



ДОНЕЦКИЙ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ

ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Международный
сборник научных трудов**

Выпуск 4 (91)' 2025



ДОНЕЦК - 2025

ISSN 2073-3216
ISSN 2518-7120 (E)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Международный сборник научных трудов

Выпуск 4 (91)' 2025

Донецк
2025

УДК 621.01(063)
ББК 34.4
П78

Рекомендовано к изданию
Ученым советом ФГБОУ ВО «ДонНТУ»
(протокол № 5 от 30.05.2025 г.)

Ответственный редактор – Михайлов Александр Николаевич

Редакционная коллегия:

Михайлов А. Н. (председатель), Горобец И. А., Лахин А. М., Баласанян Б. С.,
Бахадиров Г. А., Брешев В. Е., Бутенко В. И., Витренко В. А.,
Мазуру С., Овчинников Е. В., Пантеленко Ф. И., Поветкин В. В.,
Суслов А. Г., Тока А., Хандожко А. В.

П78 **Прогрессивные технологии и системы машиностроения :**
международ. сб. науч. трудов / Ред. кол.: Михайлов А. Н. (пред.),
Горобец И. А., Лахин А. М. [и др.]; отв. ред. А. Н. Михайлов. –
Донецк : ДонНТУ, 2025. – Систем. требования : просмотрщик PDF-
файлов. – Загл. с титул. экрана.

В международном сборнике приведены вопросы теории и практики обработки изделий прогрессивными методами, показаны достижения и направления развития технологического оборудования, оснастки, металлорежущего инструмента и нанесения специальных покрытий на изделия машиностроения. Рассмотрены аспекты автоматизации производственных процессов и надежности технологического оборудования, а также освещены современные проблемы материаловедения в машиностроении.

В издании публикуются труды ученых и ведущих специалистов из разных стран, сборник предназначен для научно-технических работников, ИТР и специалистов в области машиностроения.

Тексты трудов печатаются в авторской редакции.

Издается при содействии Донецкого регионального отделения «Союз машиностроителей России».

УДК 621.01(063)
ББК 34.4

УДК 621.85.05-034

В. Ю. Глушко, аспирант, **Н. В. Михайлов**, магистрант
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, Россия
Тел./Факс: +7 949 382 23 85; E-mail: tirex_nic@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗУБЬЕВ МУФТ ТРАНСМИССИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье исследованы особенности эксплуатации зубчатых муфт, выявлены факторы, влияющие на распределение нагрузки по пятну контакта, и предложены аналитические зависимости для определения углов контактирования зубьев.

Ключевые слова: зубчатая муфта, контактное взаимодействие, распределение нагрузки, угол контактирования, эвольвентный профиль.

V. Yu. Glushko, N. V. Mikhailov

STUDY OF THE CONTACT INTERACTION FEATURES OF COUPLING TEETH IN TRANSMISSION OF PROCESSING EQUIPMENT

The article examines the features of contact interaction of coupling teeth, identifies factors influencing the load distribution over the contact patch, and proposes analytical dependencies for determining the contact angles.

Keywords: gear coupling, contact interaction, load distribution, contact angle, involute profile.

1. Введение

Зубчатые муфты [1, 2] находят широкое применение в различных машинах и механизмах благодаря их способности передавать значительные крутящие моменты при сравнительно небольших габаритах, простоте конструкции и возможности компенсировать несоосности валов. Однако они имеют существенный недостаток — малую долговечность. Проведенные многочисленные исследования показывают, что около 70...80 % выхода из строя зубчатых муфт при эксплуатации происходит в результате контактных разрушений и износа рабочей поверхности зубьев [3, 4, 5]. Это обусловлено тем, что обычно зубчатые муфты работают в условиях перекосов и смещений осей соединяемых валов, когда нагрузка концентрируется на вершинах и торцах зубьев. Технологические ошибки изготовления и монтажа вызывают дополнительные концентрации нагрузки превышающие допустимые, что и приводит к преждевременному выходу их из строя, поскольку сложившиеся методы расчета являются весьма приближенными ввиду того, что не учитывают реальных условий распределения нагрузки на пятне контакта взаимодействующих зубьев.

Цель работы заключается в выявлении особенностей контактирования и определении влияния их на распределение нагрузки по пятну внутреннего контакта зубьев полумуфты и обоймы.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи:

1. Выявить особенности контактирования и определить влияния их на распределение нагрузки по пятну внутреннего контакта зубьев муфт с эвольвентным профилем.
2. Разработать структурные схемы, показывающей влияние геометрических, технологических и эксплуатационных факторов на распределение нагрузки по пятну контакта зуба муфты
3. Выявить зависимости для определения максимальных углов контактирования на оси максимального перекоса зуба от геометрических параметров зубьев муфт.

4. Выявить закономерности в распределение нагрузки на пятне контакта позволяющие в дальнейшем разрабатывать методики расчета для определения концентрации нагрузки, учитывающие особенности контакта зубьев муфт.

2. Основное содержание и результаты работы

На рисунке 1 показано зацепление зубчатой муфты с зубьями эвольвентного профиля, которые взаимодействуют в условиях перекосов осей втулки относительно обоймы, в точках А и В – особые положения зубьев втулки относительно зубьев обоймы [3].

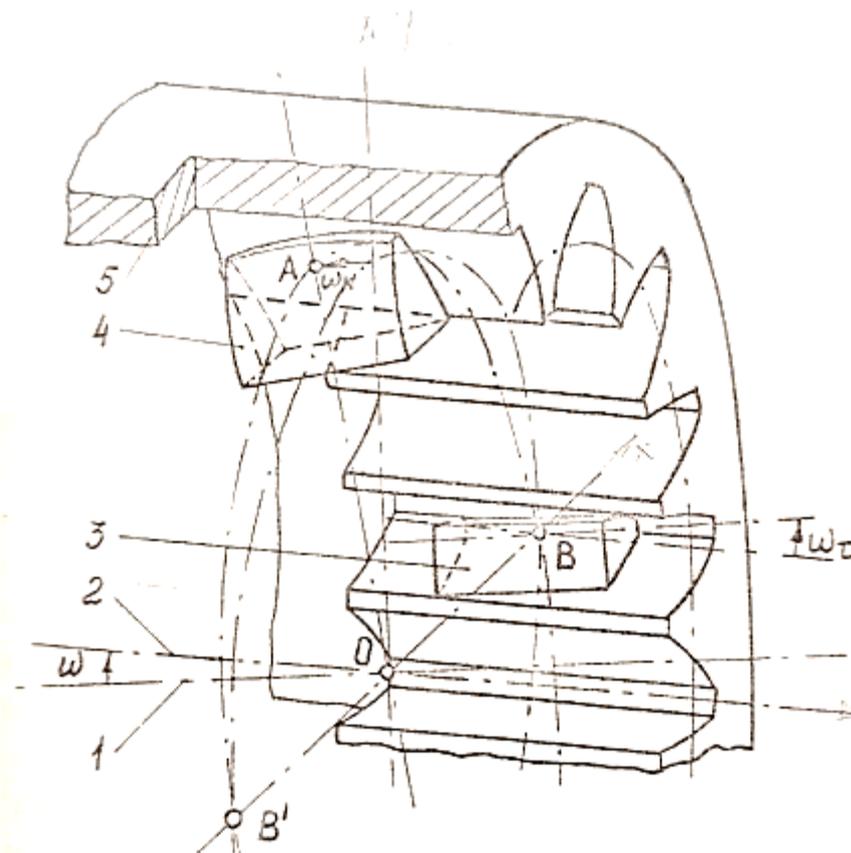


Рисунок 1. Особые положения зубьев втулки относительно зубьев обоймы: 1 – ось втулки, 2 – ось обоймы, 3 – зуб втулки в положении максимального перекоса, 4 – зуб втулки в положении максимального наклона, 5 – обойма

При несоосности соединенных валов втулка перекошена по отношению к обойме на угол ω . В точке А зуб втулки находится в положении максимального наклона, а в точке В, лежащей на оси, расположенной под углом 90° к точке А, следует положение максимального перекоса. При вращении муфты каждый зуб втулки дважды пробегает эти особые положения. Между ними имеет место совмещение перекоса и наклона зубьев.

Отклонение осей зацепления на угол ω вызывает тангенциальные смещения зубьев, которые ведут к появлению неравномерных зазоров между зубьями по периметру соединения. Тангенциальные смещения экстремальны в положении максимального перекоса, поэтому в начальный момент вращения при нагрузке муфты зубья в них имеют первоначальное соприкосновение и наибольшую по величине нагрузку. Чем больше

отклонения осей, а также чем больше жесткость зубьев, тем сильнее концентрируется нагрузка в зонах максимального их перегиба. Кроме того, на тангенциальные смещения накладываются технологические ошибки шагов зубьев, которые также приводят к неравномерному распределению боковых зазоров, и зубья дополнительно нагружаются по периметру неравномерно [3].

Выше было сказано о неравномерности распределения нагрузки по периметру зацепления муфты. Вместе с тем неравномерность распределения нагрузки также имеет место на пятне контакта зубьев, которая влияет на концентрацию контактных напряжений и прочность.

На рисунке 2 изображена структурная схема, показывающая влияние геометрических, технологических и эксплуатационных факторов на распределение нагрузки по пятну контакта зуба муфты. Здесь распределение нагрузки по пятну контакта рассматривается в раздельной взаимосвязи — по ширине и по длине. Такое разделение принято для того, чтобы лучше выразить влияние различных факторов на характер распределения нагрузки и точнее учесть их действие в дальнейших расчетах.

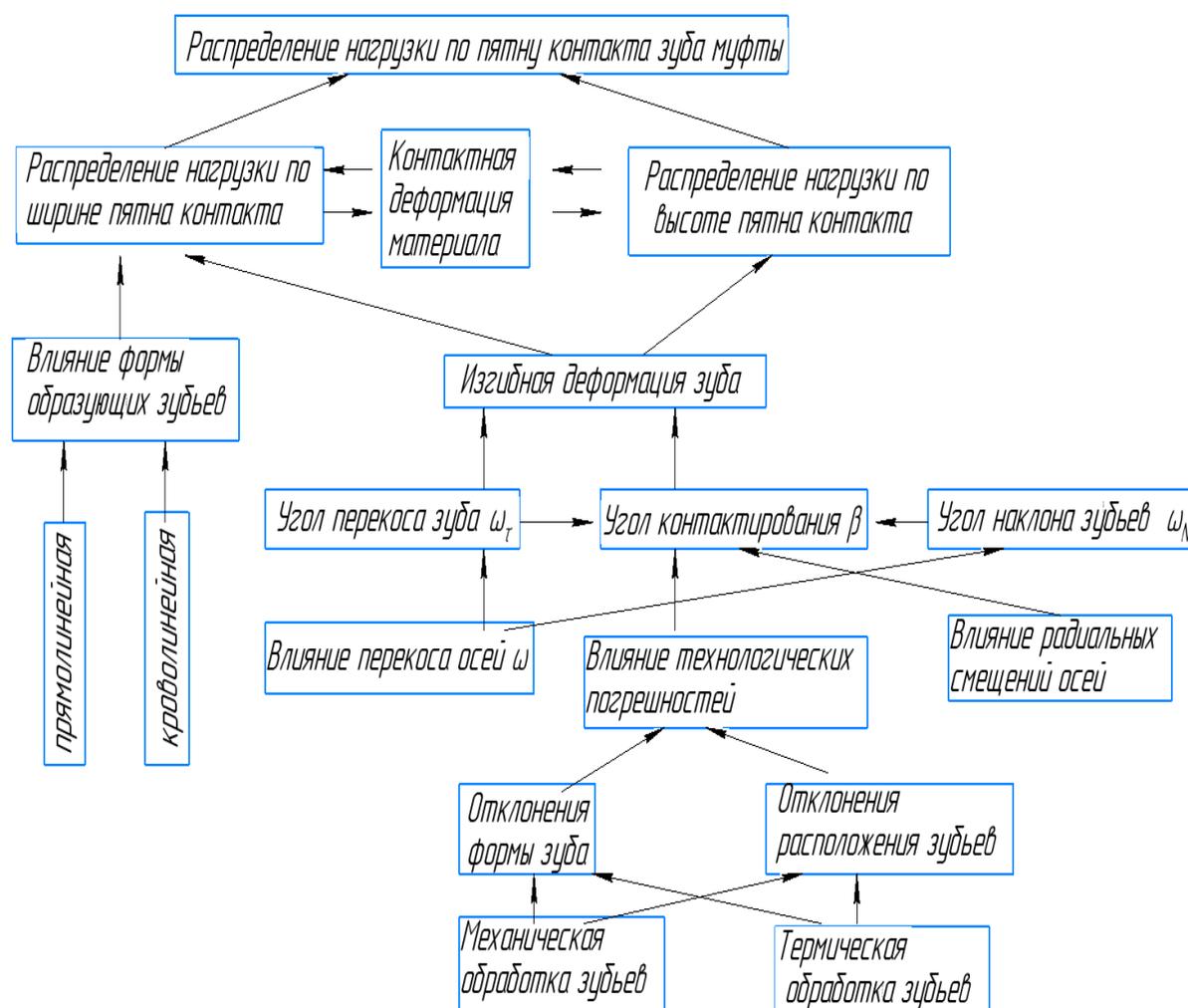


Рисунок 2. Структурная схема влияния основных факторов на распределение нагрузки по пятну контакта зуба муфты

На распределение нагрузки по ширине пятна контакта зуба (по образующей) основное влияние оказывают: форма образующей зуба (радиус кривизны), угол перекоса зуба ω_τ и технологические погрешности изготовления. Сразу отметим, что для зуба втулки с переменной кривизной образующей изменение его перекоса будет вызывать изменение радиуса кривизны образующей в точке контакта, так как зуб втулки поворачивается относительно зуба обоймы.

Технологические погрешности изготовления обуславливают отклонение образующей зуба от идеального положения. Для зубьев муфт с прямолинейными образующими это отклонение можно характеризовать углом отклонения реальной образующей от идеальной или технологическим углом несовпадения образующих зубьев втулки и обоймы ω_τ . Поэтому распределение нагрузки по ширине зубьев с прямолинейными образующими будет зависеть от суммарного угла между их образующими, который определяется по формуле:

$$\omega_\Sigma = \omega_\tau + \omega_\tau,$$

Для зубьев с криволинейными образующими технологические погрешности их изготовления обуславливаются отклонением радиусов кривизны реальной образующей зуба от заданных идеальных значений. Однако в данной работе влияние технологических погрешностей на распределение нагрузки по ширине зуба (по образующей) не рассматривается, так как их действие несущественно по сравнению с влиянием перекоса, который в зависимости от формы образующей зуба оказывает главное влияние. Кроме того, в дальнейших расчетах принято допущение, что взаимодействующие поверхности абсолютно гладкие, а зубья обоймы имеют прямолинейные образующие.

Основное влияние на распределение нагрузки по высоте пятна контакта (по производящему контуру в направлении высоты зуба) оказывает угол контактирования β между эвольвентными профилями (рисунок 3), величина которого зависит от изгибной деформации зубьев и определяется следующими факторами:

1. Углом перекоса зубьев ω_τ .
2. Технологическими погрешностями изготовления зубьев [6, 7, 8].
3. Радиальными смещениями осей втулки относительно обоймы.
4. Углом наклона зуба ω_N (рисунок 1).

В дальнейших расчетах распределения нагрузки по пятну контакта последним фактором пренебрегаем, так как прочностной расчет муфт производится для зубьев, находящихся на оси максимальных перекосов (рисунок 1), где действует наибольшая нагрузка и углы наклона их отсутствуют.

Исследования, в условиях производства и на натурных образцах зубчатых муфт на экспериментальном стенде ДПД для испытаний зубчатых муфт, позволили установить, что при эксплуатации их площадка контакта может находиться на вершине зуба обоймы (рисунок 3, а), на вершине зуба втулки (рисунок 3, б) или в редких случаях равномерно распределена по высоте взаимодействующих зубьев (рисунок 3, в). При этом наихудшим случаем контактирования является такой, когда площадка контакта выходит на вершину зуба обоймы. Так как при равных условиях нагружения жесткость зуба обоймы выше, чем зуба втулки, поэтому при взаимодействии зуба втулки по вершине зуба обоймы угол β будет больше, чем при взаимодействии зуба обоймы по вершине зуба втулки, и нагрузка будет более концентрированной.

