta_\varphi^j$  – количество операций, необходимых для изготовления  $\varphi$ -й детали по  $j$ -му маршруту;  $a$  – количество различных деталей, изготавливаемых на участке.

Связи во времени должны быть организованы так, чтобы получить минимальное суммарное время при выполнении текущего задания ( $T_3$ ) для запланированного периода ( $T_{пл}$ ). Следовательно, требуется распределить задачи для станков так, чтобы суммарная загрузка станков  $z$  была минимальна, т.е.

$$z = \sum_{\varepsilon=1}^n (T_\varepsilon - z_\varepsilon),$$

где  $T_\varepsilon$  – фонд времени соответствующего станка  $\varepsilon$  для планируемого периода  $T_{пл}$ ;  $z_\varepsilon$  – соответствующая загрузка для  $\varepsilon$ -го станка.

Примем количество разных  $\varphi$ -х деталей, которые обрабатываются по  $j$ -му маршруту, в количестве  $x_{\varphi,j}$ . Ограничения по фонду рабочего времени для станков при выпуске деталей по принятой программе запишем следующим образом:

$$\sum_{\varphi=1}^a \sum_{j=1}^{a_\varphi} \sum_{i=1}^{\beta_\varphi^j} t_i^{\varphi,i} x_{\varphi,j} v_{i,\varepsilon} + t_\varepsilon = T_\varepsilon;$$

$$v_{i,\varepsilon} = \begin{cases} 1, c_i^{\varphi,j} = \varepsilon, \varepsilon = 1, 2, \dots, n, \\ 0, c_i^{\varphi,j} \neq \varepsilon; \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^{a_\varphi} x_{\varphi,j} = b_\varphi; \varphi = 1, 2, \dots, a; x_{\varphi,j} \geq 0; t_\varepsilon \geq 0,$$

где  $v_{i,\varepsilon}$  – логическая переменная, отвечающая за возможность обработки  $\varphi$ -й детали на  $\varepsilon$ -м станке;  $b_\varphi$  – объем выпуска  $\varphi$ -й детали;  $t_\varepsilon$  – недогрузка для  $\varepsilon$ -го станка.

В данном случае целевую функцию планирования, минимизированную с учетом величины  $z_\varepsilon$ , представим в виде

$$z = \sum_{\varepsilon=1}^n t_\varepsilon.$$

После решения представленной задачи можно установить для каждой единицы оборудования номенклатуру обрабатываемых деталей и соответствующие затраты времени при их изготовлении. Без этого нельзя выполнить планирование загрузки ГПС в условиях групповых технологических процессов.



Реализовать представленную модель можно следующим образом. Задача выбора оптимальной структуры станочной системы может быть приведена к задаче технологической сортировки. В этом случае все возможные варианты обработки детали представляются в виде ориентированного размеченного графа, а выбор оптимального маршрута обработки детали сводится к поиску пути в графе [11]. При этом разметка графа производится в соответствии с поставленной задачей, в которой учитываются:

- время обработки детали на станках линии,
- время транспортирования,
- стоимость обработки,
- стоимость транспортирования и т.д.

Если необходимо минимизировать время обработки или стоимость обработки детали, то задача сводится к математической задаче нахождения «кратчайшего пути» в графе. Если стоит задача балансировки маршрута, т.е. наиболее длительный процесс на маршруте должен быть по времени приближен ко времени остальных, то такая интерпретация критерия балансировки сводит исходную задачу к задаче нахождения «тончайшего пути» в графе.

Задача минимизации простоев станков может быть сведена к решению задачи оптимизации программы запуска деталей в станочной линии, так как при групповом производстве детали находятся в движении с различной продолжительностью операций и могут пропускать некоторые из них. В таком случае задача минимизации простоя станков сводится к задаче минимизации времени обработки всех деталей группы. Для решения может быть предложен алгоритм, основанный на имитационном моделировании и предназначенный для группового производства [12]:

1. Разбиение всех деталей номенклатуры на группы.
2. Построение для каждой группы обобщенной детали.
3. Построение для каждой группы всех возможных вариантов станочной системы.
4. Выбор оценочной функции, соответствующей цели исследования.
5. Построение оптимальной структуры станочной линии.
6. Разработка операционной технологии для каждой детали группы.
7. Определение оптимальной программы запуска деталей группы.

## **ВЫВОДЫ**

Проблему изготовления запасных частей для торфяных машин можно решить за счет привлечения к их созданию предприятий, специализирующихся на производстве сельскохозяйственной и строительно-дорожной техники, которые в условиях сокращения основного производства ищут дополнительные заказы. Однако традиционный подход при производстве деталей малой серийности с использованием универсального оборудования не обеспечивает необходимое качество продукции при условии приемлемых цен. Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование групповых технологий, которое позволит с минимальными затратами производить дефицитные детали для торфяных машин в условиях малой серийности и обеспечивать высокую эффективность своего производства за счет снижения времени на переналадку ГПС [13, 14]. Одним из необходимых условий при этом является высокая гибкость производственной системы, которая обеспечивается за счет применения станков с ЧПУ и специализированной технологической оснастки.

В условиях, когда торфяные предприятия не могут быть обеспечены нужным количеством запасных частей соответствующего качества, непрофильные машиностроительные предприятия могут заместить традиционных производителей, ушедших с рынка. Использование ГПС на основе групповых технологий и современные подходы к

реализации технологических процессов для дефицитных деталей торфяных машин дают возможность обеспечить требуемое качество изделий при условии высокой эффективности [15].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горлов И.В., Полетаева Е.В. Синтез технологического процесса на основе анализа структурной модели детали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1 (1). С. 12–20.
2. Сивцев Н.С. Приспособления для многооперационных станков с ЧПУ: учебное пособие для студентов вузов: в 2 ч. Ч. 1. Системы переналаживаемых приспособлений. Ижевск: ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. 2014. 96 с.
3. Литовка Ю.В. Автоматизация технологической подготовки производства. Тамбов: ТГТУ. 2003. 33 с.
4. Чижов М.И., Бредихин А.В. Разработка подхода к автоматизации технологической подготовки производства в PLM-системе Teamcenter // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011. Т. 7. № 12-1. С. 24–26.
5. Новоселецкий Б.В., Редько Р.Г., Редько О.И. Особенности технологии обработки деталей типа тел вращения на гибких автоматизированных линиях // *Наукові нотатки*. 2014. № 47. С. 125–130.
6. Аскалонова Т.А., Леонов С.Л., Ситников А.А. Организация групповой технологии в гибких производственных системах // *Вестник современных технологий*. 2016. № 1 (1). С. 4–9.
7. Мещерякова В.Б., Стародубов В.С. Металлорежущие станки с ЧПУ: учебное пособие. М.: ИНФРА-М. 2015. 335 с.
8. Пушинин В.Н., Ерохин И.А., Корнев Д.Ю., Скиба В.Ю. Станочное оборудование, основанное на компенсировании нескольких технологических операций // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2014. № 1. С. 245–255.
9. Мартынов Р.С. Сокращение времени переналадки оборудования как фактор повышения эффективности использования материальных ресурсов на предприятии // *Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета*. 2011. № 4. С. 87–90.
10. Ерофеева Е.В., Головушкин Б.А. Системы управления технологическими процессами: учебное пособие. Иваново: ИГХТУ. 2012. 95 с.
11. Полетаева Е.В., Горлов И.В. Оптимизация структуры производственной системы в условиях многономенклатурного машиностроительного производства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 77–82.
12. Полетаева Е.В., Горлов И.В., Филин О.С. Оптимизация последовательности запуска группового производства // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2020. № 13. С. 86–92.
13. Куприянова Т.М., Растимешин В.Е. Реализация технологии быстрой переналадки: российский опыт // *Методы менеджмента качества*. 2007. № 6. С. 4–9.
14. Звягина Е.А., Мимонов А. Оптимизация процесса механической обработки детали на основе применения быстропереналаживаемого технологического оборудования // *Инновации, качество и сервис в технике и технологиях*. 2014. С. 224–229.

15. Бухалков М.И., Кузьмин М.А., Павлов В.В. Особенности проектирования и организации группового производства в машиностроении // *Организатор производства*. 2010. Т. 47. № 4. С. 27–32.

**Для цитирования:** Горлов И.В., Полетаева Е.В. Синтез технологических маршрутов изготовления деталей при производстве и ремонте торфяных машин в условиях многономенклатурного производства // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Технические науки». 2024. № 1 (21). С. 49–59.

## **SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL ROUTES FOR MANUFACTURING PARTS IN THE PRODUCTION AND REPAIR OF PEAT MACHINES IN CONDITIONS OF MULTIPLE PRODUCTION**

I.V. GORLOV, Dr. Sc., E.V. POLETAEVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: gorloviv@yandex.ru

A new approach is outlined in the production of peat machine parts in a multi-range production environment. It has been established that when synthesizing the technological route for manufacturing peat machine parts in conditions of non-core diversified production, the problem of loading existing flexible production systems (GPS) often arises. It is recommended to ensure the production of scarce parts of peat machines in non-core production due to the rational distribution of technological tasks for each flexible production module. It is indicated that computer-aided process design systems are used to improve the efficiency of technological training, and it is also noted that they do not fully ensure the achievement of a high-quality solution, since a specific GPS may not correspond to the typical approach for the part in question. To solve this problem, it is proposed to analyze the design and technological elements (CTE) of the part and determine possible ways to obtain them, taking into account existing equipment. It is indicated that in order to achieve high efficiency and the necessary product quality in a multi-product production environment with a constantly changing load of a flexible production module, it is necessary to expand the technological capabilities of GPS by using additional technological modules for existing machines responsible for the manufacture of problematic CTE.

*Keywords:* peat machines, mechanical engineering technology, automation, technological preparation of production, structural model, group technology, flexible production systems.

Поступила в редакцию/received: 30.11.2023; после рецензирования/revised: 12.12.2023;  
принята/accepted: 15.12.2023

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПЛОЩАДКИ ТОРФЯНОГО УЧАСТКА

О.В. ПУХОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: owpuhova@mail.ru

© Пухова О.В., 2024

Рассмотрены вопросы о возможности использования вертикального принудительного кустового дренирования для дополнительного осушения сильно-обводненной производственной площадки на торфяном участке эфтрофного типа. Выявлено наименьшее отрицательное воздействие дренирования на окружающую природную среду, в частности на режим прилегающих водных объектов, при отработке торфяного месторождения «Ильинское». Изучено влияние дополнительного принудительного осушения (в зависимости от осадков и объема откачанной воды) на показатели изменения уровней грунтовых вод в скважинах и каналах. Проанализировано взаимодействие вертикальных скважин с торфяной залежью в процессе дополнительного принудительного осушения на контрольном участке в течение сезона. Установлено, что для вертикальной фильтрации особенности эпюры напоров зависят от изменений коэффициента фильтрации в слоях залежи. Выявлено, что непрерывная откачка воды из вертикальных скважин привела к образованию депрессионной воронки с местными дополнительными понижениями вблизи скважин. Подтверждена эффективность использования вертикального дренирования при понижении влажности эксплуатационного слоя ниже нормы (до 73,3 %). Отмечено, что по толщине залежь уплотнилась неравномерно, а распределение потенциалов влаги было неравновесным и зависело от расстояния до осушителей, а также от фильтрационных свойств торфа и других факторов.

*Ключевые слова:* торф, торфяная залежь, осушение, вертикальный дренаж, гидрологический режим, уровень грунтовых вод, напор, коэффициент фильтрации, дебит скважины, вертикальная фильтрация.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-60-68**

### ВВЕДЕНИЕ

В современных экономических условиях [1–3] горнопромышленные предприятия активно применяют комбинированные схемы в мелиорации торфяных участков низинного типа, под которыми расположена морена, перенесенная ледниковым щитом. Такой подход способствует снижению эксплуатационных затрат при производстве органоминеральных торфяных грунтов и субстратов и улучшителей почвы [4, 5] для садоводства и позволяет (в соответствии с законодательством) проводить рациональное и полное извлечение торфа [6].

Торфяное месторождение сильно обводненное, и при подготовке производственных площадок к эксплуатации проводятся гидротехнические мероприятия по осушению торфяной залежи [7–9]. Грунтовые воды торфяного месторождения в естественном состоянии до осушения близко подходят к поверхности и в особо пониженных местах выступают на дневную поверхность. Сама торфяная

залежь при этом находится в состоянии сильного водонасыщения и обладает низкой несущей способностью, что делает невозможным перемещение по ней машин и оборудования для осуществления производственного процесса добычи торфа. В результате осушения естественная влажность торфяной залежи уменьшается до эксплуатационного значения, требуемого для добычи торфяного сырья кондиционной влажности; торфяные частицы сближаются и поверхность залежи уплотняется, создавая ей несущую способность для передвижения торфяных машин и оборудования, а также повышается выход воздушно-сухого торфа. Важно отметить, что осушение способствует созданию плотной выровненной торфяной поверхности производственной площадки. При разработке плана развития горных работ на сезон добычи торфа особое внимание уделяется горно-геологическим и гидрологическим условиям на лицензионном участке, а также многолетним среднегодовым показателям и текущим значениям метеорологических факторов [10]. Это связано с технологией добычи торфа, в которой для понижения влажности готовой продукции до уборочных значений используется сушка в естественных условиях на поверхности торфяного расстила производственных площадок.

Анализ осушительной сети торфяного участка на месторождении «Ильинское» Тверской области показал, что она неработоспособна в связи с нахождением участка в пойме реки и близким выходом грунтовых вод. Такие же проблемы возникают на торфопредприятиях не только Российской Федерации, но и ряда зарубежных стран, в частности Ирландии (рис. 1). Заложенная осушительная сеть, состоящая из множества открытых осушителей (валовых, картовых и магистральных) [7, 8], оказалась неспособна отводить воду с производственной площадки участка и регулировать уровни грунтовых вод в осушительных каналах, а также поверхностный сток дождевых вод.



Рис. 1. Неработоспособная система осушительной сети на торфяном участке

Названные выше проблемы привели к снижению объемов добычи и в целом к невыполнению программы, установленной в соответствии с цикловым плановым графиком [11]. Для понижения влажности верхнего слоя залежи прокладка закрытых дрен на данном торфяном участке невозможна из-за трудности их заложения и быстрого смыкания вследствие сильного обводнения залежи. При подготовке производственной площадки торфяного участка для создания благоприятных условий процесса сушки торфяного сырья, т.е. понижения влажности эксплуатационного слоя подстилающей залежи, необходимо дополнительное принудительное осушение производственной площадки. Для этого предложено применить вертикальный дренаж (водопонижающие скважины). Таким образом, цель работы заключалась в оценке целесообразности использования вертикального скважинного дренирования для

дополнительного осушения торфяного участка с наименьшим отрицательным воздействием на окружающую среду, в первую очередь – на режим прилегающих водных объектов (реки Малицы). В ходе исследования была разработана дополнительная схема осушения торфяной залежи и определено влияние вертикального дренирования на изменение характеристик торфяной залежи.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научно-исследовательская работа выполнялась на производственной площадке торфяного участка месторождения «Ильинское», которое располагается в Лихославльском районе Тверской области (6,5 км на юго-запад от города Лихославля, юго-западнее села Ильинское). Площадь месторождения составляет 302 га, глубина – 5,2 м. Находится месторождение на левобережном склоне к реке Малица. Тип залежи низинный, степень разложения – 28 %, беспнистая, естественная влажность – 84,8 %, зольность – 12 %, уклон местности – с северо-востока на юго-запад, микрорельеф – волнистый, имеются подстилающие грунты пески и суглинки.

Месторождение имеет пологий склон и ровный рельеф поверхности. Производственная площадка находилась обособленно на юго-западной окраине в самой пониженной части месторождения. В центре ее были заложены три специальные вертикальные водопонижающие скважины с сетчатыми фильтрами (рис. 2) в водоносном слое, оборудованные погружными насосами. Из скважин откачка воды велась непрерывно. Она отводилась в ближайший искусственный водоприемник. Максимальное количество воды из скважины (дебит скважины) определялось либо большой мерной емкостью (а именно бочкой, после чего объем воды делили на время) в тех случаях, когда уровень постоянно падал до полного исчезновения, но через некоторое время восстанавливался и откачка возобновлялась; либо по паспортной производительности насоса в тех случаях, когда при откачке уровень устанавливался на одной отметке (т.е. вода прибывала в скважину со скоростью откачки насосом).