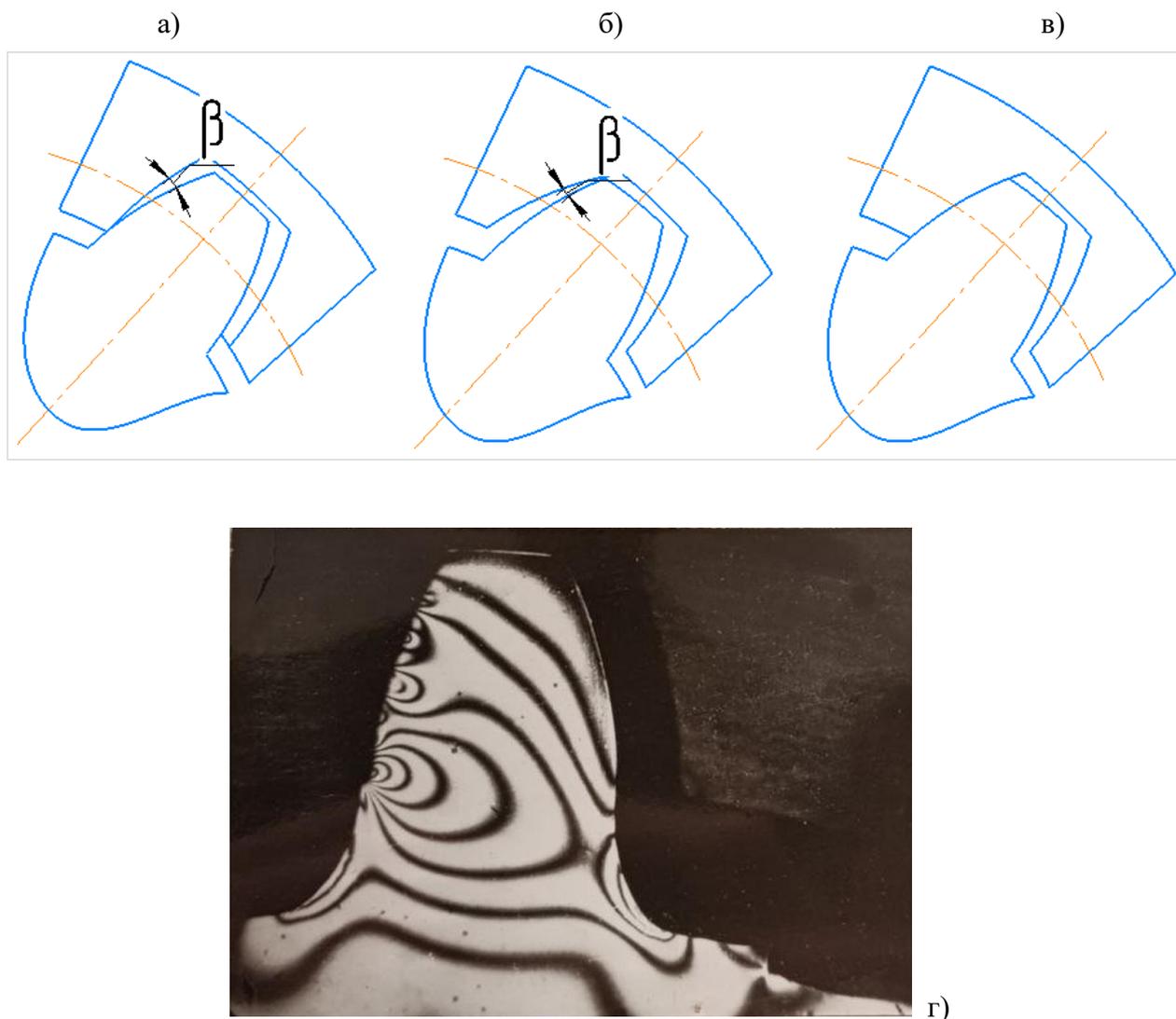


Рисунок 3. Зацепление пары зубьев: а – $\beta > 0$; б – $\beta < 0$; в – $\beta = 0$; г – интерференционная картина полос в поляризованном свете на зубе втулки при $\beta = 0,00218$ рад, $P = 120$ Н ($z = 24$, $m = 5$ мм, $B = 20$ мм, исходный контур по СТ СЭВ 308-76)

Суммарный угол контактирования β между эвольвентными профилями зубьев, обусловленный описанными выше факторами, определен аналитически по методу "максимум-минимум":

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3, \tag{1}$$

где β_1 – элементарный угол контактирования между эвольвентными профилями зубьев, возникающий от перекоса зуба втулки относительно зуба обоймы;

β_2 – элементарный угол контактирования, возникающий от технологических погрешностей изготовления зубьев;

β_3 – элементарный угол контактирования, возникающий от смещения осей втулки относительно обоймы.

Элементарный угол контактирования β_1 , возникающий от перекоса осей втулки относительно обоймы, определен по формуле:

$$\beta_1 = \frac{\Delta S}{r} \quad (2)$$

где ΔS – нормальный боковой зазор между эвольвентными поверхностями зубьев, возникающий от их тангенциальных смещений;

r – радиус делительной окружности зубьев зацепления.

Воспользовавшись формулами работы [1] для определения величины ΔS , находим углы контактирования β_1 :

– для зуба втулки с криволинейной образующей (зуб обоймы с прямолинейной образующей):

$$\beta_1^K = \left(\frac{R_1}{r} - \sin \alpha_\omega \right) \frac{\omega^2}{2} \cos^2 \psi, \quad (3)$$

– для зуба втулки с прямолинейной образующей:

$$\beta_1^\Pi = \frac{B\omega}{2r} \cos \psi, \quad (4)$$

где R_1 – главный радиус кривизны боковой поверхности зуба;

α_ω – угол зацепления;

ω – угол перекоса осей втулки относительно обоймы;

ψ – полярный угол, координирующий положение зуба в зацеплении;

B – ширина зубчатого конца втулки.

Для зубчатых муфт выпускаемых на ряде машиностроительных заводов он находится в следующих пределах:

$$-0,000977 \text{ рад} < \beta_2 < 0,001498 \text{ рад}, \quad (5)$$

Значительное влияние на угол контактирования β между эвольвентными профилями оказывает элементарный угол контактирования β_3 , возникающий от радиальных смещений осей втулки относительно обоймы. Максимальная величина элементарного угла контактирования β_3 на оси максимального перекоса зуба определяется по следующей формуле:

$$\beta_3 = \pm \left[\arctg \left(\frac{2e_1}{r_B} + tg^2 \arccos \frac{r_B}{r_{a2,1}} \right)^{\frac{1}{2}} - \arccos \left(\frac{r_B}{r_{a2,1}} \right) \right], \quad (6)$$

где e_1 – величина радиального смещения осей втулки относительно обоймы;

r_B – радиус основной окружности зубьев зацепления;

$r_{a2,1}$ – радиус вершин зубьев обоймы или втулки.

При нахождении β_3 в выражении (6) следует подставлять значение r_{a2} или r_{a1} при взаимодействии зубьев по вершине зуба обоймы или втулки, если

ось обоймы смещена относительно оси втулки в направлении к рассматриваемому зубу или к противоположному.

В выражениях (5) и (6) знак плюс указывает на то, что контакт осуществляется по вершине зуба обоймы, а знак минус — по вершине зуба втулки.

При малых углах контактирования β (до 0,01 рад) площадка контакта по высоте зуба может распределяться на значительную часть эвольвентного профиля (рисунок 3, г). При этом распределение контактной нагрузки не будет соответствовать распределению по Герцу, так как в основе его теории положено допущение, что пятно контакта весьма мало по сравнению с размерами сжимаемых тел. Кроме того, нагрузка на пятно контакта вызывает прогиб зуба, соизмеримый с контактным сближением, что весьма существенно снижает контактные напряжения по сравнению с определяемыми по Герцу, так как происходит деформация поверхности зуба, которая влияет на напряжение в контакте.

3. Заключение

Таким образом, распределение нагрузки на пятне контакта зуба муфты имеет специфические особенности, обусловленные тем, что радиусы кривизны эвольвентных профилей взаимодействующей пары зубьев близки, кроме того оказывают влияние эксплуатационные и технологические факторы. Поэтому для определения концентрации нагрузки на пятне контакта зуба муфты необходимо разработать методику ее расчета, учитывающую в полном объеме описанные выше явления.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Айрапетов, В. Л., Косарев О. И. Зубчатые муфты. - М.: Наука, 1982. - 128 с.
2. Громан, М. Б., Зак П. С. Форма и контактное напряжение бочкообразного зуба. – Вестн. машиностроения, 1976, № 5, с. 42–45.
3. Pahl G. Operational Axial Forces of Tooth Couplings, Proceedings of the World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, 5, New York, Montreal, 1979, p. 177-180.
4. Калашников, А. С. Современные методы чистовой обработки зубьев цилиндрических колес / А. С. Калашников // Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов. Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2007. – № 5. – С. 38-42.
5. Кириченко, И. А. Обкатка зубьев цилиндрических колес обкатниками, полученными в пространственном станочном зацеплении / И. А. Кириченко, В. А. Витренко, М. А. Должков // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – Вып. 15. – С. 30-33.
6. Павлов, А. М. Непосредственная связь радиусов кривизны зубьев в пространственных зацеплениях // Зубчатые и червячные передачи. – Л.: Машиностроение 1968. – С. 24–35.
7. Рябченко, С. В. Шлифование зубчатых колес тарельчатыми кругами // Журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов» Серия «Металлообработка». – 2/2014. – С. 14-15.
8. Александров, И. В. Исследование влияния различных факторов на контактную выносливость зубчатых колес в тяжелом машиностроении / И. В. Александров, А. И. Волошин, В.Ф. Колесник, В.Н. Стрельников // Вестник НТУ «ХПИ». — Харьков, 2006. — Вып. 22. — С.5 — 9.

Поступила в редколлегию 19.05.2025 г.

Д. С. Жарких, аспирант, А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» г. Донецк, ДНР,
Россия
Тел./Факс: +7 (949) 366-85-14 E-mail: den.zharkikh@mail.ru

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПРИНЦИПИАЛЬНО-СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОТОЧНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

В статье рассматривается методика синтеза принципиально-структурных моделей поточно-пространственных технологических модулей (ППТМ), предназначенных для создания поточно-пространственных технологических систем (ППТС) непрерывного действия. Показано, что эффективное проектирование таких систем возможно на основе формального описания объемно-пространственных структур и принципиальных кинематических схем с применением методов декомпозиции и композиции. Предложен алгоритм синтеза принципиально-структурных моделей ППТМ, основанный на разложении сложных структур на элементарные движения и элементы с последующим формированием упорядоченных кортежей. Рассмотрены примеры синтеза ППТМ с различным числом входных и выходных потоков предметов обработки, а также особенности пространственного движения базовых технологических воздействий. Проанализированы способы организации загрузки и выгрузки предметов обработки простой и сложной конфигурации и показано их влияние на кинематические и динамические характеристики ППТМ. Полученные результаты расширяют возможности автоматизированного проектирования ППТС высокой производительности и сложной пространственной структуры.

Ключевые слова: поточно-пространственная технологическая система, поточно-пространственный технологический модуль, принципиально-структурная модель, объемно-пространственная структура, кинематическая схема, декомпозиция, композиция, предметы обработки.

D. S. Zharkikh, A. N. Mikhailov

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF PRINCIPAL AND STRUCTURAL MODELS OF CONTINUOUS FLOW-SPACE TECHNOLOGICAL SYSTEMS

The paper presents a methodology for the synthesis of principal structural models of flow-type technological machines (FTMs) intended for the development of continuous flow-type technological systems (FTTSs). It is shown that efficient design of such systems can be achieved on the basis of a formal description of volumetric-spatial structures and principal kinematic schemes using decomposition and composition methods. An algorithm for the synthesis of principal structural models of FTMs is proposed, which is based on the decomposition of complex structures into elementary motions and elements followed by the formation of ordered tuples. Examples of FTM synthesis with different numbers of input and output workpiece flows are considered, as well as the features of spatial motion of basic technological actions. Methods for organizing the loading and unloading of workpieces of simple and complex configurations are analyzed, and their influence on the kinematic and dynamic characteristics of FTMs is demonstrated. The obtained results expand the possibilities of automated design of high-performance FTTSs with complex spatial structures.

Keywords: flow-spatial technological system, flow-spatial technological module, fundamental structural model, volumetric-spatial structure, kinematic diagram, decomposition, composition, processing objects.

1. Введение

Ускорение темпов технического прогресса является одной из основных задач в развитии машиностроения [1, 2]. Однако это не мыслимо без дальнейшего развития технологических систем, осуществляющих производственные процессы получения промышленной продукции [3, 4]. В свою очередь, их дальнейшее развитие невозможно без перехода от решения локальных проблем автоматизации к реализации принципов

комплексной автоматизации производственных процессов. Такая же, тенденция особенно рельефно, наблюдается в электронной, медицинской, авиационной и энергетической промышленности при разработке высокоинтенсивных технологических процессов и создания на их основе высокоэффективных технологических систем. Вместе с тем, несмотря на достигнутые успехи в этом направлении, запросы практики вызывают необходимость дальнейшего повышения уровня автоматизации производственных процессов на основе создания качественно новых технологических систем – ППТС непрерывного действия [5, 6].

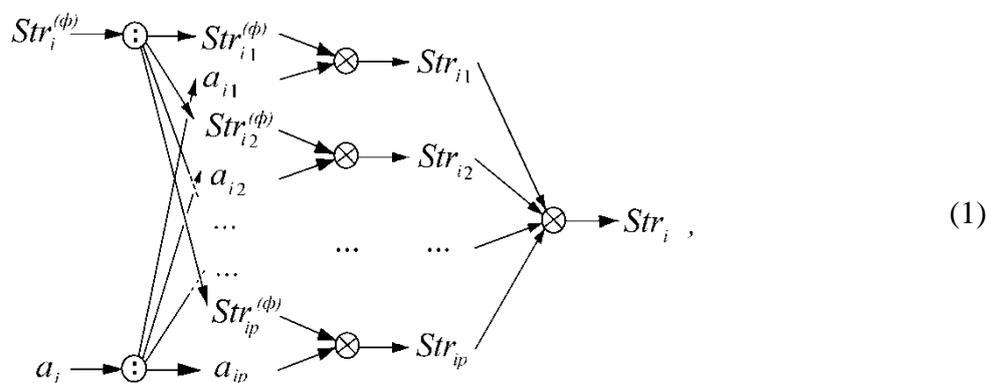
Целью работы является разработка и обоснование методики синтеза принципиально-структурных моделей поточно-пространственных технологических машин на основе декомпозиции и композиции объемно-пространственных структур и принципиальных кинематических схем для повышения уровня автоматизации и эффективности проектирования ППТС непрерывного действия.

2. Общая часть работы

При проектировании принципиально-структурных моделей ППТС возникают большие трудности из-за наличия значительного числа элементов и подсистем объемно-пространственной структуры модели и сложного состава принципиальной кинематической схемы ППТМ, а также в связи с большим перебором различных вариантов моделей и схем при их генерировании. Это приводит к возникновению задач большой размерности. Однако эти трудности легко преодолеваются при автоматизированном проектировании ППТМ и использования методов технической кибернетики, такие как декомпозиция и объединения (композиция) элементов моделей и схем [6].

В основу методики синтеза принципиально-структурных моделей ППТМ положена операция декомпозиции объемно-пространственной структурной модели и принципиальной кинематической схемы ППТМ на элементарные структуры $Str_{ik}^{(\phi)}$ и движения a_{ik} , затем объединения соответствующих элементарных структур $Str_{ik}^{(\phi)}$ и движений a_{ik} в упорядоченные пары и далее объединения этих упорядоченных пар в общую принципиально-структурную модель ППТМ. С помощью таких процедур и использования ЭВМ можно создавать любые типа принципиально-структурных моделей ППТМ. Кроме того, можно генерировать большое число вариантов принципиально-структурных моделей и вести их исследования в зонах далеких от того, что лежит на виду [3].

В схематическом виде процедура синтеза принципиально-структурных моделей ППТМ представляется зависимостью [5]:



где Str_i – структура принципиально-структурной модели i-го ППТМ;

Str_{ik} – структура k -го кортежа i -го ППТМ;

⊙ – знак декомпозиции объемно-пространственной структурной модели и принципиальной кинематической схемы;

⊗ – знак (оператор) объединения элементов.

Сущность оператора декомпозиции ⊙ заключается в расчленении на p взаимосвязанных локальных элементарных составляющих модели $Str_i^{(\Phi)}$ и схемы a_i . Объемно-пространственная структурная модель и принципиальная кинематическая схема ППТМ, как правило, легко распараллеливаются с помощью метода декомпозиции, и поэтому декомпозиция сложных структур наиболее эффективна при наличии многопроцессорных вычислительных машин. Заметим, что декомпозиция $Str_i^{(\Phi)}$ и a_i может выполняться параллельно или последовательно в зависимости от оперативных возможностей ЭВМ.

Разделение множеств $Str_i^{(\Phi)}$ и a_i должно производиться до тех пор, пока они не будут расчленены на простые элементы, которые можно представить множествами. Далее, выполняется объединение элементов множеств в упорядоченные пары (кортежи). После чего реализуется объединение кортежей в принципиально-структурную модель, которая может быть представлена множеством кортежей (1):

$$Str_i = \{Str_{i1}, Str_{i2}, \dots, Str_{ip}\}. \quad (2)$$

Таким образом, при синтезе принципиально-структурных моделей ППТМ выполняется двойная композиция элементов кортежей и кортежей. При этом управляемыми переменными являются структурные параметры $Str_i^{(\Phi)}$ объемно-пространственной структурной модели и кинематические параметры a_i принципиальной кинематической схемы ППТМ [5].

Решение задачи синтеза существенно облегчается при использовании автоматизированного проектирования, обеспечивающего выполнение на ЭВМ аналитических расчетов и построение принципиально-структурных моделей проектируемых ППТМ. Это обеспечивается благодаря формальному представлению этих моделей на соответствующем алгоритмическом языке. Получение описания принципиально-структурных моделей ППТМ является исходной информацией для последующего этапа проектирования параметризации и компоновки ППТМ.

При завершении синтеза принципиально-структурной модели 1-го ППТМ, начинается построение принципиально-структурной модели 2-го ППТМ, затем 3-го ППТМ и так далее до полного создания всех принципиально-структурных моделей ППТМ.

На рисунке 1 приведены принципиально-структурные модели ППТМ, выполненные на базе объемно-пространственной структурной модели с подсистемами второго класса. Однако в практике синтеза ППТМ могут быть случаи, когда композиция принципиально-структурных моделей выполняется на основе объемно-пространственной структурной модели с подсистемами третьего класса, четвертого класса и более высокого класса.

В качестве примера проведем синтез принципиально-структурной модели ППТМ на основе объемно-пространственной структурной модели с подсистемами третьего класса. При этом возьмем принципиальную кинематическую схему четвертой подгруппы третьей группы [5]. Эта принципиальная кинематическая схема состоит из трех элементарных движений: a_{i1} – прямолинейное осевое движение, a_{i2} – вращательное движение, a_{i3} – вращательное движение. Каждое из сочетаемых элементарных

движений, рассматриваемое в отдельности, является простым, а результирующая их – сложным транспортным движением, которое выполняется по винтовой поперечной эпициклоиде, траекторию которой можно представить выражением [5]:

$$\begin{cases} x_i = r + R \cos 2\pi n_3 T \left(\frac{1 + v_{i2}}{v_{i2}} \right); \\ y_i = R \sin 2\pi n_3 T \left(\frac{1 + v_{i2}}{v_{i2}} \right); \\ z_i = \frac{n_3 T t_1}{v_{i2}}, \end{cases} \quad (3)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты траектории движение БТВ;

R – радиус основной окружности подсистем второго класса;

r – радиус основной окружности подсистем третьего класса;

n_3 – частота вращательного движения a_{i3} ;

t_1 – осевой шаг элементов подсистем первого класса;

v_{i2} – количество позиций подсистем первого класса в позиции подсистемы второго класса;

T – время.