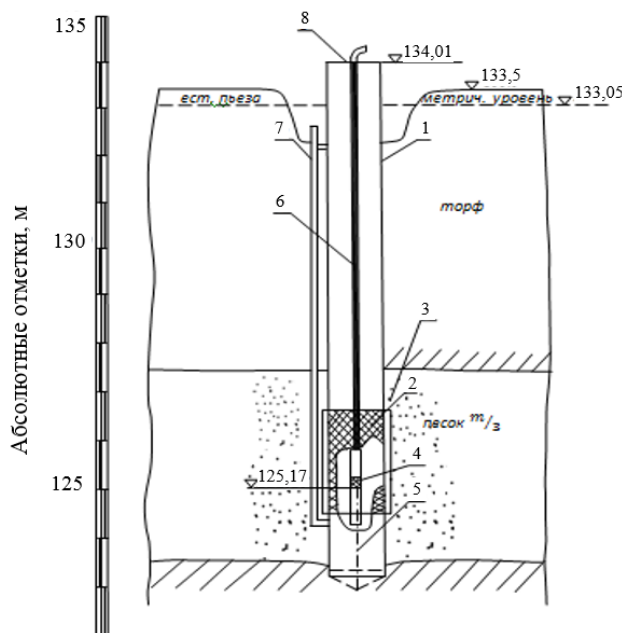


Рис. 2. Разрез вертикальной скважины: 1 – фильтровая труба (273 мм); 2 – сетка фильтра; 3 – крупно-песчаная обсыпка; 4 – всасывающая сетка насоса; 5 – деревянная пробка; 6 – напорный трубопровод; 7 – наблюдательная трубка; 8 – опорная плита насоса

В скважине уровень измерялся от уровня поверхности залежи до зеркала воды в ней при помощи веревки с привязанным грузом (при опускании в воду до булька). Ежедневно проводились измерения уровня грунтовых вод в залежи и пьезометрического уровня в подстилающих песках. Уровень грунтовых вод в картовых каналах контролировался линейкой. Осадка поверхности определялась нивелированием поверхности залежи. В центре карт по всей глубине залежи ежедневно отбирались пробы торфа на влажность.

Сбор метеорологических показателей осуществлялся ежедневно с фиксацией значений температуры воздуха и смоченного термометра (термометров в психрометрической будке); влажности воздуха (психрометра); облачности (визуально) и количества выпавших осадков (осадкомера Третьякова); скорости ветра (ручного анемометра) и атмосферного давления (барометра-анероида). Влажность торфа определяли стандартным весовым методом.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На экспериментальном участке планировалась добыча фрезерным способом торфяного сырья для приготовления питательных грунтов [5, 12–14]. В технологической схеме добычи процесс сушки будет тем интенсивнее, чем эффективнее проведено осушение торфяного массива. Это обуславливает меньшие значения эксплуатационной влажности и подпитку влагой из залежи сушимого слоя. В центре торфяных карт расположение поверхности грунтовой свободной воды (норма осушения) относительно спрофилированной поверхности (кривой депрессии) определялось измерением расстояний от поверхности грунтовых вод до поверхности торфяной залежи [7, 9]. При норме осушения более 50 см (рис. 3) подпитка торфяного слоя из торфяного расстила отсутствовала, поэтому не оказывала на процессы сушки негативного влияния. Хорошо спрофилированная поверхность торфяного расстила быстро отводила стоки [15] дождевых вод, но при меньших значениях нормы осушения (или высоком уровне грунтовых вод) зона аэрации уменьшалась за счет капиллярного поднятия, вызывая значительную подпитку верхнего слоя влагой. Тем самым ухудшался процесс сушки сфрезерованного слоя.

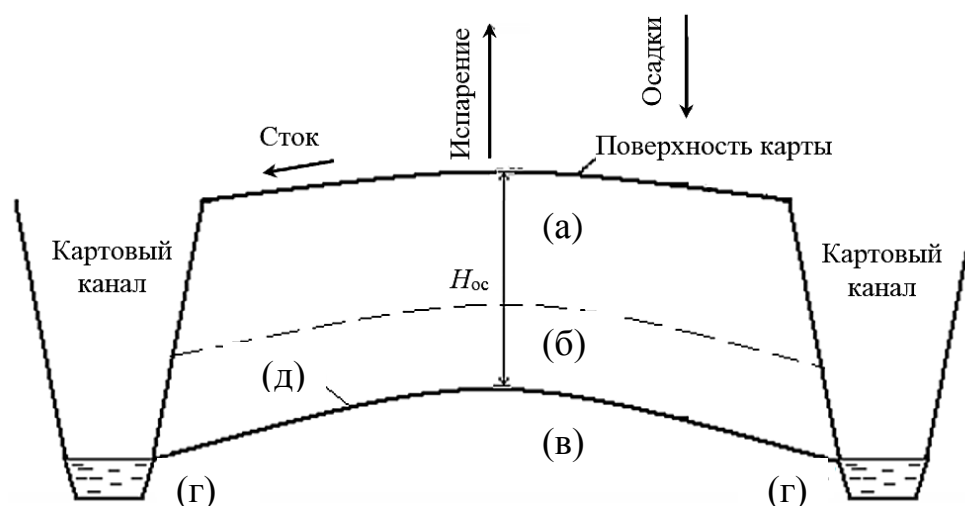


Рис. 3. Разрез карты между двумя каналами: зона аэрации (а); капиллярного поднятия (б); грунтовых вод (в); высачивания (г); поверхность депрессии грунтовых вод (д);  $H_{ос}$  – норма осушения

Проведенные гидротехнические мероприятия по осушению производственной площадки торфяной залежи с прокладкой открытой осушительной сети (два валовых канала и девять картовых) позволили частично сбросить избыточную воду и ограничить поступление поверхностных вод с прилегающих территорий (ловчий канал), что дало возможность снизить уровень грунтовых вод и немного уменьшить влажность торфяного расстила. При этом увеличилась несущая способность торфяной залежи, однако недостаточно снизилась влажность верхнего слоя, так как в каналах стояла вода, хотя по нормативам ее быть не должно (поскольку уровень воды в нормально работающих осушителях (например, в картовых каналах) всегда ниже уровня грунтовых вод в залежи). Наличие воды в каналах не позволяло снизить эксплуатационную влажность до нормы, т.е. до 75 %. В связи с этим была разработана дополнительная схема осушения торфяного массива вертикальным дренированием системой скважин. При откачках приток воды к скважинам складывался из двух составляющих: фильтрации воды сверху и притока со стороны по слою песка.

Процесс понижения уровня воды в скважине, первоначально наполненной до уровня грунтовых вод в залежи, происходил следующим образом. В начальный момент вода фильтровалась из скважины в залежь по всей смоченной поверхности, а объем убывшей воды замещался воздухом. Понижение уровня происходило до тех пор, пока не наступало равновесие между поступлением воды в одну часть скважины и истечением из другой ее части. При откачке воды вблизи скважин начала формироваться депрессионная воронка с дополнительными местными понижениями, а осушающее действие вертикальных скважин проявилось при взаимодействии [16, 17] их с осушаемой торфяной залежью. Энергетические состояния массива и скважины различны и характеризовались распределением потенциала влаги в их объемах, что обуславливает необходимость взаимодействия. Принципиальное различие в распределении потенциалов влаги в скважине и залежи состоит в том, что в скважине всегда существует равновесное распределение потенциалов влаги, в то время как в залежи оно всегда неравновесное. Были зафиксированы изменения объема откачанной воды и напора (дебита) за 3 месяца. К третьему месяцу он уменьшился, что показано на рис. 4. Эпюра распределения напоров по вертикали для массива характеризовалась увеличением градиентов напора по мере приближения к подошве залежи. Общая потеря напора при вертикальной фильтрации в залежи во времени увеличивалась. При неизменной глубине уровня грунтовых вод от поверхности это свидетельствовало о снижении коэффициента фильтрации торфа (ввиду его уплотнения) во времени.

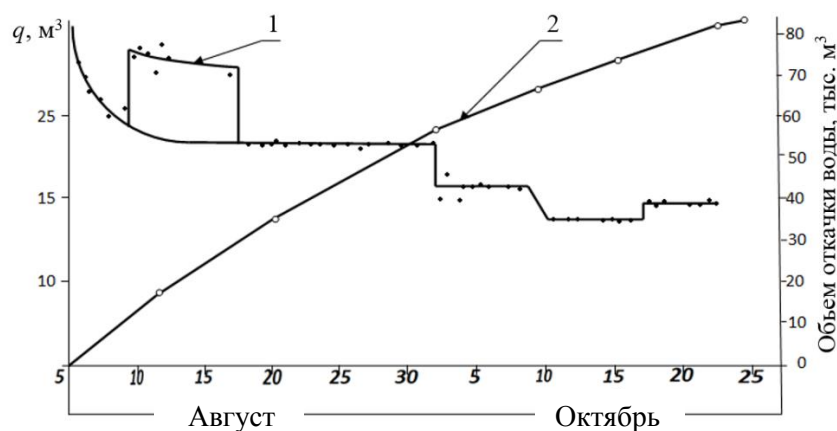


Рис. 4. Поведение скважины в течение сезона:  
1 – изменение дебита; 2 – объем откачки



Верхняя часть скважин работала на всасывающем воду режиме; из нижней части происходила инфильтрация воды в залежь. Условием этого взаимодействия выступало отсутствие в объеме скважины сопротивления для движения воды и воздуха в вертикальном направлении, что способствовало увеличению воздухопроницаемости залежи, необходимому для понижения уровня грунтовых вод.

Особенности эпюры напоров для вертикальной фильтрации объясняются характером изменения коэффициента фильтрации в слоях залежи: уменьшением его по мере приближения к подошве залежи, что обусловлено неравномерным и увеличивающимся к низу уплотнением торфов по глубине залежи. При этом в процессе дополнительного осушения имело место неравновесное распределение потенциалов влаги, выраженное в разной степени. С этой целью наряду с потенциалом влаги, который характеризовал физическое состояние воды (отрицательное или положительное давление), использование полного потенциала влаги позволило сравнивать между собой энергетические уровни влаги в различных точках производственной площадки (независимо от их расположения по глубине).

В ходе откачек поверхность залежи получила среднюю осадку 40...60 см. По толщине залежи уплотнение происходило неравномерно; наибольшее (до 50 %) отмечено в самом нижнем слое залежи. Чем выше слой в залежи, исключая зону аэрации, тем меньше степень его уплотнения. Применение вертикального дренирования позволило уменьшить влажность эксплуатационного слоя до величины ниже нормы (73,3 %) (рис. 5).

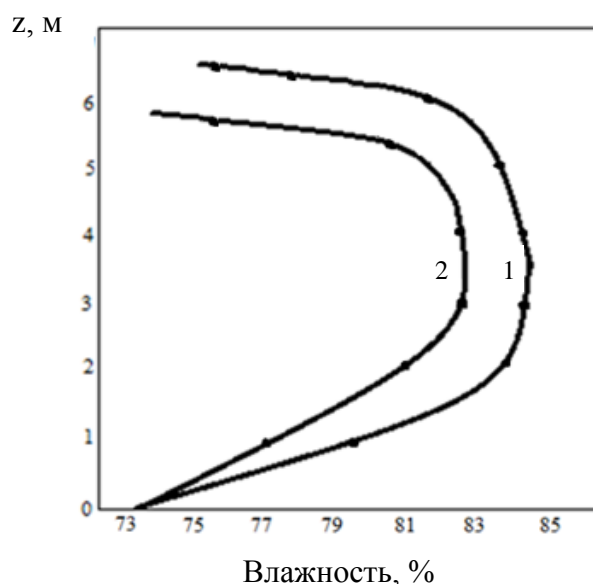


Рис. 5. Изменение влажности при дополнительном осушении:  
1 – первый сезон; 2 – второй сезон

В залежи происходило горизонтальное движение влаги, но при этом вертикальные градиенты полного потенциала не равны нулю, так как влага имела и вертикальное движение и двигалась от большего потенциала к меньшему, т.е. с учетом направления потока получалось движение сверху вниз. Для точек залежи, расположенных ниже уровня грунтовых вод, движение влаги происходило по направлению к осушителю.

Вертикальная составляющая градиента полного потенциала на близком расстоянии от осушителей имела сравнительно большую величину (при глубоких

осушителях приближающуюся к единице), а при удалении от осушителей величина вертикального градиента уменьшалась, а распределение полных потенциалов приближалось к равновесному. Движение влаги обусловлено различием потенциалов в осушителе и залежи и происходит с малой интенсивностью из-за небольших градиентов потенциала. На участке выше уровня грунтовых вод вертикальное движение влаги направлено вниз, а на участке, расположенном ниже уровня воды в осушителе, движение влаги происходит вверх.

В каком бы положении уровень воды в скважине ни находился, энергетического равновесия между скважиной и залежью достигнуть невозможно. Установление сравнительно устойчивого уровня не означает, что получено энергетическое равновесие, а указывает на динамическое равновесие между поступлением воды в скважину через верхнюю ее зону и расходом ее в нижней зоне.

На обособленной производственной площадке торфяного месторождения «Ильинское» применение вертикального дренирования для дополнительного осушения целесообразно, поскольку вертикальный принудительный дренаж понижает напор в торфяной залежи и обеспечивает отвод стока атмосферных осадков и снижение уровня грунтовых вод с обеспечением влажности эксплуатационного слоя ниже нормы.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. В процессе принудительного осушения вертикальными скважинами в начальный момент вода фильтровалась из скважин в залежь по всей смоченной поверхности, а объем убывшей воды замещался воздухом. Уровень снижался до тех пор, пока не наступало равновесие между поступлением и истечением из скважины воды и пока вблизи скважин не сформировалась депрессионная воронка с дополнительными местными понижениями. Обезвоживающее действие вертикальных скважин проявилось при взаимодействии их с осушаемой торфяной залежью. Распределение напоров по вертикали в массиве характеризовалось увеличением градиентов напора по мере приближения к подошве залежи. Общая потеря напора при вертикальной фильтрации в залежи во времени увеличивалась, что свидетельствовало о неизменной глубине уровня грунтовых вод от поверхности и снижении коэффициента фильтрации торфа из-за уплотнения последнего в течение трех месяцев.

2. Вертикальная скважина не находилась в энергетическом равновесии с осушаемой залежью. Взаимодействие скважины и залежи приводило к установлению уровня воды более низкого, чем уровень грунтовых вод. Верхняя часть скважины работала на всасывающем воду режиме; из нижней части происходила инфильтрация воды в залежь. При этом в объеме скважины отсутствовало сопротивление для движения воды и воздуха в вертикальном направлении. Увеличение воздухопроницаемости залежи являлось необходимым условием для понижения уровня грунтовых вод.

3. Использование вертикального дренирования позволило снизить влажность эксплуатационного слоя ниже нормы (до 73,3 %). По толщине залежи уплотнение происходило неравномерно; наибольшее уплотнение до 50 % отмечено в самом нижнем слое. Распределение потенциалов влаги во всем объеме осушаемой залежи являлось неравновесным и зависело от расстояния до осушителей, от фильтрационных свойств торфа и других факторов.

Таким образом, целесообразно использование принудительного вертикального дренажа для подготовки производственной площадки с целью дополнительного осушения и создания благоприятных условий полевой сушки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
2. Singh K. Allocation and Sustainable Management of Peat Resources on Public Land // *AEP Public Land Management*. 2016. № 9. P. 1–14.
3. Панов В.В., Мисников О.С. Тенденции развития торфяной отрасли России // *Горный журнал*. 2015. № 7. С. 108–112.
4. Яблонев А.Л., Пухова О.В. Современные направления использования торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2010. № 17. С. 104–107.
5. Мисников О.С., Тимофеев А.Е., Михайлов А.А. Анализ технологий разработки торфяных месторождений в странах дальнего и ближнего зарубежья // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011. № 9. С. 84–92.
6. Мисников О.С. Тимофеев А.Е. О рациональном использовании энергетических и минеральных ресурсов торфяных месторождений // *Горный журнал*. 2008. № 11. С. 59–63.
7. Болтушкин А.Н., Пухова О.В., Тимофеев А.Е. Гидротехника: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ. 2013. 184 с.
8. Купорова А.В., Ермияш Д.М., Пухова О.В. Направления осушения месторождений в геотехнологиях торфа и сапропеля // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 11. С. 36–40.
9. Кремчеев Э.А. Обоснование технологических приемов снижения влажности торфяного сырья при экскаваторной добыче // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 9. С. 31–35.
10. Пухова О.В. Оценка влияния технологических параметров на полевую сушку торфяного слоя при его добыче // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 53–61.
11. Misnikov O., Yablonev A., Kuporova A. Theories of Peat Systems Structure Formation and Prospects for their Practical Use in the Production of Molded Fuel // *AIP Conference Proceedings. AIP Publishing*. 2023. V. 2526. № 1. P. 040003.
12. Yablonev A., Misnikow O., Goryachev V., Nekrasova A. Improving the Reliability of the Scraper-bunker Peat Harvester // *E3S web of conferences. The Second Interregional Conference*. Kemerovo. 2021. P. 01019.
13. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 2. С. 163–171.
14. Мисников О.С., Пухова О.В., Черткова Е.Ю. Физико-химические основы торфяного производства: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ. 2015. 160 с.
15. Женихов К.Ю., Кузовлев В.В., Женихов Ю.Н., Шлеттерер М. Исследование взаимосвязей показателей поверхностных вод на заболоченных водосборах (на примере реки Тудовки Тверской области) // *Проблемы региональной экологии*. 2019. № 3. С. 68–76.
16. Корчунов С.С., Могилевский И.И., Абакумов О.Н., Дулькина М.С. Изучение водного режима осушенных торфяных залежей // *Труды ВНИИТП*. 1960. Вып. 17. 103 с.
17. Чураев Н.В. Механизм переноса влаги в капиллярно-пористых телах // *ДАН СССР*. 1963. Т. 148. № 6. С. 1361–1364.