Принимая $k_0 = 1$ и используя выражения работы [6], определяем функциональную зависимость элементарных движений [6, 7]:

$$w_{Tp2} = \frac{w_{Tp3}}{v_{i2}}; \quad (4)$$

$$v_{Tp1} = \frac{t_1 w_{Tp2}}{2\pi}, \quad (5)$$

где w_{Tp3} – угловая скорость вращательного движения a_{i3} ;

w_{Tp2} – угловая скорость вращательного движения a_{i2} ;

v_{Tp1} – линейная скорость осевого прямолинейного движения a_{i1} .

Беря во внимание особенности работы модуля, объемно-пространственную структурную модель и принципиальную кинематическую схему синтезируемого ППТМ можно записать с помощью множеств [6]:

$$Str_i^{(\Phi)} = \{Str_{i1}^{(\Phi)}, Str_{i2}^{(\Phi)}, Str_{i3}^{(\Phi)}\}, \quad (6)$$

$$a_i = \{a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}\}, \quad (7)$$

Учитывая это, принципиально-структурную модель ППТМ представляем множеством кортежей:

$$Str_i = \{(Str_{i1}^{(\Phi)}, a_{i1}), (Str_{i2}^{(\Phi)}, a_{i2}), (Str_{i3}^{(\Phi)}, a_{i3})\}, \quad (8)$$

Машинная реализация принципиально-структурных моделей ППТМ выполняется на ЭВМ по схеме зависимости (1).

На рисунке 1 представлена принципиально-структурная модель ППТМ, составленная на основании выражения (8). Здесь БТВ 1 имеют пространственно-временную компоновку, благодаря которой они перемещаются по винтовой поперечной эпициклоиде 2 за счет двух вращательных движений a_{i3} , a_{i2} и осевого прямолинейного движения a_{i1} . Для этого, подсистемы 3 первого класса последовательно располагаются на каждой позиции подсистем 4 второго класса с фазовым смещением, которое определяется по формуле [6]:

$$t = \frac{t_1}{v_{i2}}, \tag{9}$$

где t_ϕ - величина осевого фазового смещения подсистем первого класса в каждой позиции подсистем второго класса.

При этом подсистемы 4 второго класса на каждой позиции подсистемы 5 третьего класса должны быть последовательно повернуты относительно друг друга на фазовый угол:

$$\gamma_\phi = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{2\pi}, \tag{10}$$

где γ_ϕ – фазовый угол последовательного поворота подсистемы второго класса относительно друг друга на каждой позиции подсистемы третьего класса;

α_1 – угол между подсистемами первого класса на позиции подсистемы второго класса;

α_2 – угол между подсистемами второго класса в подсистеме третьего класса.

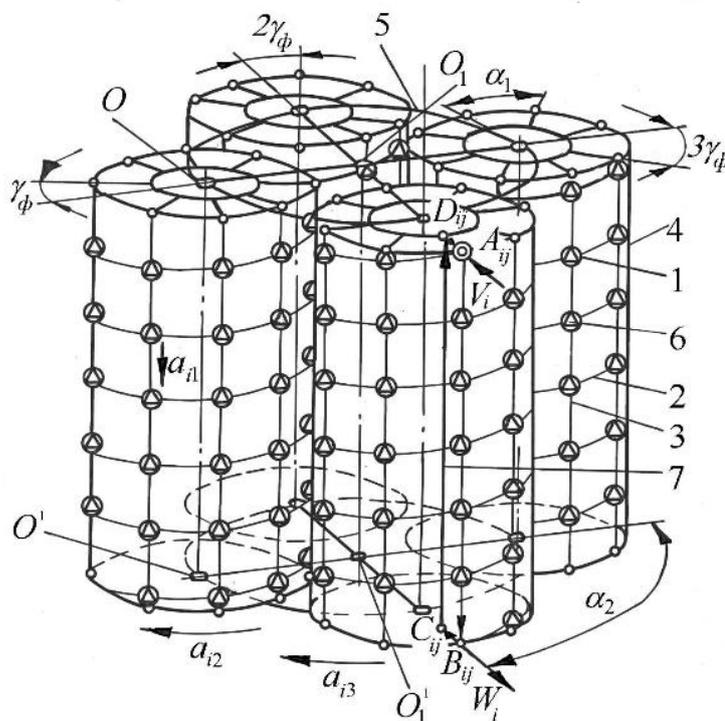


Рисунок 1. Принципиально-структурная модель ППТМ

Благодаря такой компоновки блоки технологического воздействия (БТВ) 1 по подсистемам, обеспечивается их пространственное движение по одной пространственной траектории 2, что позволяет вести загрузку предметов обработки (ПО) 6 по одному потоку v_i и их выгрузку по одному потоку w_i .

При совместном движении БТВ 1 и ПО 6 реализуется технологическое воздействие орудий и средств обработки на ПО 6. При этом БТВ 1 непрерывно циркулируют по замкнутым рекуррентным траекториям 7, позиции подсистем первого класса – по замкнутым рекуррентным траекториям вращательного движения a_{i2} , а позиции подсистем второго класса – по замкнутым рекуррентным траекториям вращательного движения a_{i3} [7].

В практике проектирования ППТМ встречаются случаи, когда одно загрузочное или разгрузочное устройство не успевает производить загрузку или разгрузку ПО в БТВ ППТМ. Поэтому на ППТМ устанавливается несколько загрузочных и разгрузочных устройств и ПО поступают по нескольким входным потокам $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}$, а выгружаются по нескольким выходным потокам $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}$. В общем случае, число входных потоков может быть не равно числу выходных потоков ПО.

Кроме того, при обработке ПО нескольких номенклатур, в ряде случаев применяются ППТМ с несколькими входными и выходными потоками ПО.

В этих случаях, при синтезе принципиально-структурных моделей ППТМ необходимо учитывать требуемое число входных и выходных потоков ПО и в соответствии с этим задавать число пространственных траекторий относительного движения потоков ПО в ППТМ путем введения соответствующих функциональных зависимостей между элементарными движениями принципиальной кинематической схемы транспортного движения БТВ и ППТМ.

На рисунке 2 приведена принципиально-структурная модель ПВТМ с тремя входными потоками ПО v_{i1}, v_{i2}, v_{i3} и тремя выходными потоками ПО w_{i1}, w_{i2}, w_{i3} . Построение этой принципиально-структурной модели ПВТМ выполняется аналогично принципиально-структурной модели, представленной на рисунке 1. Однако здесь элементарные движения a_{i1} и a_{i2} имеют следующую функциональную зависимость [5]:

$$v_{Tp1} = \frac{k_0 t_1 w_{Tp2}}{2\pi}, \quad (11)$$

где k_0 – число заходов винтовых траекторий ($k_0 = 3$).

В принципиально-структурной модели ПВТМ (рисунок 2), БТВ 1 перемещаются по винтовым траекториям 2 и располагаются осевыми потоками 3. ПО 4 поступают в ПВТМ посредством трех транспортных роторов 5, 6, 7 по входным потокам v_{i1}, v_{i2}, v_{i3} , а выгружаются тремя транспортными роторами 8, 9, 10 по выходным потокам w_{i1}, w_{i2}, w_{i3} . При совместном движении БТВ 1 и ПО 4 реализуется технологическое воздействие орудий и средств обработки на ПО 4. При этом БТВ 1 непрерывно циркулируют по замкнутым рекуррентным траекториям 11, индивидуальным для каждого осевого потока 3.

Принципиально-структурная модель ПСТМ с двумя входными потоками v_{i1}, v_{i2} и двумя выходными потоками w_{i1}, w_{i2} приведена на рисунке 3. Здесь функциональная зависимость элементарных движений и определяется на основании выражений, представленных в работе [6], однако для приведенной принципиально-структурной модели значение $k_0 = 2$. В принципиально-структурной модели, БТВ 1 перемещаются по спиральным траекториям 2 и располагаются радиальными потоками 3. ПО 4 поступают в

ПСТМ посредством двух транспортных роторов 5 и 6 по входным потокам v_{i1} и v_{i2} , а выгружаются двумя транспортными роторами (на рисунке 3 не показаны) по выходным потокам w_{i1} и w_{i2} . Только при совместном движении БТВ 1 и ПО 4 выполняется технологическое воздействие орудий и средств обработки на ПО 4. При этом БТВ 1 также непрерывно циркулируют по замкнутым траекториям 7, индивидуальным для каждого радиального потока 3 [6, 7].

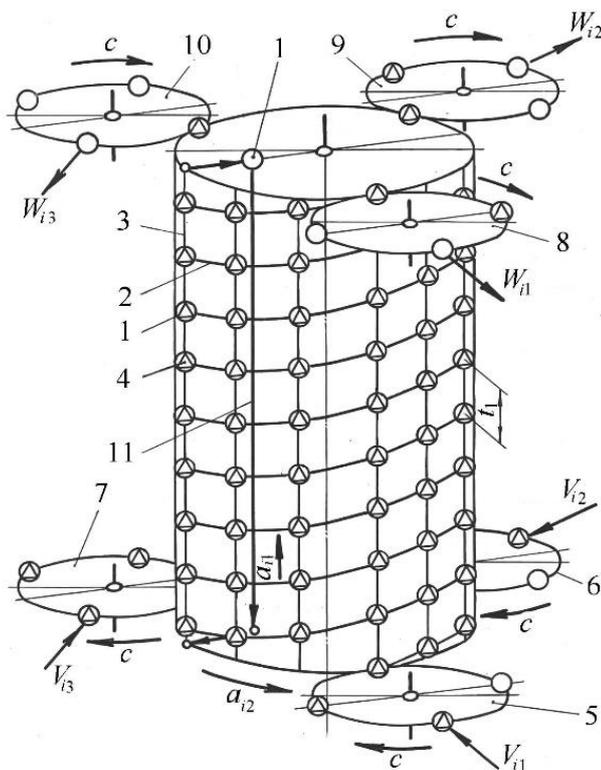


Рисунок 2. Принципиально-структурная модель ПВТМ с тремя входными и выходными потоками ПО

При проектировании ППТМ в ряде случаев возникает проблема решения вопроса загрузки и выгрузки ПО сложной конфигурации. Это связано с тем, что в зоне загрузки и выгрузки ПО, несущие органы и приемники смежных ППТМ совершают сложные транспортные движения. При этом из-за сложной конфигурации ПО и сложной кинематики транспортного движения иногда затрудняется загрузка и выгрузка ПО.

Отметим, что ПО простой формы передаются от предыдущего к последующему ППТМ обычными методами, применяемыми в роторных линиях, например, с помощью транспортных роторов или непосредственно от ППТМ к ППТМ.

Для сложной формы ПО, упрощение процесса загрузки и выгрузки ПО с ППТМ, может быть достигнуто при использовании следующих способов:

1. При поступлении несущих органов или приемников БТВ в зону загрузки или выгрузки ПО с ППТМ производится остановка одного или нескольких элементарных движений принципиальной кинематической схемы ППТМ во всех позициях всех классов подсистем объемно-пространственной структурной модели ППТМ.

2. При поступлении несущих органов или приемников БТВ в зону загрузки или выгрузки ПО с ППТМ производится остановка одного или нескольких элементарных

движений принципиальной кинематической схемы ППТМ во всех позициях подсистем только тех классов объемно-пространственной структурной модели ППТМ, которые находятся в зонах загрузки или выгрузки ПО.

3. При поступлении несущих органов или приемников БТВ в зону загрузки или выгрузки ПО с ППТМ производится остановка одного или нескольких элементарных движений принципиальной кинематической схемы ППТМ в одной позиции подсистем только тех классов объемно-пространственной структурной модели, которые находятся в зонах загрузки и выгрузки ПО [7].

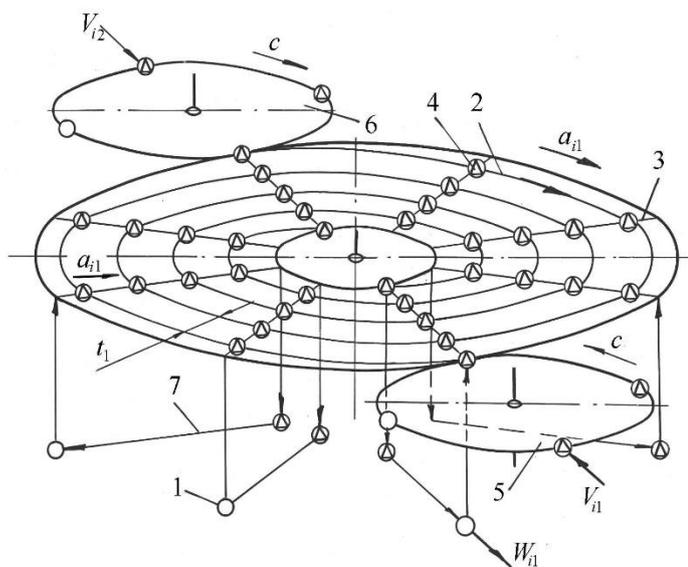


Рисунок 3. Принципиально-структурная модель ПСТМ с двумя входными и выходными потоками ПО

Такие граничные решения позволяют упростить процесс загрузки и выгрузки ПО сложной формы за счет упрощения кинематики сложной структуры принципиальной кинематической схемы транспортного движения ППТМ в зонах загрузки и выгрузки ПО. При этом в зоне загрузки и выгрузки ПО может присутствовать только одно элементарное прямолинейное или вращательное движение, используемое в роторных или роторно-конвейерных машинах. Поэтому процесс загрузки и выгрузки ПО в ППТМ, выполняемый в соответствии с предложенными техническими решениями, ведется аналогично роторной или роторно-конвейерной загрузке и выгрузке ПО. Это значительно упрощает процесс загрузки и выгрузки ПО с ППТМ и резко расширяет их технологические возможности.

Однако заметим, что при загрузке и выгрузке ПО с ППТМ по первому варианту присутствует большая неравномерность движений. Это можно проследить на примере принципиально-структурной модели ПВТМ, представленной на рисунке 4, а. Принципиальная кинематическая схема это ПВТМ состоит из двух элементарных движений a_{i1} и a_{i2} причем вращательное движение a_{i2} выполняется непрерывно, а осевое прямолинейное движение реализуется с остановками в зонах $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{v_{i2}}$. Это приводит к значительным динамическим колебаниям БТВ 1 и перемещению их по ломаной винтовой траектории 2, что в ряде случаев может ограничивать применение этого способа на практике.

По второму способу загрузки и выгрузки ПО с ППТМ обеспечивается улучшение кинематических параметров ППТМ, так как в этом случае снижаются динамические колебания за счет более равномерных параметров кинематических движений. Это связано с тем, что остановка одного или нескольких движений выполняется только в зоне загрузки или выгрузки ПО [5, 7].

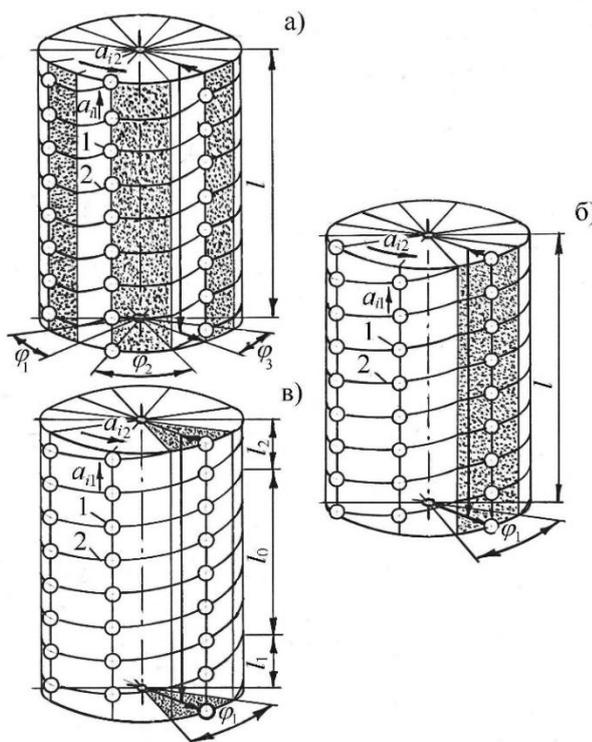


Рисунок 4. Варианты принципиально-структурных моделей ПВТМ с различными схемами кинематики осевого движения: а – с несколькими остановками за один полный оборот, б – с одной остановкой за один полный оборот, в – с нестационарным движением по границам

На рисунке 4, б представлена принципиально-структурная модель ПВТМ, в которой за один полный кинематический цикл вращательного движения a_{i2} , прямолинейное осевое движение останавливается в одной зоне φ_1 по углу поворота модуля. При этом БТВ 1 перемещается по винтовой траектории 2, более равномерной, чем на рисунке 4а. Такой способ загрузки и выгрузки используется в ППТМ для обработки зубчатых изделий.

Наиболее приемлемым с точки зрения снижения динамических колебаний ППТМ и увеличения их производительности является третий способ. Этот способ реализуется за счет нестационарности движения потоков подсистем одного или нескольких классов у зон загрузки и выгрузки ПО. На рисунке 4, в вращательное движение a_{i2} выполняется непрерывно, а движение a_{i1} стационарно только на участке l_0 , на участке l_1 оно изменяется от нуля до значения на участке l_0 , а на участке l_2 изменяется от значения которое на участке l_0 до нуля. Таким образом, в зонах загрузки и выгрузки ПО по углу φ_1 прямолинейное движение a_{i1} равно нулю. Поэтому здесь присутствует только вращение и ПО сложной конфигурации легко загружается и выгружаются транспортными роторами [7].

3. Заключение

В представленной работе разработана методика синтеза принципиально-структурных моделей, в основу которой положена операция декомпозиции объемно-пространственной структурной модели и принципиальной кинематической схемы на элементарные структуры и движения, затем объединения соответствующих элементарных структур и движений в упорядоченные пары и далее объединения этих упорядоченных пар (кортежей) в общую принципиально-структурную модель ППТМ. С помощью таких процедур можно создавать любые типы принципиально-структурных моделей ППТМ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бурчаков, Ш. А. Технология машиностроения: учебное пособие. - Москва Инфра-Инженерия, 2023. - 320 с
2. Левшин Г. Е. Основы технологии машиностроения: учебное пособие / Г. Е. Левшин. - Москва: Инфра-Инженерия, 2022. - 216 с.
3. Скворцов В. Ф. Основы технологии машиностроения: учебное пособие / – Томск: Изд-во Томского политехнического университета – 2013. – 350 с.
4. Безъязычный В. Ф. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 2013. — 568 с.: ил.
5. Михайлов А. Н. Основы синтеза поточно-пространственных технологических систем непрерывного действия. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 379 с.
6. Михайлов А. Н. Основы проектирования и автоматизации производственных процессов на базе технологий непрерывного действия. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 421 с.
7. Михайлов, А. Н. Структура маршрутов и закономерности движений изделий в поточно-пространственных технологических системах // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 1998. – № 3. – С. 64–79.

Поступила в редколлегию 20.05.2025 г.

А. В. Звягинцева, канд. техн. наук, **С. В. Долженков**, **В. В. Кульнева**
Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия
Тел./Факс: 8 107 950 7501062; E-mail: zvygincevaav@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ИЗ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Представлена методика исследования тонкопленочных материалов, включающая спектрофотометрию и обработку спектров пропускания. Экспериментально изучены оптические свойства пленок оксида олова, полученных спрей-пиролизом при различных температурах (200–400 °С) и разном количестве слоев (20–100). По измеренным спектрам пропускания определена ширина запрещенной зоны.

Ключевые слова: *слои, оксид олова, прибор измерения, подложка, оптические свойства.*

A. V. Zvyagintseva, S. V. Dolzhenkov, V. V. Kulneva

APPLICATION OF THIN METAL OXIDE FILMS

A technique for studying thin-film materials is presented, including spectrophotometry and the processing of transmission spectra. The optical properties of tin oxide films obtained by spray pyrolysis at various temperatures (200–400 °C) and with different numbers of layers (20–100) have been experimentally studied. The band gap width was determined from the measured transmission spectra.

Keywords: *layers, tin oxide, measuring device, substrate, optical properties.*

1. Введение

Тонкие пленки на основе оксидов металлов находят широкое применение в устройствах микроэлектроники и фотовольтаики благодаря своим уникальным электрическим и оптическим свойствам. Особый интерес среди них представляет оксид олова (SnO_2) – широкозонный полупроводник n-типа, используемый в прозрачных электродах, газовых сенсорах и элементах солнечной энергетики. Современные исследования направлены на контролируемое изменение свойств таких пленок за счет выбора метода синтеза, варьирования температуры осаждения, толщины и состава.

Одними из самых доступных считаются жидкостные методы, такие как золь-гель технология и спрей-пиролиз, которые не требуют сложного специализированного вакуумного оборудования и позволяют получать покрытия на больших площадях при относительно низких затратах. В работах [1-7] рассматриваются различные аспекты синтеза и исследования свойств металлооксидных пленок, полученных жидкофазными методами.

Несмотря на имеющиеся достижения, оптические свойства пленок оксида олова, сформированных методом спрей-пиролиза, требуют дальнейшего изучения в зависимости от технологических параметров – температуры подложки и количества нанесенных слоев. В связи с этим целью данной работы является исследование оптических свойств тонких пленок оксида олова, полученных спрей-пиролизом из золь-гель раствора при различных температурах (200–400 °С) и с разным количеством слоев (20–100). Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Получение образцов пленок SnO_2 методом спрей-пиролиза при варьировании температуры подложки и числа слоев.
2. Измерение спектров оптического пропускания полученных пленок в видимом диапазоне с помощью спектрофотометра.
3. Определение ширины запрещенной зоны на основе анализа спектральных зависимостей коэффициента поглощения.

2. Основное содержание и результаты работы

Измерения уровня пропускания света полученных оксидных пленок выполнялись на спектрофотометре модели СПЕКС ССП-715-М производства АО «ЛОМО» (Санкт-Петербург). Функционирование данного прибора базируется на явлении избирательного спектрального поглощения при прохождении света через образцы, находящиеся в твердой или жидкой фазе. Прибор сопрягается с персональным компьютером, управление осуществляется с помощью внешнего программного комплекса «УФ-ВИД СПЕКС».

Объектами исследования выступили пленки оксида олова, сформированные методом спрей-пиролиза из золь-гель раствора. Процесс проводился при температурах подложки 200 и 400°C с вариацией числа слоев (20, 40, 60, 80, 100).

Порядок проведения эксперимента был следующим. Исходным материалом (прекурсором) служил дигидрат хлорида олова ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) с концентрацией 0,5 М, растворенным веществом выступал изопропиловый спирт. Приготовленный состав подвергался перемешиванию в течение одного часа, после чего выдерживался 24 часа.

Напыление SnO_2 осуществлялось с использованием раствора, подготовленного для золь-гель технологии, методом спрей-пиролиза (СПГЗ). Рабочий раствор помещался в резервуар автоматизированной напылительной системы УСП-3. Рабочее давление поддерживалось на уровне 3 бар. Формировалось различное число слоев (20, 40, 100) с паузой в 30 секунд после каждых 10 слоев для возврата нагревательного элемента к заданной температуре. Температура нагревателя фиксировалась на отметках 400 С (серия А) и 200°C (серия Б). Распылитель находился на расстоянии 400 мм от подложки. В качестве подложечного материала применялось стекло.

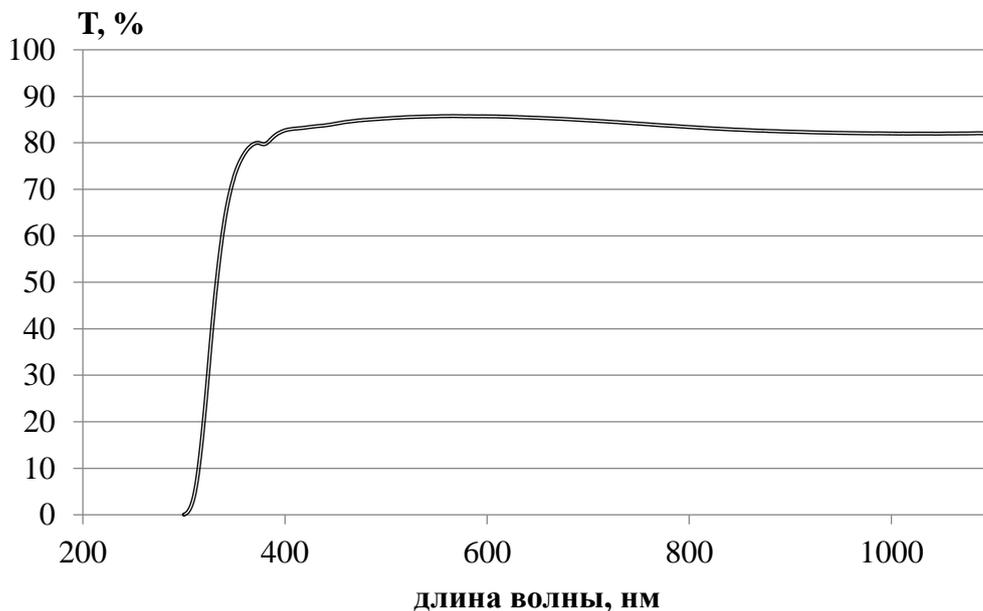


Рисунок 1. Спектры оптического пропускания пленок оксида олова, изготовленных при температуре 200 °С

Для создания тонких слоев SnO_2 применялся золь-гель состав на базе хлорида олова ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (0,5 М) и изопропилового спирта ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$). Компоненты смешивались при комнатной температуре с использованием магнитной мешалки на протяжении

1 часа, затем раствор выдерживался 24 часа.

Нанесение составов производилось на стандартные предметные стекла (размер 26×76×1 мм, ГОСТ 9284-75), предварительно прошедшие очистку в ультразвуковой ванне с применением дистиллированной воды и изопропилового спирта.

Прогрев стеклянной основы выполнялся с помощью инфракрасного (ИК) керамического нагревателя габаритами 245×60 мм. Стекло размещалось по центру вдоль нагревательной панели для обеспечения равномерности нагрева. Для генерации аэрозоля использовался аэрограф ОРНІR АС004А (диаметр сопла – 0,3 мм), воздух подавался безмасляным поршневым компрессором АS186. В процессе напыления давление составляло 3 бар, расстояние от сопла до подложки равнялось 400 мм.

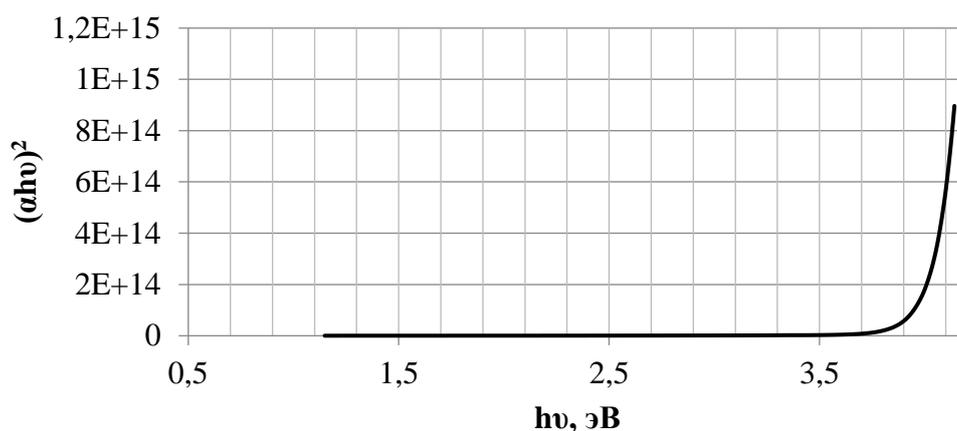


Рисунок 2. Спектр поглощения пленки оксида олова в координатах $(\alpha hv)^2 = f(hv)$, изготовленных при температуре 200 °С

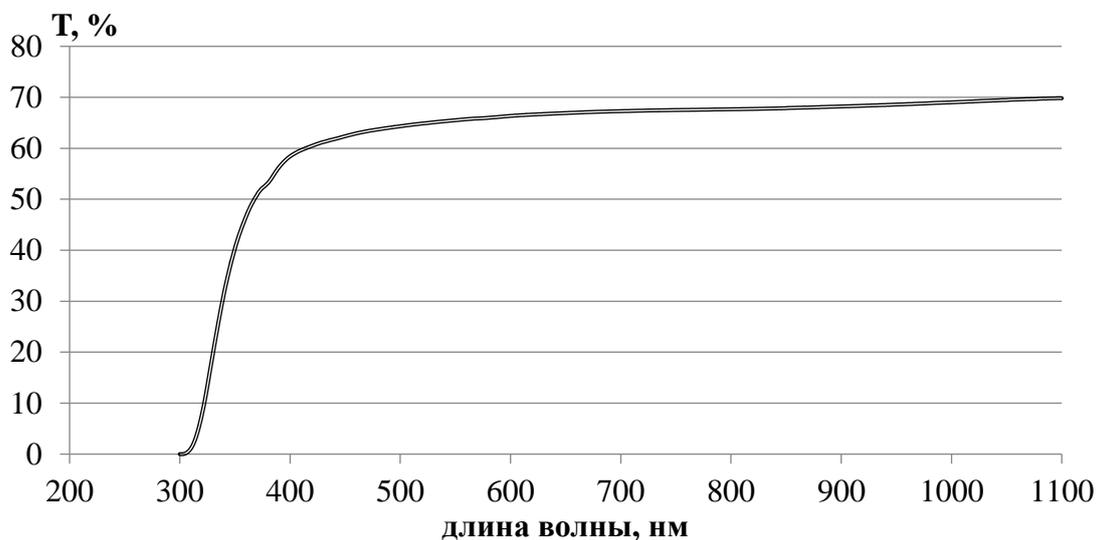


Рисунок 3. Спектры оптического пропускания пленок оксида олова, изготовленной при температуре 300 °С

Технологией было предусмотрено, что после каждого десятого слоя делается 30-секундная пауза для закрепления нанесенного материала и восстановления температур-

ного режима нагревателя. Контроль температуры поверхности выполнялся пирометром HoldPeak hp-1500. Осаждение пленок велось при температурах 200, 300 и 400°C.

Анализ оптических характеристик выполнялся на спектрофотометре СПЕКС ССП-715-М (АО «ЛОМО»). Установлено, что в видимой области спектра пленки характеризуются прозрачностью на уровне $T = 60\text{--}80\%$. Был вычислен коэффициент поглощения, а путем перестроения спектральной зависимости в координатах $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ определена ширина запрещенной зоны.

Полученные оптические данные для температур 200, 300 и 400°C отражены на рисунках 1–7. Значения ширины запрещенной зоны составили: для температуры 200 С – 3,96 эВ, для 300 С – 3,98 эВ, для 400 С – 3,98 эВ.

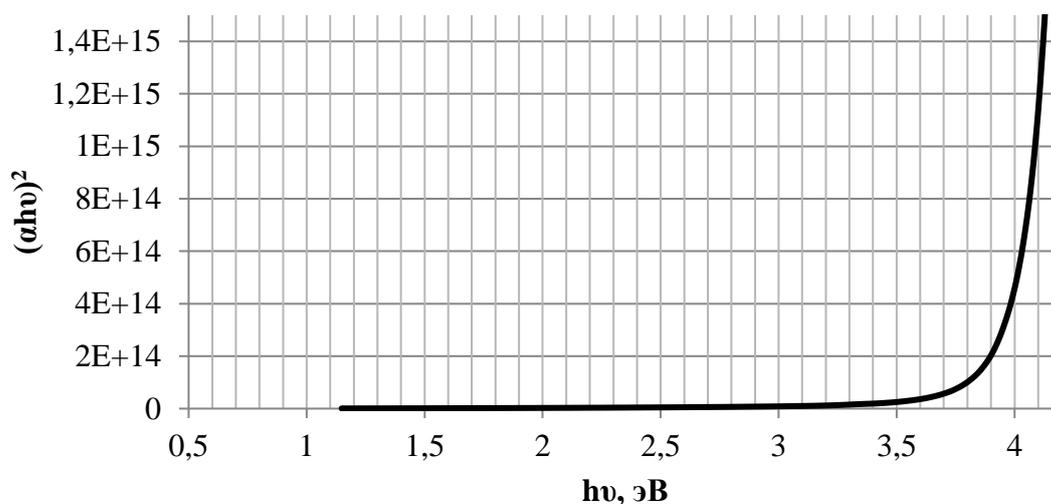


Рисунок 4. Спектр поглощения пленки оксида олова в координатах $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$, изготовленной при температуре 300 °С

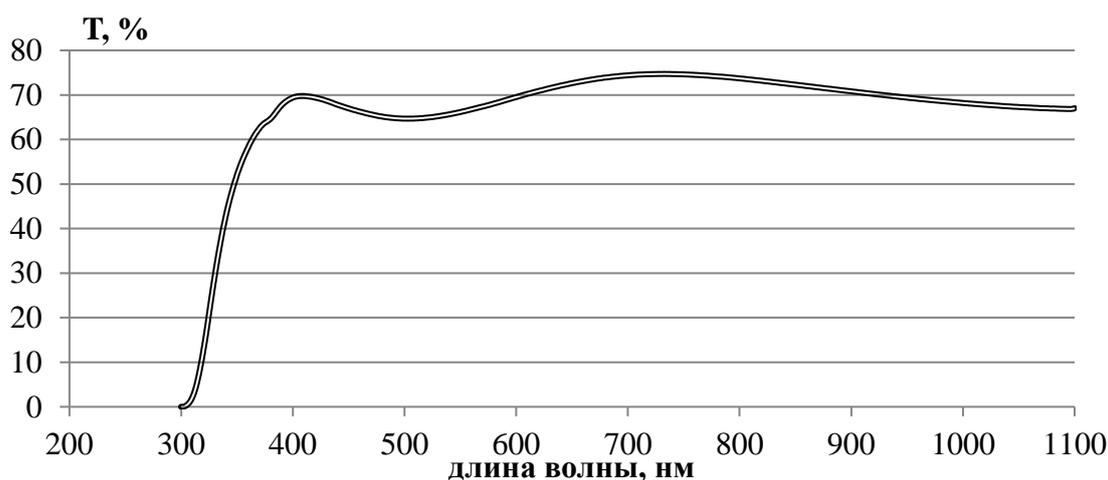


Рисунок 5. Спектры оптического пропускания пленки оксида олова, изготовленной при температуре 400 °С

Анализ оптических характеристик пленок диоксида олова проводился по таким параметрам, как уровень светопропускания в видимой области спектра и рассчитанная

ширина запрещенной зоны [1-7]. В результате установлено, что прозрачность образцов варьируется в пределах $T = 60-90 \%$. Наилучшие показатели прозрачности, достигающие $80-85 \%$, фиксируются у слоев оксида олова, сформированных при температуре $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

График зависимости края полосы поглощения, соответствующей прямым межзонным переходам, от энергии световых квантов представлен на рисунке 7. Выполненные расчеты позволяют оценить ширину запрещенной зоны в интервале $3,93-3,97 \text{ эВ}$.