**Для цитирования:** Пухова О.В. Применение вертикального дренажа для подготовки производственной площадки торфяного участка // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 1 (21). С. 60–68.

## **APPLICATION OF VERTICAL DRAINAGE FOR PREPARATION OF A PEAT SITE PRODUCTION SITE**

O.V. PUKHOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: owpuhova@mail.ru

The questions about the possibility of using vertical forced cluster drainage for additional drainage of a heavily watered production site on the peat area of the ephthrophic type are considered. The least negative impact of drainage on the natural environment, in particular on the regime of adjacent water bodies, during the development of the peat deposit "Ильинское" is revealed. The influence of additional forced drainage (depending on precipitation and volume of pumped water) on indicators of groundwater level changes in wells and canals was studied. The interaction of vertical wells with peat deposit in the process of additional forced drainage at the control site during the season was analysed. It is established that for vertical filtration the peculiarities of the head ephyre depend on the changes of the filtration coefficient in the layers of the deposit. It was revealed that continuous pumping of water from vertical wells led to the formation of a depression funnel with local additional depressions near the wells. The efficiency of using vertical drainage was confirmed when the moisture content of the production layer is lower than normal (up to 73.3 %). It was noted that the deposit thickened unevenly, and the distribution of moisture potentials was non-equilibrium and depended on the distance to the dryers, as well as on the filtration properties of peat and other factors.

*Keywords:* peat, peat deposit, drainage, vertical drainage, hydrological regime, groundwater level, pressure, filtration coefficient, well debit, vertical filtration.

Поступила в редакцию/received: 30.11.2023; после рецензирования/ revised: 07.12.2023;  
принята/accepted: 11.12.2023

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 681.518

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКАНИРОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Д.И. КОТЛЯР, асп., А.Н. ЛОМАНОВ, канд. техн. наук

Рыбинский государственный авиационный технический  
университет имени П.А. Соловьева,  
152935, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, e-mail: dm.kotlyar@yandex.ru

© Котляр Д.И., Ломанов А.Н., 2024

В статье рассмотрен вопрос автоматизации процесса ремонта лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) с применением системы сканирования. Предложен подход к сканированию детали системой технического зрения, установленной на том же оборудовании, на котором в последующем будет выполняться ремонт наплавкой. Отмечено, что приведенный алгоритм обладает адаптивностью к механическому состоянию оборудования. Указано, что по сравнению с ручным методом точность сканирования составляет свыше 0,05 мм ( $P = 67,56\%$ ) и свыше 0,1 мм ( $P = 95,75\%$ ), что достаточно для дальнейшего применения полученных сканов в задаче ремонта лопаток ГТД.

*Ключевые слова:* компьютерное зрение, наплавка металла, ремонт деталей, ремонт лопаток ГТД, система технического зрения, сканирование тонких кромок.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-69-78**

### ВВЕДЕНИЕ

Газотурбинные двигатели (ГТД) широко используются в гражданской и военной авиации, судостроении, промышленности и технике. Каждый такой двигатель содержит сотни и тысячи лопаток. В процессе эксплуатации лопатки подвергаются влиянию процесса изнашивания. Вследствие изнашивания сопряженных деталей, старения материалов, нарушения процесса регулировок и различных эксплуатационных повреждений происходит постепенное или скачкообразное ухудшение их технического состояния [1]. Один из способов ремонта лопаток – метод наплавки [2], который наиболее эффективен, так как требует меньше ресурсов на наплавку и дальнейшую обработку изделия [3]. Восстановление профиля кромки лопатки вентилятора ГТД – это наиболее сложный ремонт.

Процесс ремонта деталей ГТД состоит из последовательных операций определения контура наплавки, формирования траектории наплавки и непосредственного осуществления наплавки на оборудовании для прямого нанесения металла. Для определения контура наплавки чаще всего применяются методы ручного сканирования изделия на оборудовании, на котором будет осуществляться наплавка. Чтобы осуществить процесс сканирования контура лопатки, оператор затрачивает от 120 минут, при этом контур может быть отсканирован только в 3D-координатах.

В ходе проведения патентно-информационного поиска автоматизированных методов сканирования деталей были установлены критерии классификации методов автоматизированного сканирования:

по расположению сканирующего устройства (непосредственно на станке; в общей рабочей зоне; вне рабочей зоны);

времени сканирования (перед обработкой детали; в процессе без остановки процесса обработки; в процессе с остановкой процесса обработки; в потоке; после обработки детали);

методу трехмерного сканирования (контактные сканеры; времяпролетные; лазерные сканеры фазового сдвига; триангуляционные; стереоскопические; фотометрические; силуэтные).

Данные критерии были использованы при анализе и сравнении существующих на данный момент методов сканирования. Последние различаются по расположению сканирующего устройства, используемому методу сканирования, типу получаемых данных в процессе сканирования и другим параметрам. Выполненный анализ показал, что в задаче ремонта лопаток ГТД широкое применение находят два метода: на основе фотометрического сканера [4], который позволяет восстанавливать небольшие поверхности в 2D-пространстве; на основе сканера структурированного света [5], который используется для восстановления локальных участков в 3D (выбоин, сколов). Оба представленных устройства сканирования расположены непосредственно на станке. Сканеры, располагающиеся в общей рабочей зоне [6, 7] или вне оборудования [8, 9], неприменимы для выполнения ремонта лопаток ГТД, хоть и дают хорошую точность сканирования. В настоящее время не существует метода сканирования криволинейной поверхности, который позволял бы выполнять сканирование данных поверхностей для обработки на пятикоординатном станке.

### СКАНИРОВАНИЕ ДАТЧИКОМ ПРОФИЛЯ

Во время выполнения процесса наплавки необходимо выбирать нормаль сканируемой поверхности и сохранять заданную дистанцию, поэтому следует производить пятиосевую обработку, для реализации которой требуется управлять углом наклона и поворота стола установки.

Для осуществления сканирования криволинейных поверхностей предлагается математическая модель, включающая в себя комбинацию двух методов сканирования: триангуляционного и фотометрического (рис. 1).

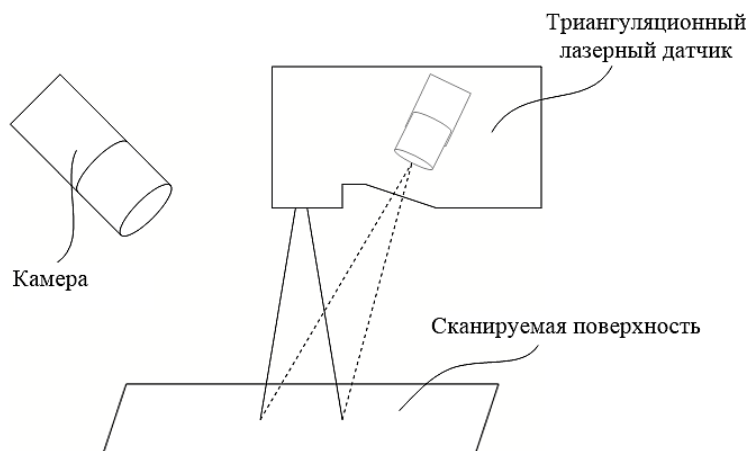


Рис. 1. Структурная схема средства измерения

Использование названной комбинации позволяет компактно разместить сканирующее устройство непосредственно на станке на общем основании с экструдером. Триангуляционный лазерный датчик предоставляет информацию о расстоянии до сканируемой поверхности, а фотометрический способ сканирования позволяет уточнить координаты левой и правой границы кромки лопатки в трехмерном пространстве.

Так как использование камеры в качестве фотометрического способа сканирования предполагает измерение размеров сканируемого объекта, необходимо проводить калибровку камеры по эталонному образцу, размеры которого заранее известны. В качестве эталонного образца выбрана масштабно-координатная бумага, выполненная в соответствии с ГОСТ 334-56.

Для калибровки камеры выполняется снимок плоской поверхности, на которой расположена бумага (рис. 2). Затем на снимке на пересечении линий сетки отмечаются точки  $A, B, C, D$  по углам области интереса и точка  $E$  в центре (рис. 3).

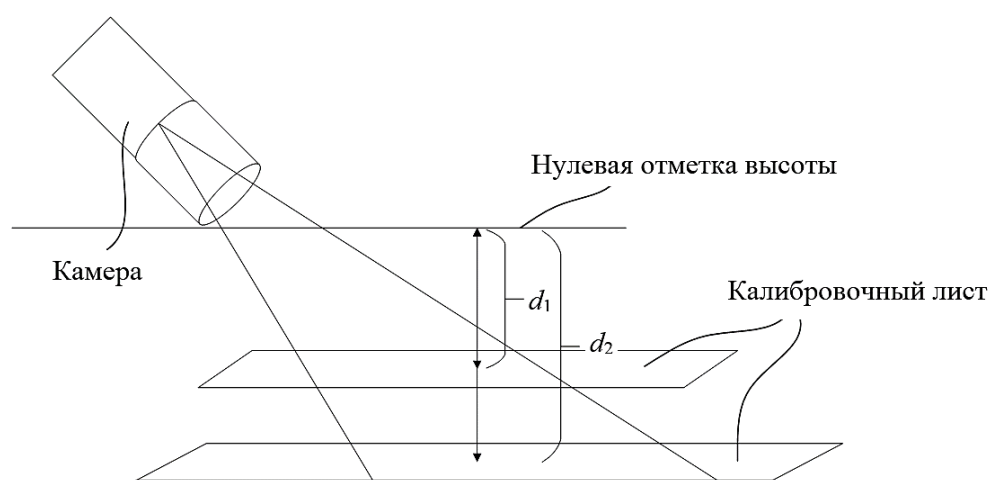


Рис. 2. Схема расположения камеры и масштабно-координатной бумаги в процессе калибровки

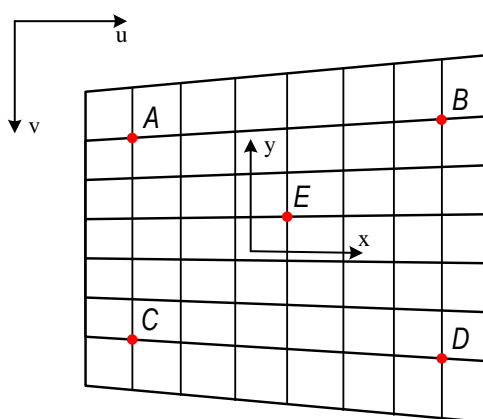


Рис. 3. Разметка точек интереса на масштабно-координатной бумаге

Для отмеченных точек задаются координаты в системе координат станка. При этом точка  $A$  имеет координаты  $(0 + dX, 0 + dY)$ , а координаты остальных точек

откладываются относительно точки  $A$ . Затем с помощью алгоритма перспективной трансформации вычисляется матрица преобразования координат изображения в координаты станка. Используются только точки  $A, B, C$  и  $D$ , а точка  $E$  используется для проверки корректности вычисления матрицы трансформации. Если матрица вычислена неверно, меняются значения смещения  $dX$  и  $dY$  для всех точек, после чего расчет повторяется.

Расчет матрицы трансформации повторяется два раза – для минимальной ( $d_1$ ) и максимальной ( $d_2$ ) дистанции сканирования. Таким образом, для работы используется матрица  $M_{3 \times 3}$ , которая позволяет перевести координаты из пикселей в миллиметры по формуле

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} &= M_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}; \\ M_{3 \times 3} &= M_1 \cdot (1 - p) + M_2 \cdot p; \\ p &= \frac{d - d_1}{d_2 - d_1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u, v$  – координаты точки на изображении (в пикселях);  $M_1, M_2$  – матрицы трансформации, вычисленные для минимальной и максимальной дистанции сканирования соответственно;  $d_1, d_2$  – минимальная и максимальная дистанции сканирования, для которых были вычислены матрицы трансформации;  $d$  – дистанция сканирования в момент расчета.

Лопатка закрепляется в оснастке на столе так, чтобы ее кромка была направлена параллельно оси наклона стола. Триангуляционный лазерный датчик устанавливается таким образом, чтобы проецируемая линия была перпендикулярна направлению кромки лопатки.

На первом этапе сканирование кромки лопатки осуществляется в прямом направлении. Установка с помощью датчика профиля производит сканирование кромки лопатки, формируя облако точек в 3D. По отсканированному облаку точек (рис. 4а) аппроксимируются кромки прямыми линиями (см. рис. 4б), для найденных линий определяется левая и правая границы кромки (см. рис. 4в), которые затем также аппроксимируются прямыми линиями (см. рис. 4г). Затем по формуле по четырем точкам (начала и конца левой и правой границы) вычисляется вектор нормали поверхности:

$$\begin{aligned} \vec{n}(p_0, p_1, p_2) &= \begin{bmatrix} y_0 \cdot z_1 - y_0 \cdot z_2 - y_1 \cdot z_0 + y_1 \cdot z_2 + y_2 \cdot z_0 - y_2 \cdot z_1 \\ -x_0 \cdot z_1 + x_0 \cdot z_2 + x_1 \cdot z_0 - x_1 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_0 + x_2 \cdot z_1 \\ x_0 \cdot y_1 - x_0 \cdot y_2 - x_1 \cdot y_0 + x_1 \cdot y_2 + x_2 \cdot y_0 - x_2 \cdot y_1 \end{bmatrix}; \\ \vec{N} &= \frac{\vec{n}(P_1, P_3, P_2) + \vec{n}(P_1, P_3, P_4) + \vec{n}(P_3, P_4, P_2) + \vec{n}(P_4, P_2, P_1)}{4}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$  – координаты точек  $p_0, p_1$  и  $p_2$  соответственно;  $P_1, P_2, P_3, P_4$  – координаты точек начала и конца левой и правой границы кромки лопатки.



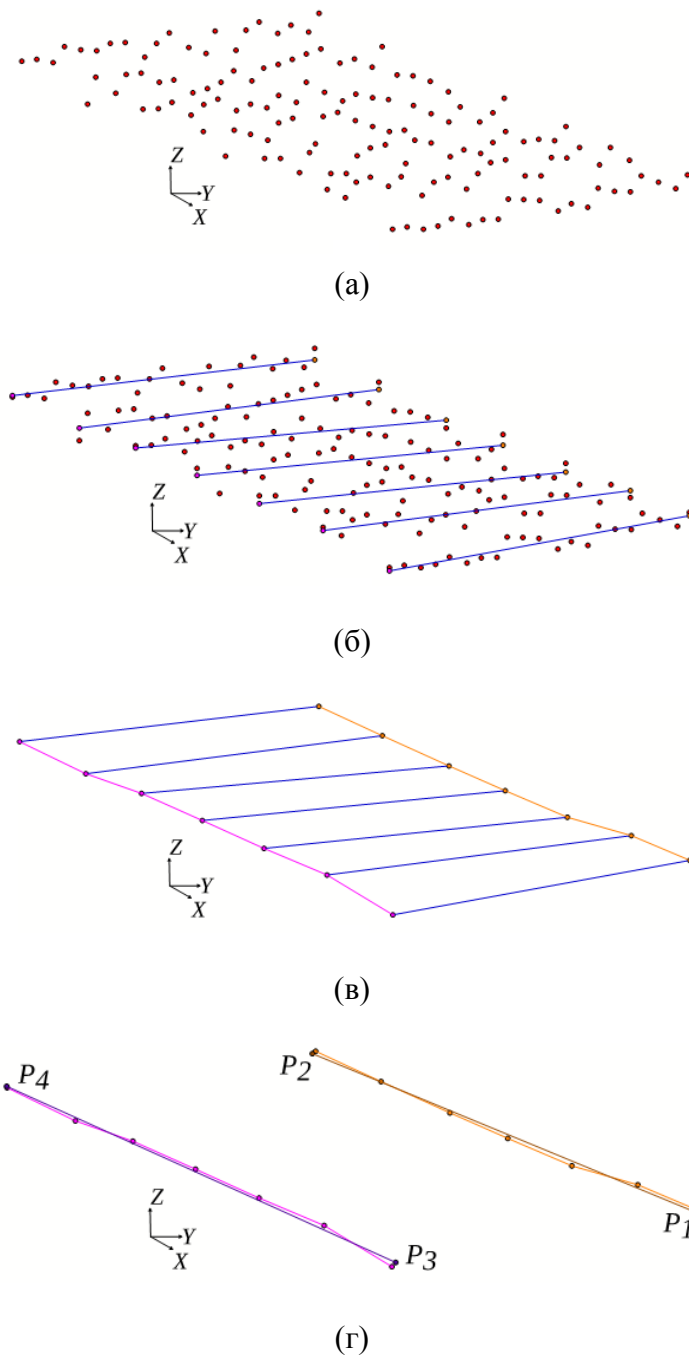


Рис. 4. Определение нормали поверхности по данным с датчика профиля:  
 облако точек в 3D (а); определение плоскости кромки лопатки (б);  
 определение границы кромки лопатки (в);  
 линейная аппроксимация границы кромки лопатки (г)

На основе найденного вектора нормали по формулам вычисляется угол коррекции положения установки для выравнивания вектора нормали до вертикального положения:

$$\Delta\gamma = -\arctan\left(\frac{\vec{N}_A}{\vec{N}_B}\right); \quad (3)$$

$$\vec{N} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\gamma) & -\sin(\Delta\gamma) & 0 & 0 \\ \sin(\Delta\gamma) & \cos(\Delta\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{N}_A \\ \vec{N}_B \\ \vec{N}_C \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\Delta\omega = -\arctan\left(\frac{\vec{N}_B}{\vec{N}_C}\right), \quad (4)$$

где  $\Delta\gamma$  – коррекция угла поворота стола;  $\Delta\omega$  – коррекция угла наклона стола;  $N_A$ ,  $N_B$ ,  $N_C$  – компоненты вектора нормали.

Производится корректирование положения установки до нормали к поверхности, а также приводится датчик профиля к центру кромки лопатки и происходит переход к следующему шагу сканирования.

Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута точка завершения.

### ФИЛЬТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СКАНИРОВАНИЯ

Полученные в ходе прямого сканирования результаты содержат выбросы точек при резком изменении угла нормали поверхности.

Выбросы приводят к постоянному повороту и наклону стола то в одном, то в другом (противоположном) направлении. Данное перемещение является излишним, так как вдоль кромки лопатки нормаль поверхности меняется не скачкообразно, а гладко, а также приводит к дополнительным движениям стола установки, что может сказаться на итоговом качестве наплавки, ресурсе установки, максимально возможной скорости процесса восстановления (наплавки). Данные координаты (наклон и поворот стола) определяют нормаль сканируемой поверхности по отношению к рабочему инструменту, а поскольку, как уже было сказано, нормаль поверхности кромки лопатки меняется не скачкообразно, а гладко, необходимо обработать данные фильтром нижних частот и затем для полученных новых положений стола вычислить новые положения точек левой и правой границ и вектора нормалей (рис. 5).

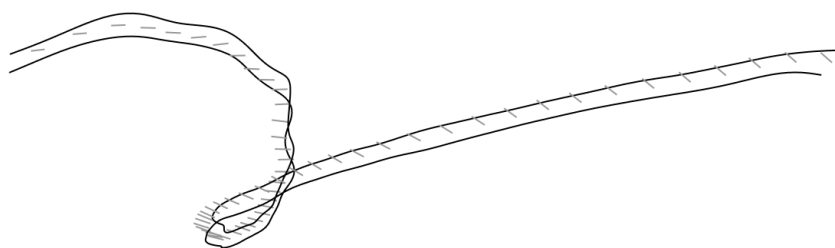


Рис. 5. Отсканированная поверхность методом прямого прохода (черная линия) и вектора нормалей (серые отрезки)

### СКАНИРОВАНИЕ КРОМКИ КАМЕРОЙ

Сканирование кромки лопатки камерой позволяет уточнить реальное положение левой и правой границ кромки лопатки. Данное сканирование применяется как дополнительный этап постобработки. С конца и в обратном направлении происходит движение установки и фотографирование кромки лопатки в каждой точке. На каждом снимке выделяется граница кромки лопатки в координатах изображения (пикселях), затем данные координаты преобразуются в 3D-координаты в базисе сканера.

Для распознавания кромки были исследованы алгоритмы сегментации кромки по яркости, сегментации сверточной нейронной сетью для обнаружения контуров и семантической сегментации на основе сверточных нейронных сетей.

Наилучший результат показало применение семантической сегментации на основе сверточных нейронных сетей. Данные сети содержат кодировщик, который сжимает входной тензор в более компактное пространство, и декодировщик, который разжимает вектор признаков до оригинального размера. Модель нейронной сети определяет способ восстановления пространственной информации. Наилучший результат по предсказанию показала комбинация *UNet-InceptionResNetV2*. Эта сеть дает лучшее предсказание границы лопатки и имеет среднюю вычислительную сложность.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментов была выбрана лопатка вентилятора ГТД и проведена серия экспериментов по сканированию ее системой технического зрения в разное время, с различными вариантами установки лопатки и, соответственно, отличающимися калибровками нулевой точки системы технического зрения. Сравнение результатов сканирования производилось с ручным сканированием кромки лопатки на том же самом оборудовании, на котором была установлена система технического зрения.

Для ручного сканирования использовалась камера, расположенная в экструдере установки на одной оптической оси с лазером. Нормаль поверхности лопатки устанавливалась в соответствии с точкой, отсканированной с помощью системы технического зрения, при этом нормаль в точке подтверждалась визуально. Затем в каждой точке с помощью камеры и управления осями *X* и *Y* установка наводилась на границу лопатки.

Были посчитаны отклонения по всем измерениям между ручным сканированием и автоматическим (рис. 6). Отклонение от края кромки на величину менее 0,05 мм имеет частоту 67,56 %, отклонение от края кромки на величину менее 0,1 мм – 95,75 %. Повторяемость результатов по всем измерениям (рис. 7) составила 0,025 мм с частотой 58,84 %, 0,05 мм – 84,30 % и 0,1 мм – 99,08 %. На рис. 6 и 7 плотность распределения вероятностей представлена в виде гистограммы, а суммарная вероятность представлена в виде графика.

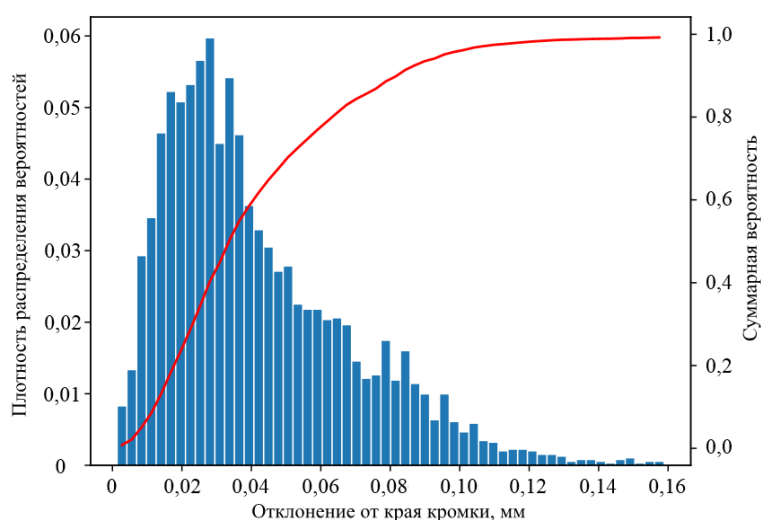


Рис. 6. Отклонение результатов автоматического сканирования от ручного в 3D по всем измерениям

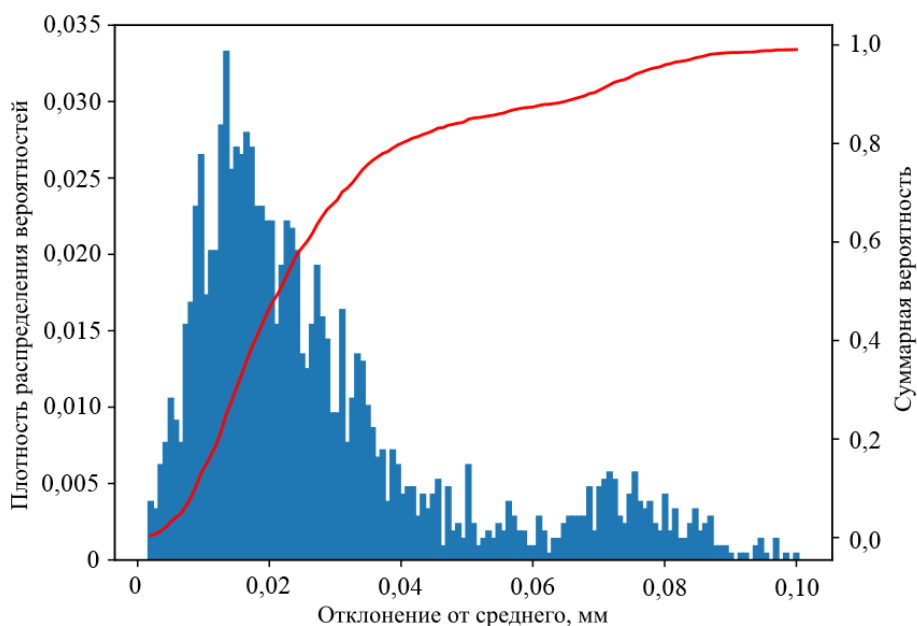


Рис. 7. Отклонение результатов автоматического сканирования от среднего (повторяемость)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы была создана математическая модель способа сканирования криволинейных поверхностей для ремонта кромок лопаток ГТД методом прямого нанесения металла. Было также проведено исследование полученной математической модели, по результатам которого определили точность цифровых 3D-сканов поверхности кромки лопатки ГТД. Установлено, что полученные системой технического зрения 3D-сканы обладают точностью свыше 0,05 мм в 67,56 % случаев и точностью свыше 0,1 мм в 95,75 % случаев, повторяемостью результатов – 0,025 мм с частотой 58,84 %, 0,05 мм с частотой 84,30 % и 0,1 мм с частотой 99,08 %. Данной точности и повторяемости достаточно для дальнейшего использования в задаче ремонта лопаток ГТД, поскольку пятно лазера составляет от 0,5 до 1,0 мм.

Погрешность результатов измерения накапливается на основе следующих составляющих: разрешение камеры – 0,028 мм/пикс; установка имеет криволинейность по осям  $X$  и  $Y$ , устранимую интерполяционной функцией, которая вычисляется автоматически по результатам сканирования сетки меток (при этом в результатах вычисления также накапливается погрешность измерения центров меток, которые имеют размер 0,01 мм); установка имеет криволинейности в других плоскостях ( $OXZ$ ,  $OYZ$ ), наклон и поворот стола, которые не измерялись и не компенсировались; точность семантической сегментации кромок лопаток – 97,25 %; преобразование координат с изображения в координаты станка имеет точность 0,02 мм.

Для повышения точности сканирования необходимо предпринять следующие действия:

- использовать камеру с большим разрешением съемки и (или) объективом с большим фокусным расстоянием;
- уменьшить размер маркера для устранения криволинейности станка, увеличить количество маркеров на калибровочном щите;
- исследовать и устранить погрешности в других плоскостях движения установки;

набрать большой набор снимков кромки лопатки ГТД, увеличить точность распознавания с применением сверточных нейронных сетей, в том числе исследовать возможность применения других архитектур кодировщиков и декодировщиков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Безъязычный В.Ф., Смирнов А.В. Анализ и направления совершенствования технологических и организационных проблем ремонта газотурбинных авиационных двигателей // *Научно-технические вестники государственного технического университета*. 2020. № 8 (110). С. 42–48.
2. Леонтьев В.А., Зиличихис С.Д., Кондратюк Э.В., Замковой В.Е. Восстановление работоспособности ГТД с применением новых технологий и материалов // *Вестник двигателестроения*. 2006. № 4. С. 99–103.
3. Бессуднов И.А. Совершенствование технологий ремонта газотурбинных авиационных двигателей с использованием ресурсосберегающих технологий. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск. 2014. 208 с.
4. Ine K. LENS Technology Overview. URL: <https://www.slideserve.com/kishi/lens-technology-overview> (дата обращения: 10.05.2023).
5. Патент РФ 2499657. *Способ автоматизированного ремонта детали машин* / Мельцер-Йокиш Т., Томаидис Д., Вилькенхенер Р.; Заявл. 16.08.2010. Оpubл. 27.11.2013. Бюл. № 33.
6. Xiaohu X., Dahu Z., Haiyang Z., Sijie Y., Han D. TCP-based Calibration in Robot-assisted Belt Grinding of Aero-engine Blades Using Scanner Measurements // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. № 90. P. 635–647.
7. Burghardt A., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Muszyńska M. Robotic Grinding Process of Turboprop Engine Compressor Blades with Active Selection of Contact Force // *Tehnički vjesnik*. 2022. № 29. P. 15–22.
8. Патент РФ 2708940. *Способ измерения трехмерной геометрии выпуклых и протяженных объектов* / Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Щепихин И.В., Кабардин И.К., Куликов Д.В.; Заявл. 15.01.2019. Оpubл. 12.12.2019. Бюл. № 35.
9. Патент РФ 2295110. *Способ измерения формы поверхности объекта и представления результатов измерения на упомянутой поверхности* / Сивохин А.В., Кузнецов А.Б., Бабичев Г.С.; Заявл. 13.10.2005. Оpubл. 10.03.2007. Бюл. № 7.

**Для цитирования:** Котляр Д.И., Ломанов А.Н. Математическая модель сканирования криволинейных поверхностей // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Технические науки». 2024. № 1 (21). С. 69–78.

#### A CURVED SURFACE SCANNING MATHEMATICAL MODEL

D.I. KOTLYAR, Postgraduate, A.N. LOMANOV, Cand. Sc.

P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,  
53, Pushkina str., Yaroslavl region, Rybinsk, 152935, e-mail: dm.kotlyar@yandex.ru

The article considers the issue of automating the repair process of gas turbine engine (GTE) blades using a scanning system. The approach to scanning of the part by the vision system installed on the same equipment, on which the cladding repair will be performed later, is proposed. It is noted that the above algorithm is adaptive to the mechanical condition of the equipment. It is indicated that in comparison with the manual method the scanning accuracy

is over 0.05 mm ( $P = 67.56\%$ ) and over 0.1 mm ( $P = 95.75\%$ ), which is sufficient for further application of the obtained scans in the task of GTE blade repair.

*Keywords:* computer vision, metal deposition, metal parts repair, GTE blade repair, machine vision system, scanning thin blades.

Поступила в редакцию/received: 25.10.2023; после рецензирования/revised: 31.10.2023;  
принята/accepted: 10.11.2023

УДК 004.3

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ МАЛОЗАМЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ФОРМИРУЕМЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРОМ В СЛОЖНЫХ ФОНОВЫХ УСЛОВИЯХ**

В.К. КЕМАЙКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А.Ю. КОЗЛОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук,  
А.А. ХРАМИЧЕВ<sup>3</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vk-kem@mail.ru

<sup>2</sup>АО Научно-производственное предприятие «Эргоцентр»  
170021, Тверь, ул. Хрустальная, д. 2, корп. 4

<sup>3</sup>АО «Специальное проектно-конструкторское бюро средств управления»  
170100, Тверь, Вагжановский пер., д. 9

© Кемайкин В.К., Козлов А.Ю., Храмичев А.А., 2024

В статье предложено использование автоматического адаптивного обнаружителя, реализующего локально наиболее мощный несмещенный (ЛНМН) критерий, и проведено его сравнение с обнаружителем по критерию Неймана – Пирсона для экстремально сложных условий наблюдения для оптико-электронных приборов. Построены рабочие характеристики адаптивного обнаружения слабоконтрастных изображений динамических объектов в сложных фоновых условиях. Получены расчетные оценки, подтверждающие превосходство ЛНМН-правила над классическим правилом Неймана – Пирсона.