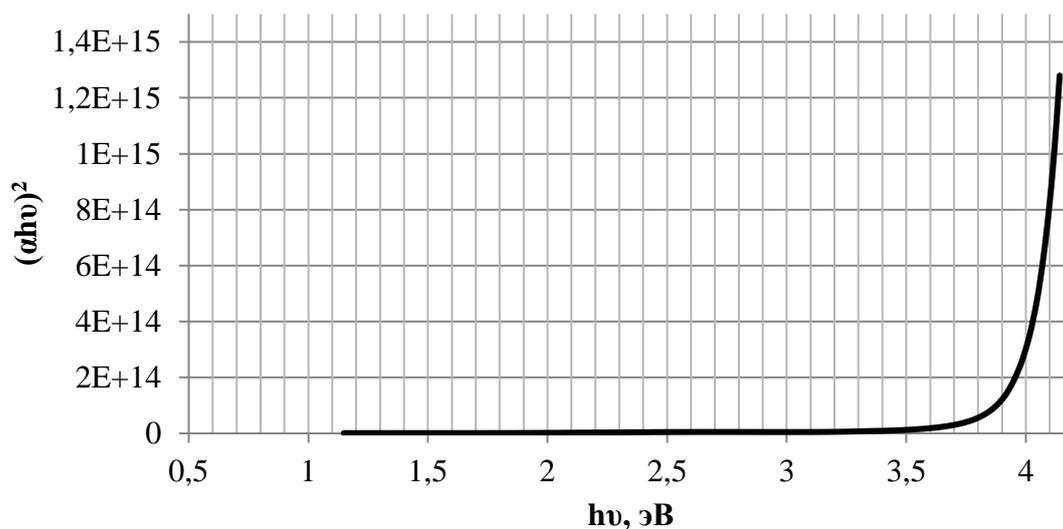


Рисунок 6. Спектр поглощения пленки оксида олова в координатах $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$, изготовленной при температуре $400 \text{ }^\circ\text{C}$

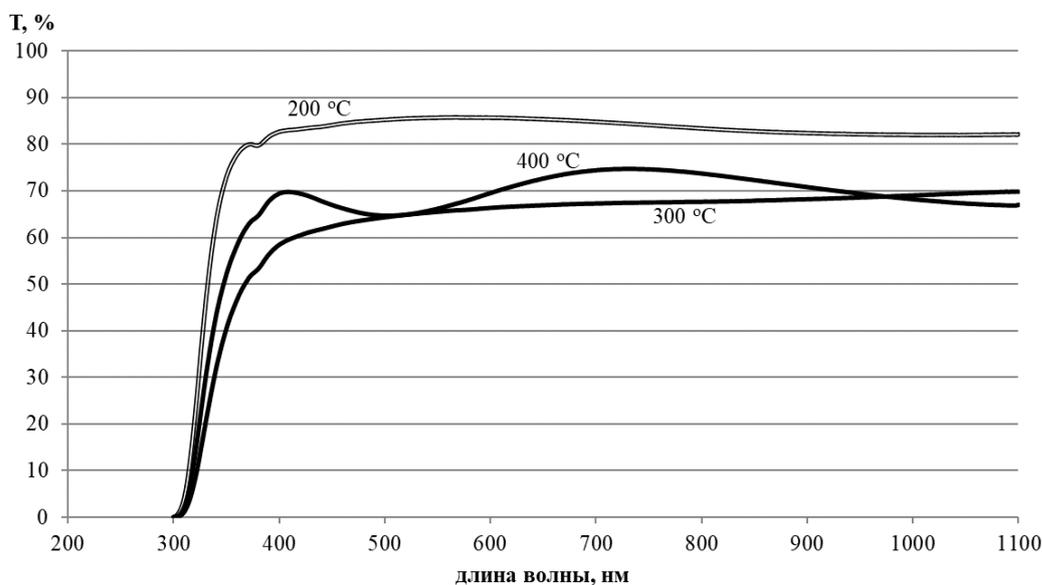


Рисунок 7. Спектры оптического пропускания пленок оксида олова

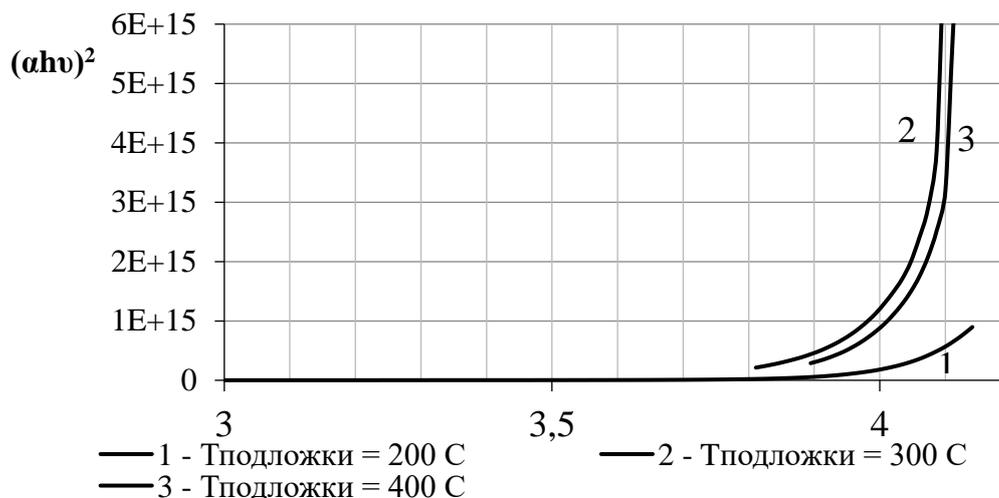


Рисунок 8. Спектр поглощения пленки оксида олова в координатах $(\alpha hv)^2 = f(hv)$

5. Заключение

Установлено, что прозрачность исследуемых образцов в видимой области спектра находится в диапазоне $T = 60\text{--}80\%$. В ходе обработки экспериментальных данных вычислен коэффициент поглощения; путем перестроения спектральных зависимостей в координатах $(\alpha hv)^2 = f(hv)$ была определена ширина запрещенной зоны для серии образцов с варьируемым количеством нанесенных слоев.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рипан, Р. Неорганическая химия. Химия металлов / Р. Рипан, И. Четяну. -М.: Мир, 1971. -Т. 1. -561 с.
2. Лысак, Г. В. Микроволновый синтез нанокристаллов SnO₂ на поверхности тонковолокнистого полимерного материала / Г. В. Лысак, И. А. Лысак, Т. Д. Малиновская, Г. Г. Волокитин // Неорганические материалы. – М.: 2010. - Т. 46, №2. - С.223 - 226.
3. Poshelyuzhnaya, M. A. The size-controllable, one-step synthesis and characterization of gold nanoparticles protected by synthetic humic substances / M. A. Poshelyuzhnaya, V. A. Litvin, R. L. Galagan, B. F. Minaev //Materials Chemistry and Physics. - 2014. – pp. 168-178.
4. Музгин, В. Н. Аналитическая химия ванадия / В. Н. Музгин, Л. Б. Хамзина, В. Л. Золотавин. - М.: Наука, 1981. – 216 с. – Текст: непосредственный.
5. Жарова, Ю. А. Оптические и структурные свойства наноструктур / Ю. А. Жарова, В. А. Толмачев, С. И. Павлов // Физика и техника полупроводников. –СПб:- 2019.- Вып. 3. С. 576 – 582.
6. Kolasinski, K. W. In: Porous Silicon: From Formation to Application. Formation and Properties, ed. by G. Korotcenkov / K. W. Kolasinski. // London–N.Y., Taylor and Francis Group, LLC. - 2016. - Vol. 1. - P. 291. – Текст: непосредственный.
7. Долженков, С. В., Звягинцева А. В., Меньшикова Т. Г. Совершенствование системы разварки контактов в случае изготовления интегральных микросхем / С. В. Долженков, А. В. Звягинцева, Т. Г. Меньшикова // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 20. № 4. 2024. С. 155-165.

Поступила в редколлегию 22.05.2025 г.

УДК 621.9.06-52

Д. О. Киселица, аспирант, А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» г. Донецк, ДНР,
Россия
Тел./Факс: +7 (949) 460 92 90, E-mail: D_mitriy2404@mail.ru

ЦИКЛОВАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПОТОЧНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

В статье рассматриваются вопросы определения цикловой производительности поточно-пространственных технологических систем (ППТС) непрерывного действия. Показано, что цикловая производительность однозначно определяется структурой базовых технологических воздействий и временем полного кинематического цикла, включающего основное и вспомогательное время. Получены обобщённые аналитические зависимости для расчёта цикловой производительности поточно-пространственных технологических модулей (ППТМ) с мультипликативной и мультипликативно-аддитивной композицией базовых технологических воздействий при открытых и закрытых структурах аддитивной части. Проанализировано влияние структурных параметров, основного и вспомогательного времени на уровень цикловой производительности и коэффициент использования полного кинематического цикла. Выявлены основные резервы повышения производительности на уровне структурных решений, обеспечивающие интенсификацию технологических процессов при проектировании ППТС высокой и сверхвысокой производительности.

Ключевые слова: цикловая производительность, поточно-пространственная технологическая система, основное время, вспомогательное время, коэффициент производительности, структурная модель.

D. O. Kiselitsa, A. N. Mikhailov

CYCLICAL PRODUCTIVITY AND RESERVES FOR INCREASING THE PRODUCTIVITY OF CONTINUOUS FLOW SPATIAL TECHNOLOGICAL SYSTEMS

The article discusses issues related to determining the cycle productivity of production flow technological systems (PFTS) based on rotary and rotary conveyor machines. It is shown that cycle productivity is unambiguously determined by the structure of basic technological actions and the time of a complete kinematic cycle, including main and auxiliary time. Generalized analytical dependencies have been obtained for calculating the cycle productivity of PPTM with a multiplicative and multiplicative-additive composition of basic technological influences for open and closed structures of the additive part. The influence of structural parameters, main and auxiliary time on the level of cycle productivity and the coefficient of utilisation of the complete kinematic cycle is analysed. The main reserves for increasing productivity at the level of structural solutions that ensure the intensification of technological processes in the design of high - and ultra-high-performance PPTS have been identified.

Keywords: cycle productivity, flow-space technological system, main time, auxiliary time, productivity coefficient, structural model.

1. Введение

Большие возможности в решении проблемы интенсификации и автоматизации производственных процессов обеспечивает применение технологических систем непрерывного действия, выполненных на базе роторных и роторно-конвейерных машин, а также поточно-пространственных технологических систем (ППТС) и поточно-пространственных технологических модулей (ППТМ). Теория и практика создания этих машин позволила во многом снять остроту этой проблемы для массового производства изделий относительно мелких размеров и обрабатываемых по сравнительно простым технологиям [1, 2]. Кроме того, этот опыт является основой для дальнейшего развития исследований в этом направлении и совершенствования методов проектиро-

вания технологических систем, способных охватить более широкий класс изделий и пригодных для реализации сложных технологических процессов [3, 4].

Целью работы является исследование влияния структурных параметров и временных характеристик полного кинематического цикла на цикловую производительность ППТМ и выявление резервов повышения производительности ППТС на этапе структурного проектирования.

2. Общая часть работы

Проектирование ППТС всегда базируется на структуре технологического процесса. В процессе проектирования технологической системы, еще не имея структуры ППТС можно определить ее технологическую производительность в зависимости от мощности множества единичных технологических зон и основного (рабочего) времени технологического воздействия орудий и средств обработки на ПО [5, 6].

Вместе с тем, создаваемой ППТС полный кинематический цикл включает в себя не только затраты времени на технологическое воздействие орудий и средств обработки на ПО, но и вспомогательное время на зажим и разжим ПО в БТВ, подвод и отвод инструментов к ПО [2]. В этом случае, время полного кинематического цикла (рабочего цикла) будет следующее [3]:

$$T_{ци} = T_{oi} + T_{vi} \quad (1)$$

где $T_{ци}$ – время полного кинематического цикла i -го ППТМ.

При этом время кинематического цикла и структура БТВ в ППТМ однозначно определяет цикловую производительность.

Цикловая производительность характеризует выпуск ПО в ППТС в условиях бесперебойной ее работы с заданной функциональной структурой и обычно определяется на стадии проектирования.

Общее уравнение для определения цикловой производительности ППТМ с мультипликативной композицией БТВ [6], имеет следующий вид:

$$P_{ци} = \frac{\prod_{k=1}^p v_{ik}}{T_{ци}} = \frac{\prod_{k=1}^p v_{ik}}{T_{oi} + T_{vi}}, \quad (2)$$

где $P_{ци}$ – цикловая производительность i -го ППТМ.

Анализируя выражение (2) можно отметить, что на повышение цикловой производительности влияют следующие факторы:

1. Увеличение порядка (числа позиций) v_{ik} всех классов подсистем.
2. Увеличение количества классов P подсистем.
3. Уменьшение времени полного кинематического цикла $T_{ци}$.

Здесь, изменение первых двух факторов влияют на структуру ППТМ, а изменение третьего фактора приводит к интенсификации процесса обработки и функционирования ППТМ [6].

На рисунке 1 приведена зависимость цикловой производительности от времени полного кинематического цикла ППТМ. Графики представлены для ППТМ со следующими функционально-структурными моделями [5]:

1. $Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i3}=1}^4 \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^{10} \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{100} y_{i(\eta_{i3}, \eta_{i2}, \eta_{i1})}$,
2. $Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i3}=1}^3 \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^{10} \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{50} y_{i(\eta_{i3}, \eta_{i2}, \eta_{i1})}$,
3. $Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^8 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{100} y_{i(\eta_{i2}, \eta_{i1})}$,
4. $Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^5 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{50} y_{i(\eta_{i2}, \eta_{i1})}$.

Кроме того, рост цикловой производительности возможен за счет изменения структуры полного кинематического цикла. Здесь за счет уменьшения вспомогательного времени производится увеличение цикловой производительности. Зависимость цикловой производительности ППТМ от вспомогательного времени приведена на рисунке 2 [5, 6].

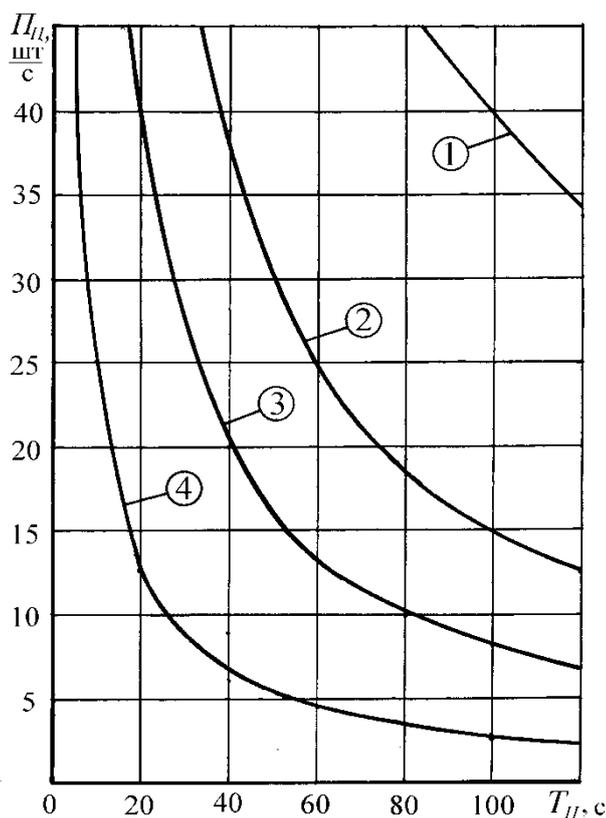


Рисунок 1. Зависимость цикловой производительности от времени полного кинематического цикла ППТМ для различных вариантов структурных решений

График 1 представлен для $T_{oi} = 10$ с; графики 2, 4, 6, 7 – для $T_{oi} = 20$ с; графики 3, 5 – для $T_{oi} = 40$ с; При этом графики 1, 2, 3 представлены для ППТМ со следующей структурой:

$$Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i3}=1}^4 \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^6 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{100} y_{i(\eta_{i3}, \eta_{i2}, \eta_{i1})}$$

Графики 4, 5 составлены для функционально-структурной модели:

$$Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i3}=1}^4 \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^6 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{50} y_{i(\eta_{i3}, \eta_{i2}, \eta_{i1})}$$

График 6 представлен для следующей функционально-структурной модели:

$$Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^6 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{100} y_{i(\eta_{i2}, \eta_{i1})}$$

График 7 приведен для функционально-структурной модели:

$$Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^6 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{50} y_{i(\eta_{i2}, \eta_{i1})}$$

Следуя основным положениям теории производительности, анализ технологи-

ческого потенциала производительности ППТС следует осуществлять по коэффициенту производительности [5]:

$$\eta_i = \frac{\Pi_{Цi}}{\Pi_{Oi}}, \tag{7}$$

где η_i – коэффициент производительности i -го ППТМ;

Π_{Oi} – технологическая производительность i -го ППТМ или цикловая производительность при T_{Bi} близком или равном нулю.

Здесь:

$$\Pi_{Oi} = \frac{\prod_{k=1}^p v_{ik}}{T_{Oi}}. \tag{8}$$

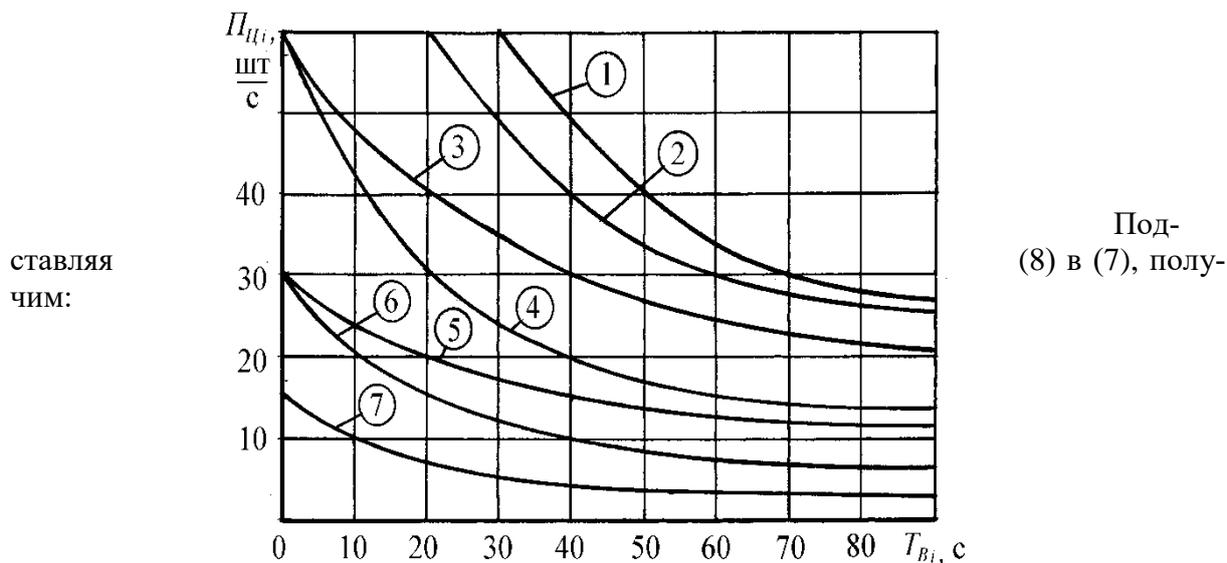


Рисунок 2. Зависимость цикловой производительности ППТМ от вспомогательного времени

$$\eta_i = \frac{T_{Oi}}{T_{Oi} + T_{Bi}} = \frac{1}{\varepsilon_i}, \tag{9}$$

где ε_i – коэффициент, характеризующий степени использования полного кинематического цикла i -го ППТМ.