*Ключевые слова:* оптико-электронный прибор, динамический объект, изображение, фоноцелевой кадр, критерии и характеристики обнаружения.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-78-84**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Под характеристикой обнаружителя понимается принятая в статистической теории обнаружения сигналов [1] зависимость вероятности правильного обнаружения цели – динамического объекта (ДО) – от отношения «сигнал/шум» (ОСШ) при заданной вероятности ложной тревоги, которая определяет мощность обнаружителя.

Ниже рассмотрены два обнаружителя: предложенный, реализующий локально наиболее мощный несмещенный (ЛНМН) критерий, и обнаружитель, реализующий классический критерий Неймана – Пирсона для экстремально сложных условий наблюдения (это низкий (включая отрицательный) контраст объекта и наличие

целеподобных фоновых образований). Первый из названных является адаптивным [2, 3], их реализация – автоматическая.

Обнаружители функционируют в сложных условиях, т.е. в условиях, близких к двум альтернативным ситуациям: в зоне контроля оптико-электронного прибора (ОЭП) находится ДО на сложном неоднородном нестационарном облачном фоне, обуславливающим слабый (положительный или отрицательный) контраст ДО – «слабый сигнал»; в зоне контроля ОЭП имеется только сложный неоднородный нестационарный фон – «шум». Последний может обуславливать обнаружение ОЭП целеподобных изображений. Относительно ситуаций имеет место полная априорная пространственно-временная неопределенность.

Обнаружение ДО по слабоконтрастному изображению целесообразно осуществлять с использованием обнаружителя, реализующего локально наиболее мощный универсальный несмещенный критерий [2]. Введение такого критерия основано на близости параметров альтернативных ситуаций. Однако для других (менее сложных помеховых) условий не исключается возможность применения и классического критерия Неймана – Пирсона.

Цель работы – оценить характеристики обнаружителей малозаметных ДО на слабоконтрастных изображениях ОЭП и определить области их эффективного применения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статистическом смысле ситуации простые: каждая из них определяется однозначно одним доминирующим параметром [2].

Под доминирующими параметрами для рассматриваемых ситуаций понимаются  $\theta_1$  и  $\theta_0$  – первые моменты функций правдоподобия – условных плотностей распределения вероятностей фрактальной размерности  $d$  и максимального собственного значения  $\lambda_{\max}$  корреляционной матрицы яркостей пикселей изображения соответственно для условий одной и другой альтернативных ситуаций. Отметим, что названные статистики  $d$  и  $\lambda_{\max}$  являются инвариантами (и даже максимальными инвариантами [4]) по отношению к знаку контраста и особенностям движения ДО [2].

Параметры непрерывны и независимы в функциональном и статистическом смысле. Их анализ можно проводить отдельно, а в алгоритме обнаружения ДО учитывать в виде соответствующих сочетаний их значений как минимальных достаточных статистик [2].

Вторые моменты однозначность условных плотностей не нарушают. Они определяют «разброс» значений фрактальной размерности и максимального собственного значения на конечных положительных интервалах.

Было установлено [2], что по параметру фрактальной размерности ситуация «ДО на сложном фоне в зоне контроля ОЭП» – правосторонняя относительно ситуации «сложный фон в зоне контроля ОЭП», а по параметру максимального собственного значения – левосторонняя.

Указанное обстоятельство и близость ситуаций как простых статистических гипотез является основой применения для обнаружения ДО в сложных условиях функционирования ОЭП критерия из класса ЛНМН [4, 5], т.е., в сущности (в силу простых ситуаций), из семейства с монотонным отношением функций правдоподобия. При этом возникает необходимость оценки основной характеристики – мощности критерия  $(1 - \beta_d)$ , или вероятности правильного принятия решения об обнаружении ДО на слабоконтрастном изображении при близости альтернативной ситуации, создающей

возможность принятия ложного решения, т.е. обнаружения ложного ДО. Аппроксимируем функции правдоподобия нормальными плотностями распределения, определенными на интервалах значений названных статистик принятия решений: фрактальной размерности и максимального собственного значения, после чего отметим, что целесообразность такой аппроксимации в рассматриваемом случае исходит из получения гарантированной оценки мощности, так как нормальный закон обладает максимальной энтропией по сравнению с другими непрерывными законами, имеющими те же моменты, что и принятый для аппроксимации нормальный.

Теперь установим формальную запись правила принятия решения по ЛНМН-критерию, воспользовавшись отношением правдоподобия для близких простых гипотез.

Имеем, например, при принятии решения по статистике фрактальной размерности  $d$ :

$$\begin{aligned} \ln f(d | \theta_1, \text{ДО} \wedge \text{Фон}) - \ln f(d | \theta_0, \text{Фон}) &\geq \ln \Pi(\alpha); \\ \frac{\partial \ln f(d | \theta_0, \text{Фон})}{\partial \theta_0} (\theta_1 - \theta_0) &\geq \ln \Pi(\alpha); \\ \frac{\partial}{\partial \theta_0} \left[ \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} - \frac{1}{2} \frac{(d - \theta_0)^2}{\sigma^2} \right] (\theta_1 - \theta_0) &\geq \ln \Pi(\alpha); \\ \frac{(d - \theta_0)}{\sigma^2} (\theta_1 - \theta_0) &\geq \ln \Pi(\alpha) \end{aligned}$$

и в результате получаем искомое выражение правила принятия решения

$$d \geq \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \ln \Pi(\alpha) + \theta_0$$

по одиночной выборке – статистике фрактальной размерности, где  $\theta_1 - \theta_0$  – величина малая в силу близости ситуаций;  $\theta_1, \theta_0$  – параметры ситуаций.

Мощность такого правила при малой величине  $\delta = \theta_1 - \theta_0$  оценивается [6] по выражению

$$1 - \beta_d = e^{-\left(\frac{\theta_1 - \theta_0}{\sigma}\right)^2 n},$$

где  $n$  – объем выборки фрактальной размерности (определяется по количеству фоноцелевых кадров ОЭП).

Параметр  $\delta$  считается малым, если принимает значения из интервала  $0 < \delta \leq 2/\sqrt{n}$  [7], т.е.  $0 < \delta \leq 2$  при  $n = 1$ .

Вышеуказанное выражение не зависит от устанавливаемой допустимой вероятности  $\alpha$  ложного обнаружения ДО в сложных неоднородных нестационарных фоновых условиях.

Аналогичным образом, с учетом левосторонности ситуации «ДО на сложном фоне в зоне контроля ОЭП» относительно ситуации «сложный фон в зоне контроля ОЭП», выводится правило принятия решения по статистике максимального собственного значения  $\lambda$ .



Следует отметить, что при принятии решения в условиях близких ситуаций по классическому критерию Неймана – Пирсона соответствующая мощность будет оцениваться по выражению

$$1 - \beta_d = e^{-0.5 \left( \frac{\theta_1 - \theta_0}{\sigma} \right)^2 n},$$

также не зависящему от допустимого значения вероятности обнаружения ложного ДО.

Из сравнения мощностей двух правил (при априорной неопределенности они составляют полное множество) очевиден вывод: в условиях близких ситуаций мощность правила принятия решения по ЛНМН-критерию на порядок доминирует над мощностью классического правила Неймана – Пирсона и доминирование будет иметь место при  $0 < \delta \leq (2 - 3)$ .

При  $\delta \geq 3$ , чему соответствует ОСШ не менее 3, начинает «хорошо» работать правило обнаружения ДО, реализующее классический критерий Неймана – Пирсона. Выражение для порогового уровня принятия решения об обнаружении ДО по такому правилу устанавливается (при  $n = 1$  – одиночном измерении статистики – по одному фоноцелевому кадру ОЭП), например, для статистики фрактальной размерности  $d$  непосредственно из отношения правдоподобия классического критерия Неймана – Пирсона для двух альтернативных ситуаций, т.е. из неравенства вида

$$\frac{f(d | \theta_1, \text{ДО} \wedge \text{Фон})}{f(d | \theta_0, \text{Фон})} \geq \ln \Pi_{\text{н-п}}(\alpha).$$

Пусть в этом неравенстве, как и в случае обнаружения ДО в условиях близких ситуаций, функции правдоподобия  $f(d | \theta_1, \text{ДО} \wedge \text{Фон})$ ,  $f(d | \theta_0, \text{Фон})$  нормальны; параметры ситуаций  $\theta_1$  и  $\theta_0$ , очевидно, будут отличаться от соответствующих параметров близких ситуаций, что непринципиально, так как сравнение результатов реализации двух правил будет осуществляться на основе разностей  $\theta_1 - \theta_0$  между параметрами близких и небликих ситуаций.

Действительно, выполнив элементарные преобразования над отношением вида

$$\frac{f(d | \theta_1, \text{ДО} \wedge \text{Фон})}{f(d | \theta_0, \text{Фон})} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(d - \theta_1)^2}{2\sigma^2}\right\}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(d - \theta_0)^2}{2\sigma^2}\right\}} \geq \ln \Pi_{\text{н-п}}(\alpha),$$

получим выражение для классического правила принятия решения об обнаружении ДО по критерию Неймана – Пирсона

$$d \geq \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \ln \Pi(\alpha) + \frac{\theta_1 + \theta_0}{2},$$

в котором  $\theta_1 - \theta_0$  всегда превышает разность  $\delta = \theta_1 - \theta_0$  в ЛНМН-правиле принятия решения об обнаружении ДО. Аналогичное соотношение относится и к слагаемому  $\frac{\theta_1 + \theta_0}{2}$  по отношению к  $\theta_0$  в ЛНМН-правиле.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из сравнения правил следует очевидный вывод: пороговый уровень принятия решения по ЛНМН-критерию всегда не превышает пороговый уровень принятия решения по классическому критерию Неймана – Пирсона. Это, в свою очередь, означает, что мощность ЛНМН-критерия будет не меньше мощности критерия Неймана – Пирсона в любых сложных фоноцелевых и других ситуациях, в которых  $\delta \geq 3$ , т.е. в ситуациях с высоким контрастом ДО на реальном фоне.

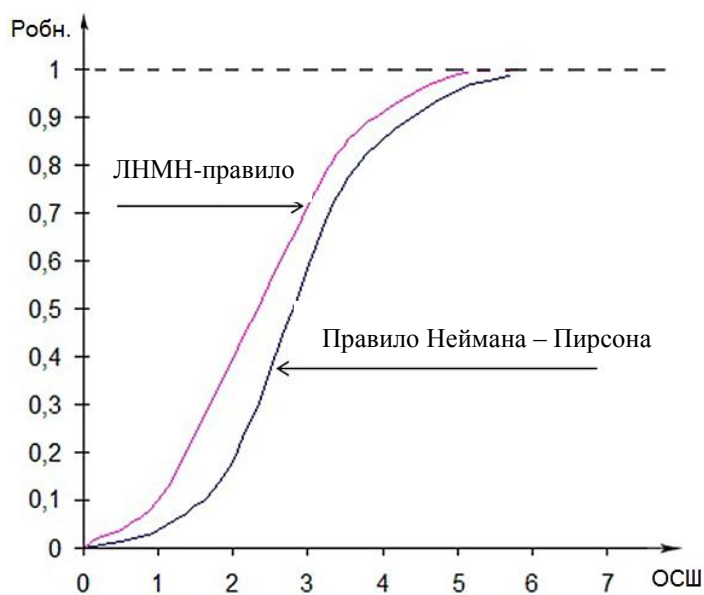
Тем не менее значения мощности критериев при принятии решения по одиночному измерению статистики фрактальной размерности (и статистики максимального собственного значения) не удовлетворяют требуемым. Их соответствующие значения – 0,1 при обнаружении ДО по ЛНМН-правилу для близких ситуаций и 0,05 по классическому правилу Неймана – Пирсона при  $\delta = 0,05$ . Значение  $\delta = 0,05$  вычислено по реальным слабоконтрастным изображениям, полученным в ситуации «ДО на сложном фоне».

Повышение мощности критериев при  $0 < \delta \leq 3$  возможно только при накоплении измерений названных статистик, т.е. при принятии решения об обнаружении ДО по  $n > 1$  измерениям статистик на основе логики « $k$  из  $l$ » ( $l > k$ ). Реализация этой логики должна осуществляться по принципу «хотя бы один раз» на «скользящем» интервале времени накопления  $l$  измерений по последовательным фоноцелевым кадрам ОЭП и установлением  $\max [k]$ , т.е. наибольшего целого, по эмпирической формуле функциональной связи  $k \cong 1,5\sqrt{l}$  либо по неравенству  $\alpha \leq \sum_{m=k}^l C_l^m p_\phi^m (1-p_\phi)^{l-m}$ , выво-

димому из биномиального распределения вероятностей накапливаемых  $l$  статистик принятия решения [8]. Подтверждением этого утверждения является результат оценки мощности критерия Неймана – Пирсона, полученный моделированием с помощью [9] соответствующего правила обнаружения ДО в реальных фоноцелевых условиях при ОСШ, равном 3. Значение мощности по единичному измерению статистики обнаружения ДО составляет 0,6 при вероятности 0,25 обнаружения ложных ДО, т.е. ДО, порождаемых фоном в зоне обзора ОЭП. Накопленная мощность без учета флуктуаций яркостей изображений по данному правилу при этом составляет 0,72...0,75, а накопленная мощность ЛНМН-правила в этих же условиях составляет 0,8...0,83 при том же уровне вероятности обнаружения ложного ДО.

Установленное превышение подтверждает теоретический результат доминирования ЛНМН-правила над классическим правилом Неймана – Пирсона, порог принятия решения в котором выше порога принятия решения по ЛНМН-правилу. Вероятность ложного обнаружения ДО из-за воздействия оптического излучения фона на ОЭП при реализации любого из правил с накоплением измеряемых статистик составляет  $\approx 0,12$ .

При повышении ОСШ мощности обоих правил стремятся к единице, в сущности говоря, с одной и той же скоростью. Так, при отношении «сигнал/шум», равном 5, мощности правил превышают 0,9; а при отношении 6...7 близки к единице. По полученным результатам на рисунке представлена искомая вероятность правильного обнаружения ( $P_{обн}$ ), определяющая мощность для каждого правила в зависимости от ОСШ. Это так называемые рабочие характеристики правил.



Характеристики обнаружения правил ЛНМН и Неймана – Пирсона

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа полученных результатов, в том числе представленных на рисунке, следует, что предпочтительно применение предложенного обнаружителя ДО, основанного на реализации ЛНМН – правила принятия решения, не только в сложных условиях функционирования ОЭС (при обнаружении ДО с положительным и отрицательным контрастом на малоконтрастных изображениях при  $ОСШ \in (0, 3)$ ), но и в условиях с повышенным ОСШ. Обнаружитель, основанный на применении классического правила Неймана – Пирсона, не обеспечивает обнаружение ДО с отрицательным контрастом на малоконтрастных изображениях, а приемлемую для практики вероятность обнаружения ДО с положительным контрастом имеет при ОСШ не менее 4.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов [и др.]. М.: Радио и связь. 1984. 440 с.
2. Катулев А.Н., Храмичев А.А., Гузенко О.Б. Критерий и алгоритм обнаружения динамического объекта на сложном фоне по точечному слабоконтрастному изображению оптико-электронного прибора // *Автометрия*. 2015. Т. 51. № 2. С. 38–48.
3. Катулев А.Н., Храмичев А.А., Ягольников С.В. Цифровая обработка 2D слабоконтрастных изображений, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях. Обнаружение, распознавание, сопровождение динамических объектов. М.: Радиотехника. 2018. 407 с.
4. Кокс Д., Хинкли Д. Теоретическая статистика. М.: Мир. 1978. 560 с.
5. Шметтерер Л. Введение в математическую статистику. М.: Наука. 1976. 520 с.
6. Башаринов А.Е., Флейшман Б.С. Методы статистического последовательного анализа и их приложения. М.: Советское радио. 1962. 352 с.
7. Кокс Д., Хинкли Д. Задачи по теоретической статистике с решениями. М.: Мир. 1981. 225 с.
8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь. 1989. 656 с.

9. Козлов А.Ю., Храмичев А.А. Программный комплекс обработки двумерных изображений для оптико-электронных систем обнаружения, сопровождения и распознавания динамических объектов // *Software Journal: Theory and Applications*. 2020. № 1. С. 1–10.

**Для цитирования:** Кемайкин В.К., Козлов А.Ю., Храмичев А.А. Характеристики автоматических обнаружителей малозаметных динамических объектов на слабо-контрастных изображениях, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 1 (21). С. 78–84.

## **CHARACTERISTICS OF AUTOMATIC DETECTORS UNOBTRUSIVE DYNAMIC OBJECTS ON LOW-CONTRAST IMAGES GENERATED BY OPTOELECTRONIC DEVICE IN COMPLEX BACKGROUND CONDITIONS**

V.K. KEMAYKIN<sup>1</sup>, Cand. Sc., A.Yu. KOZLOV<sup>2</sup>, Cand. Sc.,  
A.A. KHRAMICHEV<sup>3</sup>, Cand. Sc.

<sup>1</sup>Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: vk-kem@mail.ru

<sup>2</sup>JSC Research and Production Enterprise «Ergocenter»  
2, bldg. 4. Khrustalnaya str., Tver, 170021

<sup>3</sup>JSC «Special Design Bureau of Controls»  
9, Vagzhanovsky Lane, Tver, 170100

The article proposes an automatic adaptive detector that implements the locally most powerful unbiased (LNMN) criterion and its comparison with the detector according to the Neumann-Pearson criterion for extremely difficult observation conditions for optoelectronic devices. The performance characteristics of adaptive detection of low-contrast images of dynamic objects in complex background conditions are constructed. Calculated estimates confirming the superiority of the LNMN rule over the classical Neumann-Pearson rule are obtained.

*Keywords:* optoelectronic device, dynamic object, image, phono-target frame, detection criteria and characteristics.

Поступила в редакцию/received: 10.11.2023; после рецензирования/revised: 17.11.2023;  
принята/accepted: 24.11.2023

## ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ТОРФЯНОЙ ОТРАСЛИ. ЧАСТЬ 1. ПРИНЦИПЫ ГЕОМОДЕЛИРОВАНИЯ ТОРФЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Т.Б. ЯКОНОВСКАЯ, канд. экон. наук

Тверской государственной технической университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: tby81@yandex.ru

© Яконовская Т.Б., 2024

В статье описана методология геомоделирования торфяного месторождения. Показаны принципы создания и использования цифровой модели торфяного месторождения. Проведена оценка торфяного производства как информационного объекта. Описаны особенности применения геоинформационных систем в условиях предприятий по добыче торфа, а также источники исходной информации, необходимые для геомоделирования объектов торфодобывающих производств.

*Ключевые слова:* торфяное месторождение, моделирование, объекты моделирования, источники информации, принципы моделирования.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-85-95**

### ВВЕДЕНИЕ

Современное конкурентоспособное и эффективное горное производство – это производство, которое внедряет цифровые и информационные технологии в свои технологические и хозяйственные процессы, создавая таким способом своего «цифрового двойника». В дальнейшем «цифровой двойник» любого горного производства позволит прогнозировать поведение предприятия и совершенствовать стратегию развития горной компании в изменчивых технико-экономических, социально-экономических, экологических, горно-геологических и природно-климатических условиях [1, 2].

Каждое горное производство проходит в своем развитии через определенные стадии жизненного цикла, которые, согласно экономической теории, характеризуются величиной получаемой прибыли в определенные промежутки времени. Продолжительность этих стадий тесным образом связана с жизненным циклом освоения месторождения, т.е. с процессом геологического изучения, строительства, эксплуатации и рекультивации выработанного пространства [3].

Для создания и использования «цифрового двойника» горного предприятия разрабатывается «цифровая модель» месторождения, разработку которого проводит горная компания. От точности созданной «цифровой модели» месторождения зависит эффективность будущих инженерно-экономических решений. Следует заметить, что «цифровая модель» месторождения – это набор различной горно-геологической и технико-экономической информации, систематизированной особым образом [4, 5]. Процесс 3D-моделирования месторождения проводится на стадии предварительного геологического исследования и детальной разведки. Главными задачами этого процесса является геолого-экономическая оценка месторождения, которая включает оценку качества полезного ископаемого, определение объема запасов полезного ископаемого и разработку рекомендаций по технологии освоения месторождения. Полученные в процессе моделирования месторождения результаты не являются статичными, а

подвержены изменениям, поэтому сама «цифровая модель» месторождения должна изменяться со временем. Она постоянно дополняется и усложняется, так как в ходе освоения появляется новая геологическая, технологическая, экономическая информация. Таким образом, главнейший принцип создания и использования качественной «цифровой модели» – это максимально достоверное и точное ее соответствие реальной текущей горно-геологической информации о состоянии месторождения [6, 7].

При проектировании торфяного предприятия «цифровая модель» торфяного месторождения преобразуется. Она соединяется с трассами осушительной и противопожарной сетей, сетью технологических площадок и позволяет оперативно управлять технологическим процессом разработки торфяного месторождения, благодаря чему и формируется «цифровой двойник» торфодобывающего производства [8].

Тем не менее при разработке «цифровой модели» торфяного месторождения, в которой учитывается обширный набор качественных данных геологического исследования, возникает ряд проблем, характерных для освоения именно торфяных месторождений. Целью статьи является разработка методологических принципов создания и использования цифровых моделей торфяного месторождения и их визуализация.

### РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ТОРФЯНОЙ ОТРАСЛИ

Идея автоматизировать производственные процессы на предприятиях торфяной отрасли возникла в начале 1970-х годов. Именно тогда активно внедрялись автоматизированные системы в управление технологическими машинами и комплексами, производственными линиями по переработке торфа, процессом проектирования и производством в целом [7–9]. Автоматизация производственных процессов торфодобывающего производства осуществлялась с учетом стадии жизненного цикла освоения торфяного месторождения (рис. 1). Под жизненным циклом освоения торфяного месторождения понимают промежуток времени, начинающийся с момента оформления горного отвода и создания добывающего предприятия и заканчивающийся его ликвидацией.

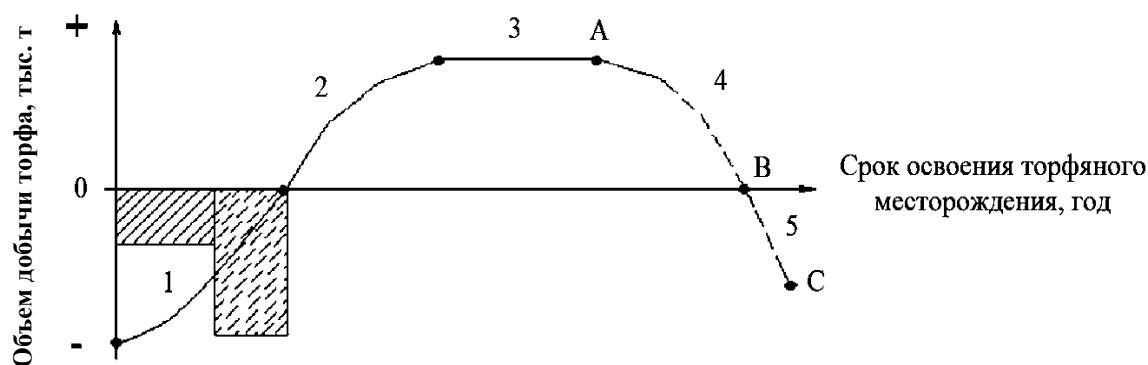


Рис. 1. Жизненный цикл освоения торфяного месторождения:

- 1 – стадия подготовки; поиск и разведка; строительство;
- 2 – стадия растущей добычи; 3 – стадия стабильной добычи;
- 4 – стадия падающей добычи (отрезок АВ – умеренно падающая добыча);
- 5 – стадия рекультивации (отрезок ВС – истощение торфяного месторождения)

Так, на первой стадии подготовки проводятся два вида горных процессов: геологоразведка торфяного месторождения и строительство предприятия. В конце 1970-х годов для снижения трудоемкости процесса поиска и разведки торфяных месторождений использовался метод аэрофотосъемки (рис. 2). При этом геологи получали геоинформацию, зашифрованную в виде черно-белых фотопланов, фотосхем и аэрофотоснимков. Получаемую с помощью метода аэрофотосъемки информацию необходимо было дешифрировать по специальным признакам вручную или с помощью стереоскопа.

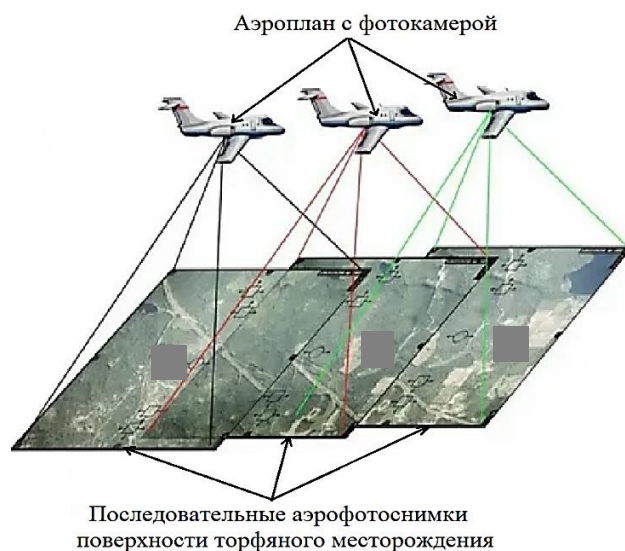


Рис. 2. Технология аэрофотосъемки торфяного месторождения 1970-х годов

Методы аэрофотосъемки изменились после появления цифровой фотокамеры, промышленных беспилотных летательных аппаратов (квадрокоптеров) и технологии LiDAR (рис. 3, 4) [10–12]. Процесс поиска и разведки торфяных месторождений упростился и стал более совершенным, так как получаемую информацию можно использовать в маркшейдерии торфяного месторождения при составлении генерального плана, для целей промышленной безопасности (поиска пожара на территории торфяного месторождения) и в геоинформационных системах (ГИС-системах).



Рис. 3. Современная технология аэрофотосъемки торфяного месторождения:  
1 – беспилотный летательный аппарат;  
2 – передвижной пункт управления; 3 – ГИС-система

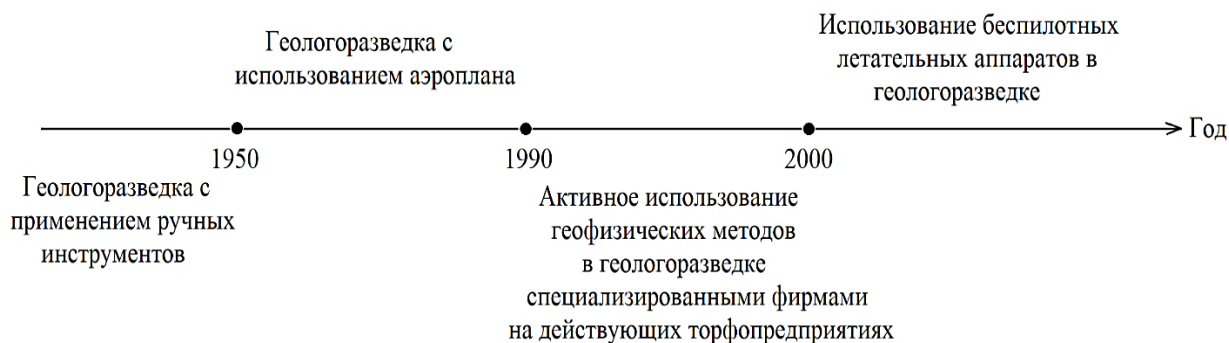


Рис. 4. Хронология методов цифровой трансформации в технологии поиска, разведки и маркшейдерии торфяного месторождения

Современная идеология цифровой трансформации горнодобывающих производств связана с активным внедрением в горные процессы различных информационно-аналитических систем и связанных с ними цифровых устройств. До февраля 2022 года большинство программных продуктов для предприятий горнодобывающей отрасли были иностранного происхождения (например, широко распространенная система Micromine). В настоящее время (после февраля 2022 года) рынок программного обеспечения для горных предприятий стал более скудным. Самая популярная российская разработка для геомоделирования месторождений, маркшейдерии, планирования горных работ – Mineframe, которая ориентирована в основном на автоматизацию проектирования нефтегазовых, угольных, рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых стратегического назначения [13–15].

Торфяное месторождение как информационный объект представляет собой сложную систему с большим потоком разнородной информации климатического, горно-геологического, технологического, экологического и экономического характера. В связи с этим для автоматизированного проектирования торфяных месторождений требуется адаптация существующего (универсального) программного обеспечения либо разработка новых ГИС-систем, предназначенных для разработки торфяных месторождений [16–18].

В 1970-х годах для совершенствования процесса управления торфяным производством профессором Г.А. Дмитриевым была внедрена система диспетчеризации производственных участков. Это был первый прототип телекоммуникационной системы в рамках одного торфопредприятия. В настоящее время для оперативной связи между производственными подразделениями торфодобывающего предприятия применяется система внутренней сотовой связи, работающая в границах торфяного производства (рис. 5).



Рис. 5. Хронология систем оперативного управления торфяным производством



Применительно к геомоделированию торфяных месторождений и проектированию торфодобывающих производств в конце 1980-х годов профессор В.И. Косов разработал первый прототип ГИС-системы. Он состоял из пакета специализированных прикладных программ для автоматизированного подсчета объемов различных (по геологическому критерию) запасов торфа в месторождении и был предназначен для расширения ассортимента производимой торфяной продукции, строительства трассы осушительной сети. Программы давали возможность построить объемную модель торфяного месторождения по профилям сети зондирования торфяной залежи.

Еще раньше в Уральском государственном горном университете профессор Б.М. Александров создал САОГИ (систему автоматизированной обработки геологической информации), но она не позволяла построить информационную модель торфяного месторождения.

После 1990-х годов интерес к разработке торфяных ГИС-систем угас (рис. 6) ввиду объективных причин:

1. Массового банкротства предприятий в торфяной отрасли – основных заказчиков программного обеспечения.
2. Низкой платежеспособности оставшихся предприятий торфяной отрасли и, как следствие, слабой активности в области внедрения новых перспективных инженерных решений.
3. Появления зарубежных конкурентоспособных ГИС-систем на российском рынке.
4. Отсутствия компетентных IT-специалистов в сфере цифровых и информационных технологий, используемых в торфяной отрасли.

Следствием перечисленных причин является двадцатилетнее отставание (см. временной разрыв на рис. 4) во внедрении цифровых и информационных технологий именно в торфяной отрасли.

После 2008 года отмечается всплеск разработок различных ГИС для торфяной отрасли. В основном это область картографирования (рис. 6, позиции 5, 7), отслеживания торфяных пожаров (рис. 6, позиция 4), и автоматизированного проектирования (рис. 6, позиция 6). Обусловлен данный факт не только мировой тенденцией развития в горнодобывающей отрасли идеологии цифровой трансформации добывающих производств, но и поиском новых, более совершенных и экономически целесообразных геотехнологий в торфяной отрасли.

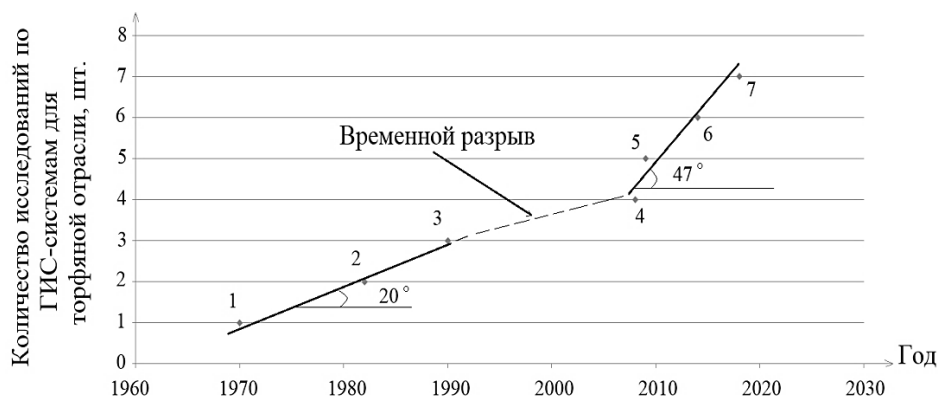


Рис. 6. Хронология развития ГИС-систем для проектирования торфяного предприятия (составлено автором): 1 – ГИС Г.А. Дмитриева; 2 – САОГИ; 3 – ГИС В.И. Косова; 4 – ГИС А.Н. Ветрова; 5 – ГИС О.А. Кутузовой; 6 – «ГИС-торф» Т.Б. Яконовской; 7 – ГИС Ильясова – Сирина – Макаровой

Поиск новых эффективных направлений развития торфяной отрасли стал причиной разработки ГИС-системы для проектирования торфяных производств, которая позволила бы создать «цифрового двойника» торфяного предприятия. Однако главной задачей при создании «цифрового двойника» торфяного предприятия является разработка цифровой модели торфяного месторождения.