Результаты расчетов коэффициента производительности в зависимости от основного времени рабочих ходов инструментов представлены на рисунке 3 для различных значений вспомогательного времени.

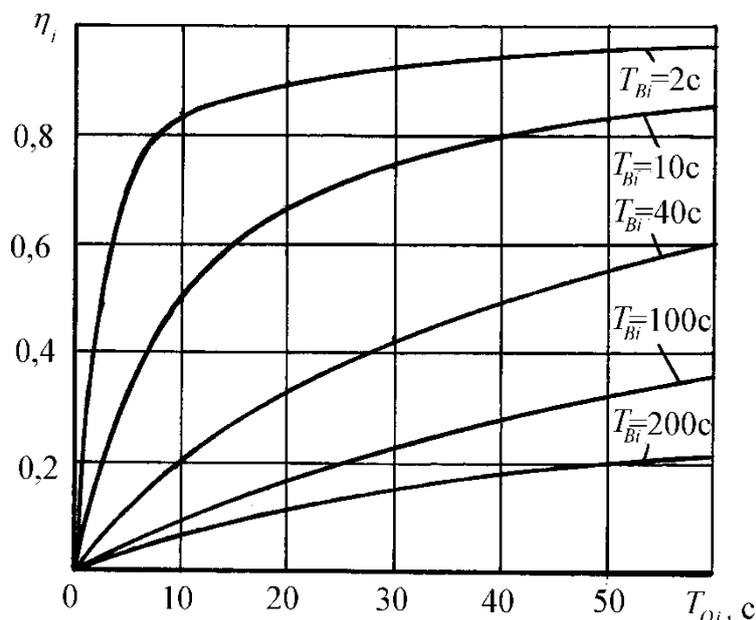


Рисунок 3. Влияние основного времени на коэффициент производительности

Продлав соответствующие преобразования в выражении и используя формулы (8) и (7), уравнение для определения цикловой производительности можно представить следующим образом [5]:

$$P_{Ци} = \frac{\prod_{k=1}^P v_{ik}}{T_{O_i}} \eta_i = \frac{\prod_{k=1}^P v_{ik}}{T_{O_i} \varepsilon_i}. \tag{10}$$

Следует иметь ввиду, что технологическая и цикловая производительности равны между собой и являются теоретической производительностью, которые определяются на соответствующий этапах проектирования ППТС. При этом технологическая производительность находится на этапе проектирования технологического процесса для ППТС, а цикловая производительность определяется непосредственно на этапе создания структуры и конструктивной реализации ППТС.

Любой ППТМ с мультипликативно-аддитивной композицией БТВ может иметь открытую или закрытую структуру аддитивной части ППТМ. В открытой структуре аддитивной части ППТМ ПО непрерывно подаются и перемещаются от элемента к элементу с одинаковым циклом $T_{Ци\eta_i}$.

В закрытой структуре аддитивной части ППТМ ПО подаются после того, как предыдущие ПО полностью пройдет все элементы аддитивной части структуры ППТМ.

Цикловая производительность ППТМ с мультипликативно-аддитивной композицией блоков технологического воздействия (БТВ) при открытой структуре аддитивной части, определяется по формуле [6]:

$$P_{\text{ц}} = \frac{\prod_{k=2}^p v_{ik}}{T_{\text{ц}\eta_{i1}}} = \frac{\prod_{k=2}^p v_{ik}}{T_{\text{он}_{i1}} + T_{\text{вн}_{i1}}}, \quad (11)$$

где $T_{\text{он}_{i1}}$ – время рабочих ходов инструментов в БТВ или основное время технологического воздействия;

$T_{\text{вн}_{i1}}$ – время холостых ходов инструментов в БТВ или вспомогательное время.

Для других структурных моделей ППТМ с мультипликативно-аддитивной композицией БТВ, являющихся промежуточными вариантами функционально-структурных моделей (5) и (3), цикловая производительность определяется аналогично приведенным выше рассуждениям.

Следует отметить, что при проектировании ППТМ с мультипликативно-аддитивной композицией БТВ обычно используется закрытая структура аддитивной части [4, 6].

3. Заключение

Проведенные исследования направлены на создание ППТС, предназначенных для реализации технологических процессов высокой и сверхвысокой производительности с объемно-пространственной структурой, являются вторым этапом проектирования ППТС и позволяют перейти к последующим этапам проектирования ППТС на более высоких уровнях абстрагирования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. Антимонов, А. М. Основы технологии машиностроения: учебник /.— Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017.— 176 с.
3. Копылов, Ю. Р. Технология машиностроения: учебное пособие для вузов /.— 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2024. — 252 с.
4. Погонин, А. А. Технология машиностроения: учебник / А. А. Погонин, А. А. Афанасьев, И. В. Шрубченко. — 3-е изд., доп. — Москва: ИНФРА-М, 2022. — 530 с.
5. Михайлов, А. Н. Структура маршрутов и закономерности движений изделий в поточно-пространственных технологических системах. / А.Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. - Донецк: ДонГТУ, 1998. Вып. 3. С.64-79.
6. Михайлов, А. Н. Основы синтеза поточно-пространственных технологических систем непрерывного действия / - Донецк: Технополис, 2002. - 379 с.

Поступила в редколлегию 20.05.2025 г.

УДК 621.85.05-034

Н. В. Михайлов, магистрант, **А. М. Лахин**, канд. техн. наук, доцент
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, Россия
Тел./Факс: +7 949 382 23 85; E-mail: tirex_nic@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ПО ПЯТНУ КОНТАКТА ЗУБЬЕВ МУФТЫ ПРИ БЛИЗКИХ РАДИУСАХ КРИВИЗНЫ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ ПЕРЕКОСОВ ОСЕЙ ВАЛОВ

В работе рассмотрены особенности распределения нагрузки по пятну контакта зубьев муфты в условиях отсутствия перекосов осей валов. Представлена методика расчета распределения нагрузки по пятну контакта зубьев муфты при близких радиусах кривизны эвольвентных профилей с учетом угла контактирования и изгибной деформации.

Ключевые слова: зубчатая муфта, распределение нагрузки, пятно контакта, эвольвентный профиль, радиус кривизны, угол контактирования, внутреннее зацепление.

N. V. Mikhailov, A. M. Lakhin

FEATURES OF LOAD DISTRIBUTION OVER THE CONTACT PATCH OF COUPLING TEETH AT CLOSE RADIUS OF CURVATURE OF INVOLUTE PROFILES UNDER CONDITIONS OF ABSENCE OF AXIS MISALIGNMENT

The paper considers the features of load distribution over the contact patch of the coupling teeth in the conditions of absence of shaft axes misalignment. The technique of calculation of load distribution over the contact patch of the coupling teeth at close radii of curvature of involute profiles is presented, taking into account the contact angle and bending deformation.

Keywords: gear coupling, load distribution, contact patch, involute profile, radius of curvature, contact angle, internal gearing.

1. Введение

Зубчатые муфты являются одними из наиболее распространенных элементов трансмиссий технологического оборудования, что обусловлено их высокой нагрузочной способностью, компактностью и способностью компенсировать несоосность соединяемых валов. Однако практика эксплуатации показывает, что именно зубчатые муфты часто выступают «слабым звеном» в кинематических цепях машин. Статистика отказов свидетельствует, что до 80% выходов из строя зубчатых муфт связано с контактными разрушениями и интенсивным износом рабочих поверхностей зубьев, вызванными неравномерным распределением нагрузки по пятну контакта.

Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что существующие инженерные методы расчета зубчатых муфт базируются преимущественно на классической теории Герца, которая предполагает, что размеры площадки контакта малы по сравнению с размерами взаимодействующих тел. С увеличением напряженности работы зубчатых муфт несостоятельность привычных методов их расчета сказывается все более резко. Это связано прежде всего с тем, что при определении концентрации нагрузки на пятне контакта зуба не учитывается, что контактирующие поверхности зубьев имеют близкие радиусы кривизны эвольвентных профилей из-за наличия между ними небольших углов контактирования β до 0,01 рад.

Целью данной работы является разработка методики расчета концентрации нагрузки на пятне контакта внутреннего зацепления зубьев, что позволяет учесть особенности их взаимодействия и произвести расчет неравномерности распределения нагрузки на пятне их контакта в условиях внутреннего зацепления зубьев при близких радиусах

кривизны эвольвентных профилей с учетом влияния эксплуатационных и технологических факторов.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи:

1. Исследовать влияние угла контактирования β на распределение нагрузки по пятну контакта зубьев с прямолинейными образующими, взаимодействующих без перекоса

2. Разработать методику расчета концентрации нагрузки, основанную на замене эвольвентных профилей цилиндрами с близкими радиусами кривизны.

3. Представить эпюр распределения нагрузки по пятну контакта зуба втулки с прямолинейной образующей, взаимодействующего с зубом обоймы без перекоса.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Основное содержание и результаты работы

В связи с тем, что радиусы кривизны эвольвентных профилей близки, по высоте зубьев, взаимодействующих без перекоса, принято допущение, что нагрузка распределена в соответствии с контактной задачей И. Я. Штаермана о сжатии упругих тел, радиусы которых почти равны [1]. Кроме того, согласно методу отображения, приняты дополнительные допущения о распределении нагрузки на пятне контакта зуба муфты [2].

Предположим, что между эвольвентными профилями пары зубьев муфты с прямолинейными образующими, взаимодействующих без перекоса, имеется угол контактирования β (рисунок 1, а), возникающий из-за погрешностей их изготовления и радиальных смещений осей втулки относительно обоймы. При приложении к муфте нагрузки он уменьшается до угла β_d вследствие изгибной деформации зубьев. Ввиду того, что взаимодействие пары зубьев реализуется по вершине зуба обоймы, уменьшение угла контактирования будет определяться его изгибной деформацией, так как при действии нагрузки по вершине зуба он менее жесткий, чем зуб втулки при действии нагрузки у ножки.

Задачу определения неравномерности распределения нагрузки по пятну внутреннего контакта зубьев при близких радиусах кривизны эвольвентных профилей решаем путем замены ее задачей о сжатии цилиндров внутреннего контакта, радиусы которых почти равны. Задавая радиусы r_{11} и r_{21} (рисунок 1, а) цилиндрических поверхностей через радиусы кривизны производящих контуров зубьев втулки и обоймы в точке А, можно воссоздать условия контактирования рабочих поверхностей зубьев муфты. При этом радиусы кривизны цилиндрических поверхностей определяем из условия того, что изгибная деформация уже произошла и установлен угол контактирования β_n (рисунок 1, а) между эвольвентными профилями.

Учитывая, что радиус-вектор $r_y = OA = OQ_1 + Q_1A$ (рисунок 1, а), уравнение эвольвенты можно представить в таком виде:

$$r_y = r_b[(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi)i + (\cos \varphi + \varphi \sin \varphi)j]. \quad (1)$$

Так как окружность радиуса r_b является эвольвентой профиля AA'' , то $AO_1 = r_b \varphi$ — радиус кривизны эвольвентного профиля.

На основании особенностей построения эвольвенты можно записать следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \theta &= \varphi - \alpha = \operatorname{tg} \alpha - \alpha; \\ \varphi &= \operatorname{tg} \alpha; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\alpha = \arccos \frac{r_B}{r_y}; \tag{3}$$

где θ — эвольвентный угол, значения приведены в справочниках;

φ — угол развернутости;

α — угол профиля в точке на концентрической окружности заданного радиуса r_y .

Радиус основной окружности определяется по формуле:

$$r_B = \frac{mz}{2} \cos \alpha_\omega, \tag{4}$$

где m — модуль зубьев;

z — число зубьев.

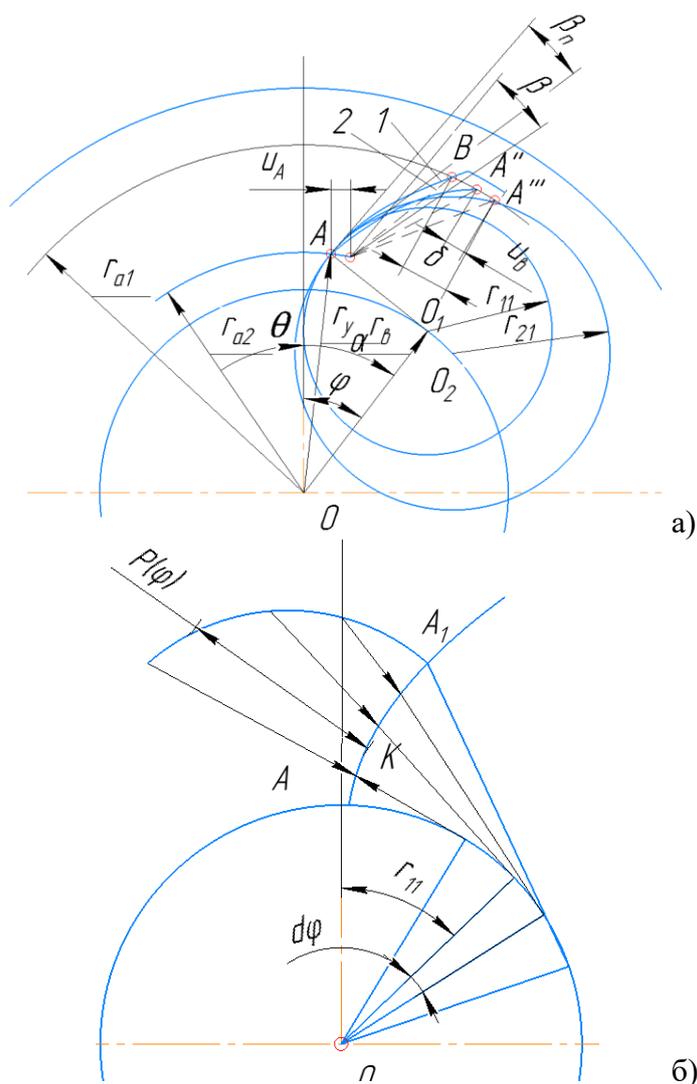


Рисунок 1. Особенности взаимодействия зубьев втулки и обоймы:
а – схема контактирования зубьев, б – распределение нагрузки по высоте эвольвентного профиля

Учитывая (2) и (3), радиус кривизны эвольвентного профиля в точке А (рисунок 1, а) определяем по формуле:

$$r_{11} = r_B \varphi_A = r_B \operatorname{tg} \arccos \frac{r_B}{r_{a2}}, \quad (5)$$

где φ_A — угол развернутости эвольвентного профиля в точке А;

r_{a2} — радиус вершин зубьев обоймы.

Принимая во внимание рисунок 1, а и формулу (3), находим зависимости:

$$\operatorname{tg} \beta_{\text{н}} = \frac{\delta - u_B}{L} \cos \alpha_{ra1},$$

где

$$u_B = u \frac{r_{a1}}{r_B}$$

тогда

$$\operatorname{tg} \beta_{\text{н}} = \operatorname{tg} \beta - \frac{u}{L}. \quad (6)$$

Здесь, δ — зазор между противоположными от зоны контактирования эвольвентными профилями на дуге радиуса вершин зубьев втулки и обоймы до их изгиба;

u_B — изменение точки А''' по дуге радиуса вершин зубьев втулки r_{a1} при нагружении муфты;

u — изгибная деформация зубьев в точке А, нормальная по профилю;

L — длина эвольвентного профиля на участке АА''.

Длина дуги L эвольвентного профиля на основании (1) при $x = x(t)$, $y = y(t)$ и $t \in (\varphi_{ra2}, \varphi_{ra1})$ определяется уравнением:

$$L = \int_{\varphi_{ra2}}^{\varphi_{ra1}} \sqrt{x'^2(t) + y'^2(t)} dt = \int r_B \varphi d\varphi = r_B \frac{\varphi^2}{2} \Big|_{\varphi_{ra2}}^{\varphi_{ra1}}$$

Учитывая (2), (3) и рисунок 4, а, находим длину дуги эвольвентного профиля АА'':

$$L = \frac{r_B}{2} \left(\operatorname{tg}^2 \arccos \frac{r_B}{r_{a1}} - \operatorname{tg}^2 \arccos \frac{r_B}{r_{a2}} \right) \quad (7)$$

Анализируя зону контактирования, охватывающего и охватываемого цилиндров (рисунок 1, а), между которыми имеется угол контактирования $\beta_{\text{ц}}$, находим следующую зависимость:

$$\operatorname{tg} \beta_{\text{ц}} = \frac{2(r_{21} - r_{11})}{\pi r_{11}},$$

где r_{11} — радиус кривизны охватываемой поверхности;

r_{21} — радиус кривизны охватывающей поверхности.