## **ОБЪЕКТЫ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ЦИФРОВЫМ МОДЕЛЯМ ТОРФЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Современное проектирование торфодобывающих предприятий осуществляется с помощью специализированных ГИС, которые позволяют разработать геологическую модель торфяного месторождения. Эта модель дает возможность управлять запасами на стадиях жизненного цикла месторождения (поиск, разведка, разработка), а также организует геологическое обеспечение разработки месторождений на стадиях промышленного освоения (проектирование схем экскавации и управление добычей) [19–21]. Геологические модели в ГИС-системах должны соответствовать требованиям:

- высокой детальности геологической модели;
- возможности выполнения технико-экономических расчетов;
- планирования экскавации всей торфяной залежи экономически целесообразным и эффективным способом;

- расчета величины прибыли, ренты и других финансовых параметров.

Как правило, на торфодобывающих предприятиях используется совокупность пакетов программ для геологии, горного планирования, маркшейдерии и других различных производственных нужд. Такие пакеты программного обеспечения предназначены для автоматизации конкретных производственных и инженерных задач, а их оценка производится в соответствии с тем, как они адаптируются для нужд торфяного производства [1–3]. При автоматизации проектирования торфодобывающего производства объектами геоматематического моделирования являются:

- торфяной массив, представляющий собой совокупность горизонталей поверхности, линий сети зондирования, отметки уровня грунтовых вод, в пределах которых условно выделены контуры типов торфяной залежи;

- рельеф участка местности, в границах которого располагаются горный отвод и торфяной карьер;

- каналы осушительной и противопожарной сети;

- сеть технологических площадок, выработанные торфяные участки;

- отвалы древесных отходов, насыпи, отстойник, водохранилище и прочие техногенные образования, различные сооружения;

- транспортные коммуникации;

- зоны воздействия на окружающую среду;

- зоны ограничения, за пределами которых возникают различного рода нарушения лицензии на право разработки и т.д.

Источниками первичной исходной информации для геомоделирования объектов торфодобывающих производств служат геологические, топографические и гипсометрические планы, вертикальные и горизонтальные стратиграфические сечения, данные опробования геологоразведки, аэрофотосъемки. Этот блок инженерно-геологической информации следует правильно интерпретировать, что не всегда возможно грамотно описать математическим языком. Проще всего преобразовать в геоматематическую модель геологические планы и профили, однако следует учитывать их достоверность и точность. Точность может быть достигнута при комплексном использовании геологических планов и профилей с данными по качественным характеристикам торфа.

## ПРИНЦИПЫ ЦИФРОВОГО ГЕОМОДЕЛИРОВАНИЯ ТОРФЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Основополагающим фактором, оказывающим влияние на характер и качественно-количественные особенности торфообразования, по праву можно считать рельеф. Проявление влияния рельефа на процесс накопления торфа происходит во взаимосвязи и взаимообусловленности с комплексом других важных факторов, таких как климат, почвы, растительность и пр. Рельеф характеризует горно-геологические условия формирования торфяного месторождения. С ним связаны также генезис процессов торфонакопления, особенности географического распределения торфяных месторождений и их качественно-количественные показатели.

Для конкретного торфяного месторождения конфигурация его рельефного поля представляет собой набор перепада высот изолиний горизонталей поверхности и отметок минерального дна, которые используются для построения замыкающих поверхностей в цифровой модели месторождения (рис. 7).

Таким образом, получается геометрическая объемная модель торфяной залежи, которая показывает только форму, но не внутреннюю структуру (рис. 8). Сеть зондирования позволяет построить цифровую модель по качеству слагающих торфяное месторождение слоев различного торфа и слоев погребенной древесины, т.е. создать внутреннюю структуру торфяника (рис. 9).



Рис. 7. Фрагмент карты торфяного месторождения

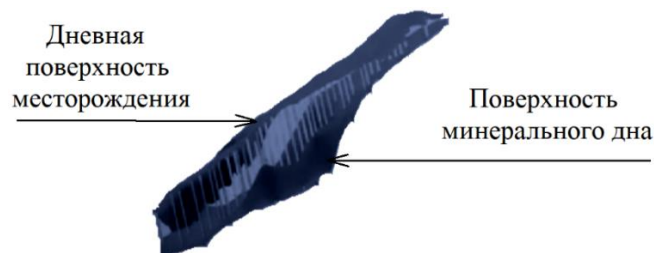


Рис. 8. Геометрическая цифровая модель торфяного месторождения

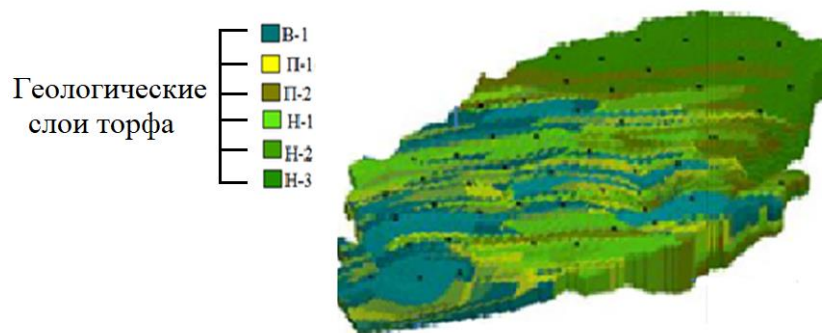


Рис. 9. Цифровая модель торфяного месторождения, построенная с учетом информации о качестве торфа

Особенностью моделирования торфяного месторождения является динамичность, изменение во времени и в пространстве фронта торфодобывочных работ и качественных характеристик торфа в залежи. Данная черта отражает трудность построения единого информационного массива для торфяного производства, которое характеризуется сложной структурой с иерархическими уровнями. Однако если информацию различного вида представить в форме единичных показателей, привязанных в форме точек к координатам пространства и времени, то появляется возможность создать единый информационный массив.

Точка – это базовый элемент информационной системы в 3D-координатах. Она характеризуется набором качественных (геологических) характеристик торфа и координатами места расположения. Вектор показывает направление и дальность перемещения точки. Скорость перемещения точки и время характеризуют срок и длительность перемещения точки. Моделирование торфяных залежей основано на цифровом представлении граничащих друг с другом поверхностей между слоями торфа различного типа, слоями погребенной древесины и подстилающим слоем минеральных пород. Базой геомоделей является точечно-цифровая информация, а именно данные геологоразведки (зондирование и стратиграфия) торфяного массива. По такому дискретно-точечному принципу работают практически все геоинформационные модели, заложенные в ГИС-системах.

Основные принципы создания и использования цифровых моделей торфяного месторождения заключаются в следующем:

1. Точность цифровой модели месторождения должна соответствовать полученной в ходе геологической разведки информации.
2. Цифровая модель месторождения должна изменяться в соответствии со стадией жизненного цикла месторождения и полученной новой геологической информацией.
3. Цифровому моделированию подлежит не только месторождение, но и окружающая его минеральная среда.
4. Сложность цифровых моделей зависит от степени изменчивости (анизотропности) свойств торфяных месторождений.
5. Точка, единичный блок являются базовыми элементами при создании цифровой модели.
6. При цифровом моделировании месторождения используется дискретный принцип, а также принцип моделирования сплошной среды.

7. Цифровая модель месторождения должна сопрягаться с технологической и экономической моделями для технико-экономического обоснования различных технологических схем обработки месторождения.

Геоинформационный подход позволяет использовать большой объем различной исходной информации, чтобы можно было создать условия для принятия экономически эффективных и технически целесообразных инженерных и управленческих решений. При этом снижается трудоемкость и повышается скорость подготовки данных для разработки информационных систем, что является условием их практического использования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геологические изыскания – это фундамент процесса создания цифровых моделей месторождений. Точность цифровой модели напрямую зависит от данных, полученных при геологоразведке. Так, например, самой высокой точностью и достоверностью будет обладать цифровая модель, построенная по данным детальной геологической разведки.

На каждой последующей стадии жизненного цикла торфяного производства (проектирования, строительства и подготовки производства, добычи и ряда других) цифровая модель месторождения будет изменяться, так как на любом этапе возникает новый поток получаемой информации.

Цифровая модель торфяного месторождения должна позволять генерировать информацию, необходимую для принятия технологически безопасного и эффективного инженерного решения, в котором способы обработки месторождения рассмотрены с точки зрения экономики, технологии и экологии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Яконовская Т.Б. Цифровизация в реальном секторе экономики РФ: горнодобывающий комплекс // *Цифровая экономика и общество: материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ. 2021. С. 47–54.
2. Яконовская Т.Б. Совершенствование экономического механизма управления промышленными предприятиями. Дисс. ... канд. экон. наук. Тверь. 2009. 173 с.
3. Яконовская Т.Б. Проблемы информатизации анализа геологических данных предприятий по добыче торфа // *Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес: материалы одиннадцатой заочной международной научно-технической конференции*. Вологда: ВоГУ. 2020. С. 89–93.
4. Яконовская Т.Б. К вопросу о качестве геологической информации в торфяной сфере хозяйственной деятельности // *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 17-й международной конференции*. Тула: ТулГУ. 2021. С. 488–492.
5. Палюх Б.В., Цветков Р.Е. Информационная система имитационного моделирования торфяных пожаров // *Программные продукты и системы*. 2007. № 3. С. 48.
6. Дмитриев Г.А. Научные основы создания систем контроля и управления технологическими и организационными процессами производства фрезерного торфа. Дисс. ... докт. техн. наук. Калинин. 1979. 39 с.
7. Караваева Н.М., Бураков А.И., Дмитриев Г.А., Лифшиц М.С. Автоматизация торфяного производства: учебное пособие. Калинин: КПИ. 1979. 312 с.
8. Макаренко Г.Л., Тимофеев А.Е., Яконовская Т.Б. Перспективы комплексного освоения торфяных месторождений (экологический, технологический и экономический аспекты) // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2010. № 10. С. 265–272.

9. Макаренко Г.Л., Тимофеев А.Е., Яконовская Т.Б., Беляков В.А. Разработка ресурсосберегающей технологии комплексного освоения торфяных месторождений // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2009. № 3 (81). С. 157–161.

10. Шек В.М., Руденко Ю.Ф., Дранишников П.С., Литвинов А.Г. Моделирование сплошной среды // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009. № S2. С. 409–420.

11. Панасюк Л.Н., Прокопов А.Ю., Акопян В.Ф. Моделирование сплошной среды методом дискретных элементов // *Строительство и архитектура: материалы Международной научно-практической конференции*. Ростов н/Д.: РГСУ. 2015. С. 437–438.

12. Власенко В.Д. Математическое моделирование в задачах механики сплошной среды: учебное пособие. Хабаровск: ТОГУ. 2010. 102 с.

13. Лазебная Л.А. Математическое моделирование гидродинамических процессов в анизотропной сплошной среде: применение к угольным пластам // *Журнал теоретической и прикладной механики*. 2021. № 4 (77). С. 44–51.

14. Гончарук К.О. Применение натуральных масштабов при моделировании сплошных сред // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XX Международного симпозиума*. М.: ТР-принт. 2014. С. 59–61.

15. Мельниченко И.А., Кожухов А.А., Омельченко Д.Р., Мосейкин В.В. Построение трехмерной модели месторождения с использованием принципов блочного моделирования и искусственных нейронных сетей // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2022. № 10. С. 5–19.

16. Шек В.М., Литвинов А.Г., Вознесенский Ю.С. Визуализация дискретных моделей сплошной среды // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № S2. С. 421–431.

17. Шек В.М. Объектно-ориентированное моделирование горнопромышленных систем. М.: МГГУ. 2000. 304 с.

18. Кувашкина Т.А., Шек В.М. Особенности построения масштабированного пространственно-атрибутивного банка данных горнопромышленной системы // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2005. № 8. С. 221–225.

19. Гиацинтов А.М., Мамросенко К.А. Визуализация гидродинамических моделей месторождений // *Вестник кибернетики*. 2018. № 2 (30). С. 93–101.

20. Ковин Р.В., Марков Н.Г. Геоинформационные системы и технологии: учебник. Томск: ТПУ. 2009. 300 с.

21. Ветров А.Н., Борисов А.Л. Компьютерные технологии работы с географическими данными: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ. 2017. 160 с.

**Для цитирования:** Яконовская Т.Б. Цифровая трансформация предприятий торфяной отрасли. Часть 1. Принципы геомоделирования торфяного месторождения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 85–95.

**DIGITAL TRANSFORMATION OF PEAT INDUSTRY.  
PART 1. PRINCIPLES OF GEOMODELING OF PEAT DEPOSIT**

T.B. YAKONOVSKAYA, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: tby81@yandex.ru

The article describes the methodology of peat deposit geomodeling. The principles of creating and using a digital model of peat deposit are shown. Peat production as an information object is evaluated. The article describes the peculiarities of geoinformation systems application in the conditions of peat extraction enterprises, as well as the sources of initial information required for geomodeling of peat production facilities.

*Keywords:* peat deposit, modeling, modeling objects, sources of information, modeling principles.

Поступила в редакцию/received: 24.11.2023; после рецензирования/revised: 30.11.2023;  
принята/accepted: 05.12.2023

УДК 004.942

**САЕ-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СОПЛА  
СКРАПОВОГО РЕЗАКА, ОХЛАЖДАЕМОГО  
СТРУЕЙ РЕЖУЩЕГО КИСЛОРОДА,  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СОПРЯЖЕННОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ**

Д.А. ЗОРЕНКО, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: dzorenko@yandex.ru

© Зоренко Д.А., 2024

В статье представлены основные результаты САЕ-моделирования температурных процессов, происходящих в сопле скрапового резака при раскрое скрапа толщиной более 800 мм. Показано распределение температуры в теле сопла при его охлаждении струей режущего кислорода. Рассмотрены особенности создания расчетных моделей теплопереноса с поверхности скрапа на рабочий торец сопла, а также проведены сопряженные вычисления температурных полей в теле сопла при холодной продувке струей режущего кислорода центрального канала.

*Ключевые слова:* газокислородный раскрой, температурное поле, метод конечных элементов, расчетная модель, расчетная аэрогидродинамика, скрап, сопряженные вычисления, сопряженный теплообмен.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-95-101**

**ВВЕДЕНИЕ**

Газокислородный раскрой крупногабаритных отходов металлургической промышленности (т.е. скрапа) является актуальной и непростой (с технической точки зрения) задачей. Этот процесс осложняется большими габаритами скрапа и наличием

толстой и плотной окалины на его поверхности. Диаметры более 800 мм и линейные размеры, достигающие нескольких метров, дают многотонную массу металла, раскрой которой осуществляется без транспортировки, непосредственно на месте накопления, т.е. газокислородный резак на специальной кронштейне подводится к раскаиваемому скрапу (рис. 1).



Рис. 1. Вид рабочей зоны раскроя скрапа

Процесс характеризуется большим расходом режущего и подогревающего кислорода, а также горючего газа. Режущая струя имеет температуру более 1 600 °С, а зона горения стали разогревается до температуры более 2 000 °С. При этом рабочая часть резака – сопло – находится в непосредственной близости от нее. И хотя расстояние при этом процессе увеличивают до 30...80 мм, сопло подвергается воздействию высоких температур. Залогом его работоспособности в таких условиях являются большая теплопроводность материала и желательное принудительное охлаждение. В качестве материала сопла чаще всего используются хромистые бронзы с теплопроводностью 315 Вт/(м·К) и температурой плавления 1 080 °С. По этим параметрам они не уступают различным маркам меди, превосходя их по прочностным свойствам. Принудительное охлаждение сопла затрудняется условиями его работы и конструктивными особенностями скраповых машин и резаков.

Единственными источниками охлаждения сопла являются потоки проходящих через него газов и основной из них – поток режущего кислорода, проходящий через центральное отверстие (рис. 2). В существующих моделях не учитывалось влияние подогревающего кислорода и горючего газа, при этом были исключены каналы их подвода в рабочую зону. Они присутствуют в сопле в большом количестве и, имея малые сечения, существенно усложняют расчет, забирая на себя большое количество расчетных ячеек.

Цель настоящей работы – провести САЕ-моделирование работы скрапового сопла, получить распределение температурных полей внутри него и выявить влияние на поля охлаждающих свойств струи режущего кислорода.



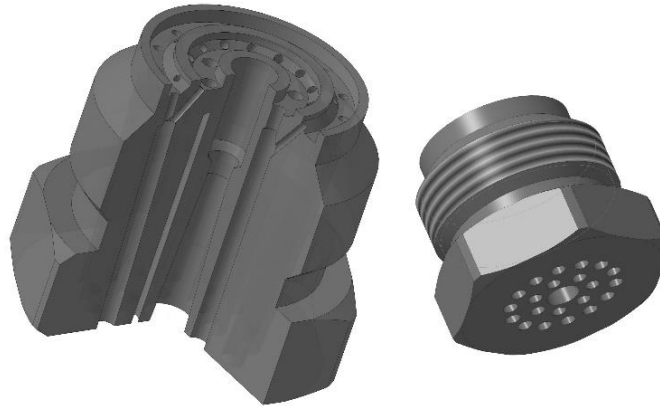


Рис. 2. Общий вид сопла скрапового резака

### МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование производилось в специализированном программном обеспечении [1–3]. Процесс был разделен на три этапа: холодную продувку струей кислорода центрального отверстия сопла; моделирование конвективного теплопереноса от нагретой зоны раскроя к рабочему торцу сопла; сопряженное вычисление аэродинамики потока режущего кислорода и отвода им тепла от материала сопла [4–7].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе моделировалось холодное течение режущего кислорода через центральное отверстие скрапового сопла. На рис. 3 представлено распределение скорости потока кислорода в продольном сечении сопла. Входное избыточное давление кислорода – 600 кПа. В качестве давления на выходе из сопла принималось атмосферное. Температура кислорода – 10 °С. Расчетная сетка адаптировалась по стенкам отверстия и объему описанного вокруг него цилиндра.

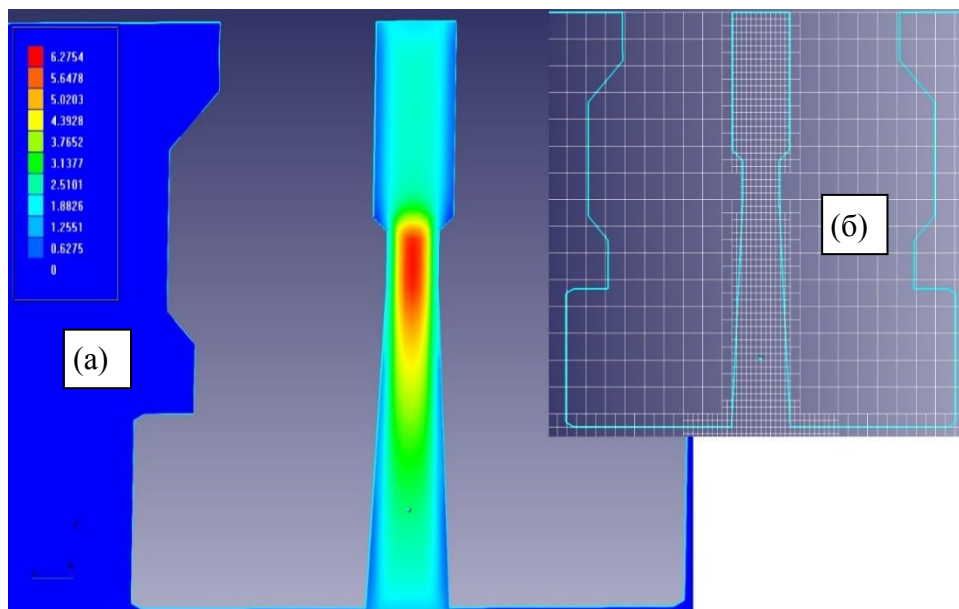


Рис. 3. Распределение скорости потока режущего кислорода в центральном канале сопла (а) и расчетная сетка (б)

При рабочем давлении скорость потока в канале сопла достигает 6 м/с. Среднее значение скорости потока в пристеночном слое составляет 3 м/с. Полученные значения скоростей в последующем сопряженном расчете позволят проконтролировать получающиеся значения.

Следующий этап – моделирование теплопереноса между зоной горения стали и рабочим торцом сопла через воздушную прослойку, размер которой был выбран наиболее часто применяемым – 30 мм. В качестве результатов были получены картины распределения температуры как по поверхности сопла (рис. 4), так и в его объеме (рис. 5). Температура нагретой поверхности скраба была принята равной 2 000 °С. Поток кислорода через центральный канал сопла не моделировался. В ходе моделирования осуществлялось сопряжение двух расчетных областей – воздуха вокруг сопла и материала самого сопла. В качестве материала использовалась хромистая бронза марки БрХ1. Полученные результаты позволили определить начальное граничное условие по прикладываемой к соплу температуре, а также сравнить значения температуры в объеме сопла при продувке струей режущего кислорода центрального канала. В результате моделирования было установлено максимальное значение температуры на торцевой поверхности сопла 1 280 °С (табл. 1). Значения температуры вокруг сопла в секущей плоскости даны в табл. 2.

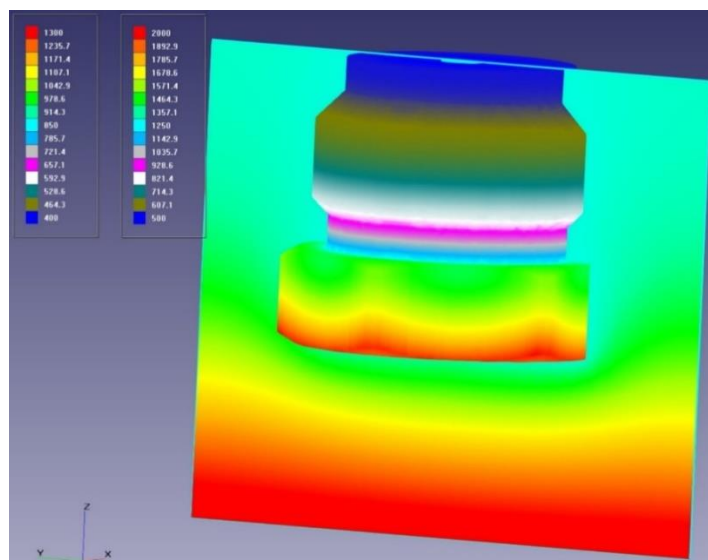


Рис. 4. Температурное поле по поверхности сопла и в воздухе вокруг сопла на секущей плоскости

Таблица 1. Распределение температуры на поверхности сопла, °С

На нижнем торце	На боковой поверхности шестигранника	На поверхности с резьбой	На верхнем торце
1 280	900...1 280	850...500	500...350

Таблица 2. Распределение температуры вокруг сопла в секущей плоскости, °С

Над поверхностью скраба	В слое, прилегающем к нижнему торцу сопла	В районе резьбы сопла	В районе верхнего торца
2 000	1 300...1 460	1 000...1 350	500...950

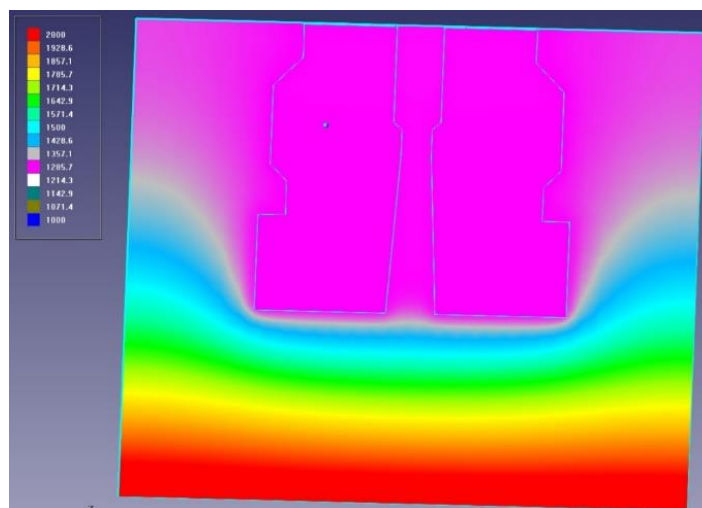


Рис. 5. Температурное поле в секущей плоскости, захватывающей как сопло, так и окружающий его воздух

На следующем этапе проводилось сопряженное моделирование конвективного теплопереноса и аэродинамического течения кислорода в центральном канале сопла.

Расчет температурных полей в объеме сопла велся с учетом продувки струей кислорода с давлением на входе 600 кПа и сопряжением расчетных областей по стенкам центрального канала с условием сопряженного теплопереноса. Результаты расчета в виде распределения в секущей плоскости температурных полей с наложением аэродинамической струи кислорода показано на рис. 6. Расчетная сетка адаптировалась по сопрягаемой стенке и объему центрального канала. Производилась также ее адаптация по наружным стенкам сопла, к которым прикладывалась температура, рассчитанная на предыдущем этапе.

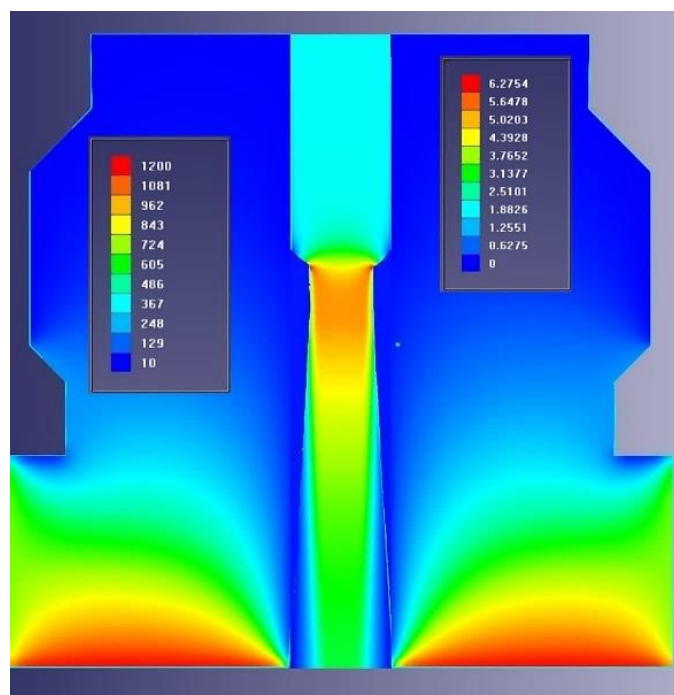


Рис. 6. Температурное поле в объеме сопла (левая шкала) и скорость потока кислорода (правая шкала)

Температура потока кислорода равнялась 10 °С, что является средним рабочим значением. К нижнему торцу сопла была приложена температура 1 250 °С, взятая из предыдущего расчета. К верхнему торцу прикладывалась температура 100 °С, а к крепежной резьбе – 300 °С, тем самым моделировался теплоотвод от сопла к корпусу резака. Коэффициент шага по времени для конвективного теплопереноса задавался равным 10 °С. Общий шаг по времени задавался числом Куранта 0,1.

На рис. 6 левая шкала показывает значения температуры, распределенной в объеме сопла. Максимальная температура достигается в районе рабочего торца сопла и снижается по мере удаления от него. Минимальная температура наблюдается в районе центрального канала сопла и ближе к верхнему торцу приближается к 10 °С, что является результатом отвода тепла в корпус резака и охлаждения струей режущего кислорода.

Если сравнить результаты на рис. 5 и 6, станет видно, что общий уровень температуры в сопле существенно ниже у модели, учитывающей поток кислорода. Сравнивая значения скорости течения кислорода в модели сопряженного теплопереноса (см. рис. 6) (правая шкала) и скорости при аэродинамическом расчете (см. рис. 3), можно понять, что картины отличаются незначительно, что связано с разной конфигурацией расчетных сеток, но общий уровень скоростей сопоставим. Модель сопряженного теплопереноса показывает в основном существенно более низкий общий уровень температур в сравнении с температурой плавления бронзы марки БрХ1. Это подтверждает хорошая работоспособность сопел в представленных условиях. Главным наиболее быстро разрушающимся участком поверхности сопла является его нижний торец, что обуславливается картиной температурных полей.

Таким образом, на основе модели видно, что неплохая работоспособность скрапового сопла во многом обусловлена хорошим охлаждающим эффектом струи режущего кислорода, достаточно большим объемом и массой рабочего торца сопла, хорошими теплопроводящими свойствами его материала. Кроме того, заменителем хромистой бронзы в подобных рабочих условиях могут служить различные марки меди, уступающие ей только по прочностным свойствам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно вышеизложенному можно отметить, что использование метода конечных элементов позволяет быстро, эффективно и достоверно моделировать сложные процессы теплопереноса между различными веществами, находящимися в разных агрегатных состояниях. Это дает возможность в еще более высокой степени приблизить расчетную модель к ее природному прототипу. Результаты моделирования показали (хоть и косвенно) хорошую корреляцию с результатами реального технологического процесса. В дальнейшем возможно повышение точности моделирования путем учета продувки потоком подогревающего кислорода и горючего газа периферийных каналов, которые в представленной работе не учитывались с целью уменьшения числа расчетных ячеек, снижения нагрузки на ПК и увеличения скорости вычислений. В последующих расчетах имеет смысл повысить точность моделирования за счет привлечения больших вычислительных мощностей. Таким образом, конечно-элементный комплекс расчетной аэрогидродинамики позволяет успешно решать сложные задачи сопряженного теплопереноса при моделировании работы газокислородных скраповых резаков в условиях, близких к натуральным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов А.А., Гудзовский А.В. Пакет прикладных программ Flow Vision // *Труды МФТИ. Серия «Аэрофизика и прикладная математика»*. М.: МФТИ. 1998. С. 45–56.
2. Зоренко Д.А. Моделирование лазерного раскроя стального проката // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 63–68.
3. Лавров А.В., Зоренко Д.А. Использование системы FlowVision в качестве виртуальной лаборатории при проведении проектных расчетов узла поджига для машин термической резки металлов // *САПР и графика*. 2007. № 4. С. 32–36.
4. Диденко Д.В., Балувев Д.Е., Маров И.В., Никаноров О.Л., Рогожкин С.А., Сорокин С.Е. Расчетное моделирование теплофизических процессов в высокотемпературном газоохлаждаемом реакторе // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2023. Т. 15. № 4. С. 895–906.
5. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2000. 576 с.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. М.: Наука. 1987. 840 с.
7. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука. 1978. 512 с.

**Для цитирования:** Зоренко Д.А. CAE-моделирование температурных полей сопла скрапового резака, охлаждаемого струей режущего кислорода, с применением сопряженного вычисления // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 95–101.

## CAE-MODELING OF THE TEMPERATURE FIELDS OF THE NOZZLE OF A SCRAP CUTTER COOLED BY A JET OF CUTTING OXYGEN USING COUPLED CALCULATION

D.A. ZORENKO, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: dzorenko@yandex.ru

The article presents the main results of CAE-modeling of temperature processes occurring in the nozzle of a scrap cutter when cutting scrap with a thickness of more than 800 mm. The temperature distribution in the nozzle body is shown when it is cooled by a jet of cutting oxygen. The features of creating computational models of heat transfer from the scrap surface to the working end of the nozzle are considered, and conjugate calculations of temperature fields in the nozzle body during cold purging with a jet of cutting oxygen of the central channel are carried out.

**Keywords:** oxygen gas cutting, temperature field, finite element method, computational model, computational aerohydrodynamic, scrap, coupled calculations, coupled heat transfer.

Поступила в редакцию/received: 05.12.2023; после рецензирования/revised: 11.12.2023;  
принята/accepted: 15.12.2023

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал  
№ 1 (21), 2024**

**Print ISSN 2658-5030  
Online ISSN 2687-0029**

Редактор С.В. Борисов  
Корректор С.В. Зорикова

---

Подписано в печать 23.01.2024

Дата выхода в свет 02.12.2024

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 12,75

Тираж 500 экз.

Усл. печ. л. 11,86

Цена свободная

Заказ № 274

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,09

С – 102

---

Редакционно-издательский центр  
Тверского государственного технического университета  
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22  
Отпечатано в ООО «Издательство «Триада»  
170034, Тверь, пр. Чайковского, д. 9, офис 514