Отсюда

$$r_{21} = \left(1 + \frac{\pi}{2} \operatorname{tg} \beta_{\text{ц}} \right) r_{11}. \quad (8)$$

Предполагая, что в месте контакта радиусы кривизны эвольвентных профилей и цилиндров равны и $\operatorname{tg} \beta_{\text{ц}} = (\operatorname{tg} \beta_u)^\varepsilon$, где ε — коэффициент перехода и принимая во внимание (6), находим значение r_{21} для контактирующих зубьев муфты:

$$r_{21} = 1 + \frac{\pi}{2} \left(\operatorname{tg} \beta - \frac{u}{L} \right)^\varepsilon r_{11} \quad (9)$$

Введем обозначение

$$K_1 = 1 + \frac{\pi}{2} \left(\operatorname{tg} \beta - \frac{u}{L} \right)^\varepsilon \quad (10)$$

Тогда

$$r_{21} = K_1 r_{11}. \quad (11)$$

Значение коэффициента перехода ε зависит от конструктивных особенностей зубьев, для эвольвентного профиля $\varepsilon = 0,92$ (получено экспериментальным путем) [3].

После нагружения муфты на поверхности контакта зубьев будет действовать только нормальное давление (из предположения, что сжимаемые рабочие поверхности абсолютно гладкие), которое обозначается $P(\varphi)$ (рисунок 1, б). Тогда на эвольвентный элемент KL поверхности зуба будет действовать сила:

$$dp(\varphi) = p(\varphi) r_{\text{в}} \varphi d\varphi \quad (12)$$

Произведя замену эвольвентных профилей пары зубьев (рисунок 1, а), взаимодействующих в условиях внутреннего контакта при близких радиусах кривизны — цилиндрами, радиусы которых почти равны, в уравнении (12) можно считать $r_{11} = r_{\text{в}} \varphi$. На основании первого допущения произведем замену параметров в уравнении (12), где $p(\varphi) = p(\gamma)$ и $d\varphi = d\gamma$ (рисунок 2).

Тогда целиком перейдем к решению контактной задачи И. Я. Штаермана [1], где на элемент KL охватываемой поверхности действует сила:

$$dp(\gamma') = p(\gamma') r_{11} d\gamma'. \quad (13)$$

Соотношение, которое имеет место в области контакта:

$$U_{1r} + U_{2r} = u \cos \gamma' - (r_{21} - r_{11})(1 - \cos \gamma), \quad (14)$$

где U_{1r} и U_{2r} — полные радиальные перемещения точки первого и второго тела в пределах от $-\gamma_0$ до γ_0 по γ' ;

u — сближение в точке начального контакта;

γ — угол до рассматриваемой точки в области контакта.

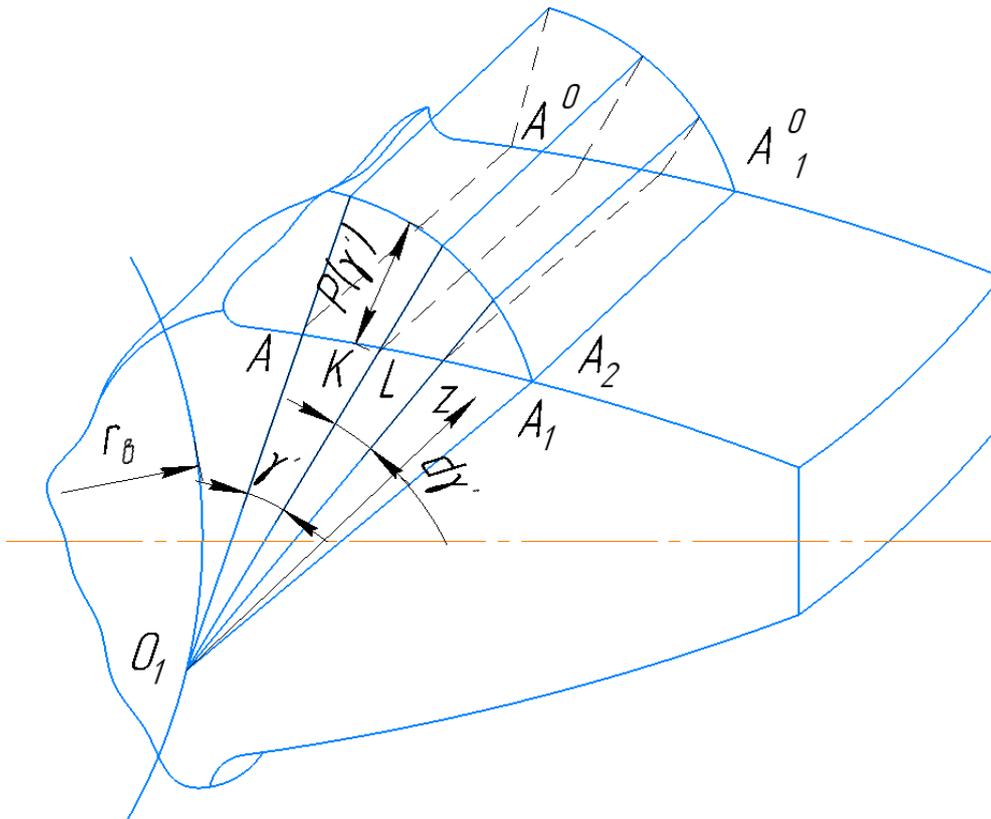


Рисунок 2. Эпюра распределения нагрузки по пятну контакта зуба втулки с прямолинейной образующей, взаимодействующего с зубом обоймы без перекоса

Продельвая соответствующие преобразования и учитывая, что функция $p(x)$ должна быть вследствие симметрии четной для области контакта $0 < x < x_0$, а также предполагая согласно методу отображения [1], что если полупространство, на которое действует сила, разрезать плоскостью, проходящей через эту силу, то напряжения, которые испытывает отброшенная часть пространства, должны возникать в оставшейся части (рисунок 2). Тогда для зубьев муфт с прямолинейными образующими, контактирующих без перекоса, учитывая (6), в цилиндрических координатах будем иметь:

$$\left\{ \begin{aligned} & 2\nu_1(1 + K_1) \int_0^{\gamma_0} p(\gamma') [\cos(\gamma - \gamma') \ln \operatorname{tg} \frac{|\gamma - \gamma'|}{2} + \cos(\gamma + \gamma') \ln \operatorname{tg} \frac{|\gamma + \gamma'|}{2} - \\ & 2 \cos \gamma \cos \gamma' \ln \operatorname{tg} \frac{\gamma'}{2}] d\gamma' - x_1(1 + K_1) \int_0^{\gamma_0} p(\gamma') [\sin |\gamma - \gamma'| + \sin |\gamma + \gamma'| - \\ & 2 \cos \gamma \sin \gamma'] d\gamma' + 4\nu_1(-\cos \gamma) \int_0^{\gamma_0} p(\gamma') d\gamma' = (K_1 - 1)(1 - \cos x); \quad 0 < \gamma < \gamma_0; \\ & Br_B \arccos \frac{r_B}{r_{a2}} \int_0^{\gamma_0} p(\gamma) \cos \gamma d\gamma = P_i, \end{aligned} \right. \quad (15)$$

где B — ширина зубьев втулки; P_i — нагрузка, действующая на зуб.

Особенность полученной системы интегральных уравнений состоит в том, что она определяет характер распределения нагрузки по пятну контакта, прямо не зависящий

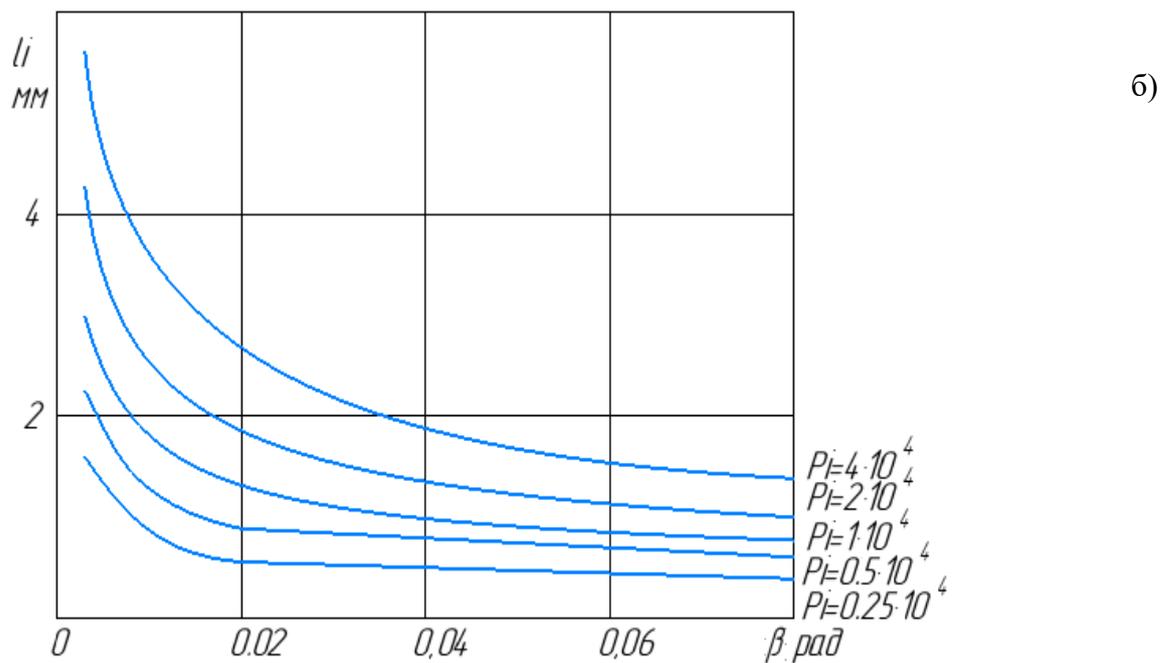
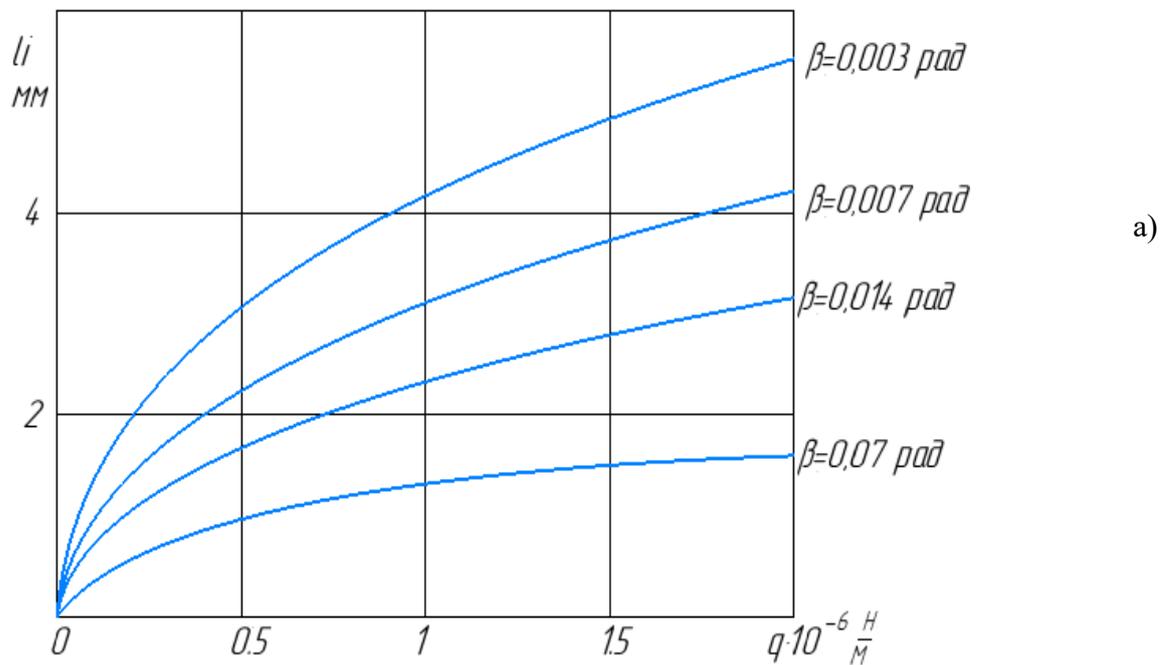


Рисунок 3. Изменение длины пятна контакта:
 а – в зависимости от удельной нагрузки
 б – в зависимости от угла контактирования

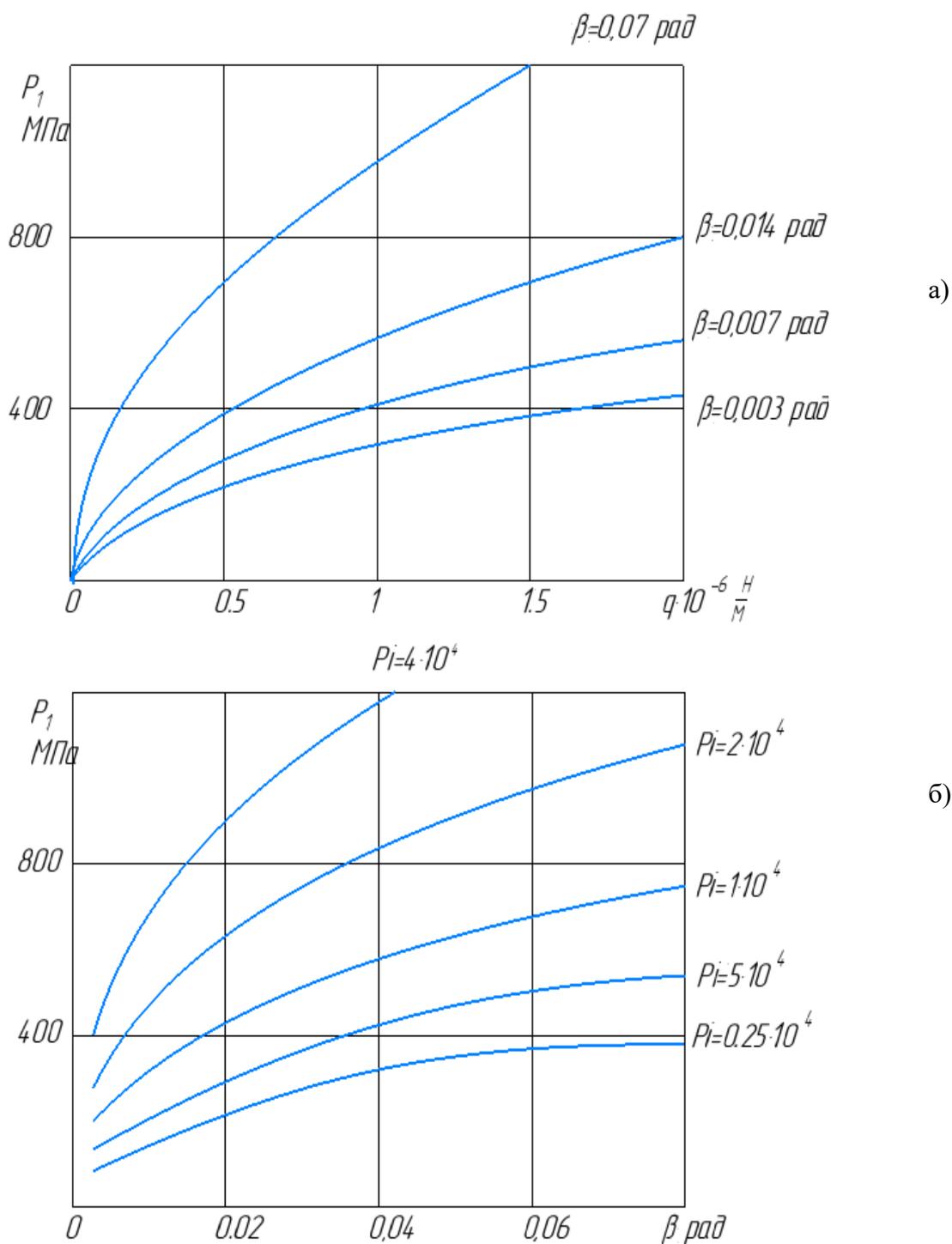


Рисунок 4. Изменение максимального контактного давления:
 а – в зависимости от удельной нагрузки
 б – в зависимости от угла контактирования

от радиусов кривизны поверхностей, а функционально выраженный в зависимости от угла контактирования β .

Решение этой задачи сводится к решению интегро-дифференциального уравнения Прандтля [4], метод решения которого предложен Векуа [1]. Оно сводится к замене одной из функций приближенным выражением, однако решение такого уравнения получается в замкнутом виде и полученные определенные интегралы не выражаются в явном виде. Поэтому решение системы уравнений производим методом конечных разностей.

На рисунке 3, а изображен график изменения длины пятна контакта по высоте зуба, в зависимости от удельной нагрузки P/B , приложенной к зубу при различных углах контактирования. Параметры пятна контакта определялись для зубчатых муфт со следующими характеристиками: $m = 5,5$ мм, $Z = 22$, $\alpha_\omega = 20^\circ$, $B = 20$ мм, материал сталь 20Х2Н4А. На рисунке 3, б представлен график изменения длины пятна контакта по высоте зуба в зависимости от угла контактирования β при фиксированных нагрузках. Изменение длины пятна контакта при углах β , меньших $0,014$ рад, имеет более выраженный характер, чем при больших его значениях.

Из графиков рисунка 4 следует, что технологические погрешности и эксплуатационные факторы, характеризующие угол контактирования β , оказывают существенное влияние на величину максимального нормального контактного давления P_1 .

Приведенные зависимости относятся к случаю контактирования зубьев без их перекоса с прямолинейной образующей, когда нагрузка, воспринимаемая зубьями, распределена по нормали к контактирующей поверхности. В этом случае на контактной площадке касательная нагрузка отсутствует в силу того, что нет относительных перемещений зубьев.

3. Заключение

В результате проведенного исследования были выявлены и проанализированы особенности распределения нагрузки по пятну контакта зубьев муфт, работающих в условиях близких радиусов кривизны эвольвентных профилей при отсутствии перекосов осей. Установлено, что традиционные методы расчета, базирующиеся на теории Герца, не учитывают специфику внутреннего зацепления зубчатых муфт, где радиусы кривизны взаимодействующих поверхностей почти равны, что приводит к существенным погрешностям при определении напряжений.

Разработана методика расчета концентрации нагрузки, основанная на замене эвольвентных профилей цилиндрами с близкими радиусами кривизны с использованием контактной задачи И. Я. Штаермана. Получены аналитические зависимости для определения угла контактирования с учетом изгибной деформации зубьев и технологических погрешностей изготовления. На основе решения интегро-дифференциальных уравнений методом конечных построены графические зависимости, показывающие влияние угла контактирования и удельной нагрузки на длину пятна контакта. Установлено, что наибольшее влияние на длину пятна контакта оказывают углы контактирования менее $0,014$ рад. Предложенная методика позволяет более точно определять концентрацию нагрузки и может быть рекомендована для инженерных расчетов зубчатых муфт на стадии проектирования. В работе выполнены исследования особенностей распределения контактной нагрузки зубьев, которая представлена в виде эпюра распределения нагрузки по пятну контакта зуба втулки с прямолинейной образующей, взаимодействующего с зубом обоймы без перекоса.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Штаерман, И. Я. Контактная задача теории упругости. - М.: Гостехиздат, 1949. - 270 с.
2. Wellauer, N. J., Seireg A. Bending Strength of Gear Teeth by Cantilever-Plate Theory, Paper ASME, 1959, No. A-50.
3. Михайлов, А. Н., Финченко В. А. Рациональный способ применения зубчатых муфт. Киев, 1984. – 10 с. Рукопись депонирована в УкрНИИТИ, № 1525.
4. Векуа, И. Н. Об интегро-дифференциальном уравнении Планкена. — Прикладная механика, 1945, т. 9, № 2, с. 49–54.
5. Рябченко, С. В. Шлифование зубчатых колес тарельчатыми кругами // Журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов» Серия «Металлообработка». – 2/2014. – С. 14-15.
6. Александров, И. В. Исследование влияния различных факторов на контактную выносливость зубчатых колес в тяжелом машиностроении / И. В. Александров, А. И. Волошин, В. Ф. Колесник, В. Н. Стрельников // Вестник НТУ «ХПИ». — Харьков, 2006. — Вып. 22. — С. 5 — 9.

Поступила в редколлегию 21.05.2025 г.

УДК 621.9.06-52

Д. В. Огренич, аспирант

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, РФ

Тел.: +79494104485; E-mail: dmitryogrenich@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОТОЧНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

В статье рассмотрены данные о особенностях и основных принципах проектирования поточно-пространственных модулей. Разработаны компоновочные схемы поточно-пространственных технологических модулей.

Ключевые слова: поточно-пространственный технологический модуль, компоновка, объемно-пространственная структура, конструкция, принципиально-структурная модель.

D. V. Ogrenich

FEATURES AND BASIC PRINCIPLES OF DESIGNING FLOW-SPACE TECHNOLOGY MODULES

The article discusses the data on the features and basic principles of designing flow-space modules. Layout schemes of flow-space technology modules are developed.

Keywords: flow-space technology module, layout, three-dimensional structure, design, fundamental structural model.

1. Введение

Одним из главных ограничений роста производительности в современных производственных системах является не столько технологические возможности оборудования, сколько логистические издержки и длительность производственного цикла. Традиционные линейные цеховые структуры создают избыточные запасы межоперационного задела и требуют значительных затрат времени на транспортировку, что противоречит принципам бережливого производства. В связи с этим возрастает актуальность разработки компактных и эффективных производственных структур [1, 2].

Поточно-пространственный технологический модуль (ППТМ) представляет собой функционально и конструктивно завершенную ячейку, где оборудование объединено не только общей технологией, но и общей несущей конструкцией, что в свою очередь требует выработки новых принципов компоновки.

Цель работы: разработка конкретных ППТМ, обеспечивающих качественно новые свойства и технологические возможности, обеспечивая и реализуя комплексную автоматизацию производственных процессов.

В данной работе решаются следующие задачи: исследовать основные параметры ППТС с различными компоновками технологических зон, спроектировать конкретные варианты ППТС, рассмотреть особенности проектирования ППТС.

2. Основное содержание работы

При построении принципиально-структурных моделей ППТМ всей поточно-пространственной технологической системы (ППТС), выполняется проектирование ППТМ с параметризацией их параметров. При этом последовательно, в зависимости от иерархического уровня степени сложности ППТС создается конкретное компоновочное решение ППТС. Проектирование ППТС на каждом уровне их сложности ведется с использованием общей модели построения ППТС. Это дает возможность проектировать ППТС исходя из позиций системного подхода и вести разработку ее элементов подси-

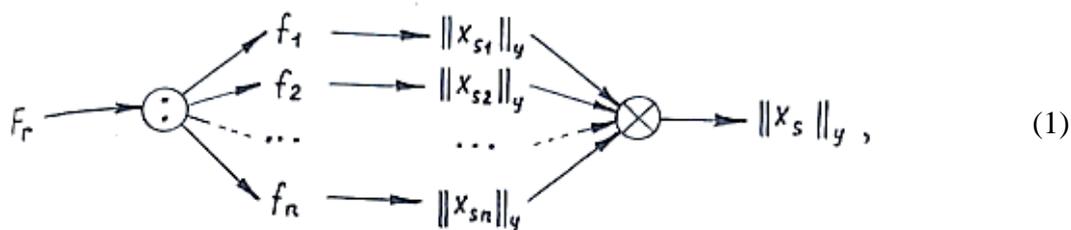
стем без отрыва от разработки всей ППТС. При этом результаты проектирования иллюстрируют с помощью компоновочных схем.

Компоновочная схема ППТС это чертеж взаимного расположения ППТМ, технологических машин и основных узлов с указанием необходимых конструктивных параметров.

В процессе проектирования ППТС необходимо учитывать особенности их работы и эксплуатации. Поэтому должны рационально выполняться технологические операции, подпроцессы и процессы. При этом конструкция ППТС должна быть компактна и иметь высокий коэффициент использования технологического пространства. В этом случае проектирование ППТС ведется с учетом удобства обслуживания ППТМ, их подсистем и элементов. Здесь предусматривается возможность доступного их осмотра, смены инструмента, удаления брака и отходов, настройки на точность и т. п. Более того, необходимо предусмотреть и разработать экологические мероприятия по утилизации отходов производства. А также должны быть проработаны вопросы, связанные с объединением ППТМ в ППТС и оптимальной их компоновке. Вместе с тем, необходимо предусматривать возможность нормализации, унификации и стандартизации основных сборочных элементов и подсистем.

Назначение ППТС – реализация во времени технических функций, представленной иерархической схемой, необходимых для преобразования заготовок в изделие. При этом каждая составляющая функция может реализоваться отдельной элементарной подсистемой с унифицированной структурой [3]. Поэтому в основу методики проектирования ППТС может быть предложена операция технологического умножения множеств реализуемых составляющих функций и унифицированных структур, соответствующих принятому уровню автоматизации ППТС. Отметим, что унифицированные структуры автоматизированных систем рассмотрены в работе [3].

На основании приведенных выше соображений, процедура автоматизированного проектирования ППТС может быть схематически представлена зависимостью:



где F_r – суммарная функция, реализуемая ППТС;
 f_i – элементарная составляющая функции i -й элементарной подсистем;
 $\|x_{si}\|_y$ – унифицированная структура i -й элементарной подсистемы, соответствующая принятому уровню автоматизации;
 $\|x_s\|_y$ – общая компоновочная структура ППТС.

Отметим, что разделение F_r на элементарные составляющие функции должно производиться до тех пор, пока составная функции не будет представлена как совокупность такого множества f_i , каждая пара которых реализуется либо только последовательно, либо только параллельно. Такое разделение необходимо, чтобы формализовано выполнять оператор объединения элементарных унифицированных структур в общую структуру при компоновке ППТС. Благодаря этому, оператор объединения может реа-

лизовать общую компоновочную структуру формализовано, что позволяет с помощью ЭВМ выполнять компоновку ППТС и выявлять всю область возможных решений.

Проектируя конкретный вариант ППТС и ППТМ необходимо стремиться к равенству или кратности характеристик надежности и стойкости их элементов и подсистем. При этом выполняя компоновку ППТС необходимо учитывать удобства ремонта, наладки и эксплуатации. Следует иметь ввиду также стоимость ППТС, срок окупаемости капитальных затрат, металлоемкость конструкций и другие технико-экономические характеристики.

После рассмотрения технических вопросов процесса проектирования ППТС, на основании которых ведется эскизная проработка и затем разрабатываются технический рабочий проект ППТС. Здесь должны быть учтены такие категории теории композиции, как пропорциональность, масштабность, композиционное равновесие, единство характера формы всех элементов. Совокупность этих категорий дает гармоничную целостность формы создаваемых ППТМ и ППТС.

В процессе расчетов элементов и подсистем ППТС ведется проработка следующих параметров:

- кинематических показателей;
- кинематических характеристик, определяющих прочность и жесткость ППТС;
- динамических параметров, гарантирующих качество и долговечность эксплуатации ППТС;
- энергетические характеристики;
- информационных характеристик;
- экономических показателей.

При объединении ППТМ и ППТС необходимо стремиться к тому, чтобы производительность всех ППТМ была равна, а также чтобы выполнялся баланс входных и выходных материальных, энергетических и информационных потоков. При этом качественные уровни проектируемых ППТС определяются следующие показатели: технические, надежность и долговечность, уровень стандартизации, технической эстетики, технологические, экономические и организационные. Вместе с тем, при проектировании ППТС необходимо вести учет конъюнктуры рынка.

Рассмотрим примеры конкретных вариантов ППТМ.

Пример 1. Выполним проектирование поточно-винтового технологического модуля (ПВТМ) [3] на основе приведенных выше соображений по принципиально-структурной модели.

На рисунке 1 представлена компоновочная схема ПВТМ, на рисунке 1, а – продольный разрез. 1, б – поперечный.

ПВТМ содержит рабочий винтовой шнек 1 с переменными геометрическими параметрами спирали 2, жестко смонтированный посредством хвостовиков 3, 4 и стаканов 5, 6 на плитах 7, 8 основания. В каждом потоке блока технического воздействия (БТВ) 9 на звездочках 10, установленных на кронштейнах 11, размещен цепной конвейер 12. При этом на наружной стороне звеньев цепного конвейера 12 закреплены БТВ 9, ползуны 13 которых зацеплены с винтовой спиралью 2 рабочего шнека 1. В период нагружения, продольная ось БТВ 9 расположена параллельно продольной оси рабочего шнека 1. Так как рабочий винтовой шнек 1 имеет переменные геометрические параметры, то расстояние Н (рисунок 1, а) переменна по высоте ПВТМ, что обеспечивает рабочее перемещение ползунков 13 БТВ 9 в период работы технологического модуля. На хвостовиках 3, 4 рабочего винтового шнека 1 посредством подшипников 14 смонтирована верхняя 15 и нижняя 16 поворотные планшайбы, связанные между собой колон-

ками 17 (рисунок 1, б). На поворотных планшайбах 15, 16 закреплены кронштейны 11 и подшипниковые опоры 18, в которых размещены транспортные винтовые шнеки 19 с постоянными геометрическими параметрами спирали (шаг $t = const$). При этом впадины спирали транспортных винтовых шнеков 19 зацеплены с выступами 20 цепного конвейера 12, изготовленными на внутренней стороне его звеньев.

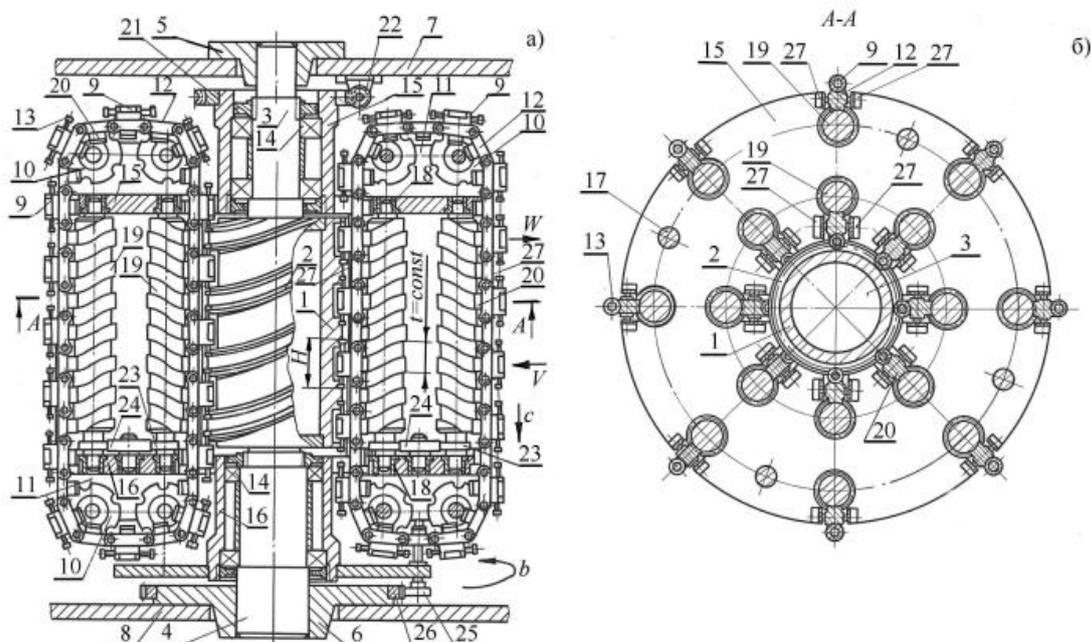


Рисунок 1. Компонировочная схема ПВТМ: а – продольный разрез, б – поперечный разрез

На верхней поворотной планшайбе 15 установлено червячное зубчатое колесо 21, связанное с приводом вращения 22. При этом транспортные винтовые шнеки 19 посредством зубчатых колес 23, 24 и 25 связанные с зубчатым колесом 26, жестко закрепленным на стакане 6. Для повышения точности позиционирования БТВ 9 относительно рабочего винтового шнека 1, цепной конвейер 12 смонтирован в направляющих 27.

ПВТМ работает следующим образом. ПО по входному потоку «а» загружается в БТВ 9, закрепленные на наружной стороне звеньев цепного конвейера 12. При этом благодаря непрерывному вращению в направлении «в» верхней 15 и нижней 16 поворотных планшайб, установленных на подшипниках 14 хвостовиков 3, 4 рабочего шнека 1, реализуется постоянные перемещения БТВ 9 в направлении «с», которое выполняется за счет вращения транспортных винтовых шнеков, связанных с цепным конвейером 12 посредством выступов 20. Здесь непрерывное вращение поворотных планшайб 15 и 16, связанных между собой вертикальными колонками 17, реализуется через червячную передачу 21 приводом вращения 22, закрепленным на плите 7 основания. Вращение транспортных винтовых шнеков 19, смонтированных в подшипниковых опорах 18, осуществляется кинематической передачей 23, 24, 25 связанной с зубчатым колесом 26, жестко смонтированным на стакане 6 нижней плиты 8 основания. При перемещении цепного конвейера 12, размещенного на звездочках 10 кронштейнов 11, БТВ 9 зацепляются ползунами 13 с винтовой спиралью 2 рабочего шнека 1, жестко смонтированного в стаканах 5 и 6. При этом за счет переменности расстояния H (рисунок 1, а) винтовой спирали 2, при прохождении БТВ 9 технологической зоны, реализуется требуемый

рабочий ход ползунов 13, что и обеспечивает обработку изделий. Наличие направляющих 27 повышает точность и жесткость позиционирования БТВ 9, закрепленных на звеньях цепного конвейера 12. После обработки предметов обработки (ПО), они выгружаются из БТВ 9 по выходному потоку «д» и передаются по технологической цепочке к следующему ППТМ для последующей обработки ПО.

Использование этого ПВТМ наиболее эффективно для реализации штамповочных операций ПО из пластмасс. Цикловая производительность ПВТМ может быть определена по следующей формуле:

$$P_{ци} = \frac{v_{i1}v_{i2}}{T_{ци}}, \quad (2)$$

где $P_{ци}$ – цикловая производительность ПВТМ;

$T_{ци}$ – время полного кинематического цикла;

v_{i1} – количество БТВ в одном цепном конвейере;

v_{i2} – количество цепных конвейеров ПВТМ.

Описанный ПВТМ защищен авторским свидетельством [3].

Пример 2. Выполним компоновку принципиально-структурной модели поточно-спирального технологического модуля (ПСТМ) [4, 5].

На рисунке 2 приведена компоновочная схема ПСТМ с двумя ярусами. В первом ярусе выполняется завальцовка самостоорящихся гаек, а во втором – зачеканка.

ПСТМ имеет планшайбу 5 размещенную на валу 6 размещенном посредством подшипника 7 в стаканах 8, 9, которые закреплены на плитах 13 и 14 станины модуля. На планшайбе 5 установлены звездочки 4 на которых монтируются цепные конвейеры 3 с блокодержателями 2, в которых закрепляются БТВ 1. На валу также установлены верхняя планшайба 20 с нижним цепным конвейером 19. На верхней планшайбе 17 размещены приводы 11 вращения цепных конвейеров 3, 15, 19, которые связаны с ними кинематическими передачами и редуктором 10. Электроэнергия к приводам 11 подается через токосъемник 12, расположенный на станине 9. В нижней части вала 6 установлена шестерня 18 для обеспечения вращения технологического модуля.

Представленный ПСТМ защищен авторским свидетельством [5]. Цикловая производительность ПСТМ может быть определена по формуле (2), его эксплуатация описана в работе [4].

Пример 3. Компоновочная схема поточно-глобоидного технологического модуля (ПГТМ) [6] представлена на рисунке 3. В ПГТМ инструменты 1 БТВ 2 в технологической зоне входят в зацепление с глобоидным червяком 3. При этом БТВ 2 жестко закрепляются по периметру роторов 4, которые монтируются на осях 5, расположенных в подшипниках 6 на опорах 7, установленных на нижней 8 и верхней 9 планшайбах. Глобоидный червяк 3 жестко закреплен в стакане 10, размещенном на плитах 11, и имеет специальную спираль с параллельными сторонами поверхностей, взаимодействующих с ползунами инструментов 1 БТВ 2.

Спираль глобоидного червяка 3 имеет переменные геометрические параметры витков и обеспечивает на входе в глобоид расстояние между параллельными сторонами равное h_1 , а на выходе h_2 . Здесь разность между расстояниями h_1 и h_2 равна необходимому рабочему движению инструментов 1 БТВ 2.

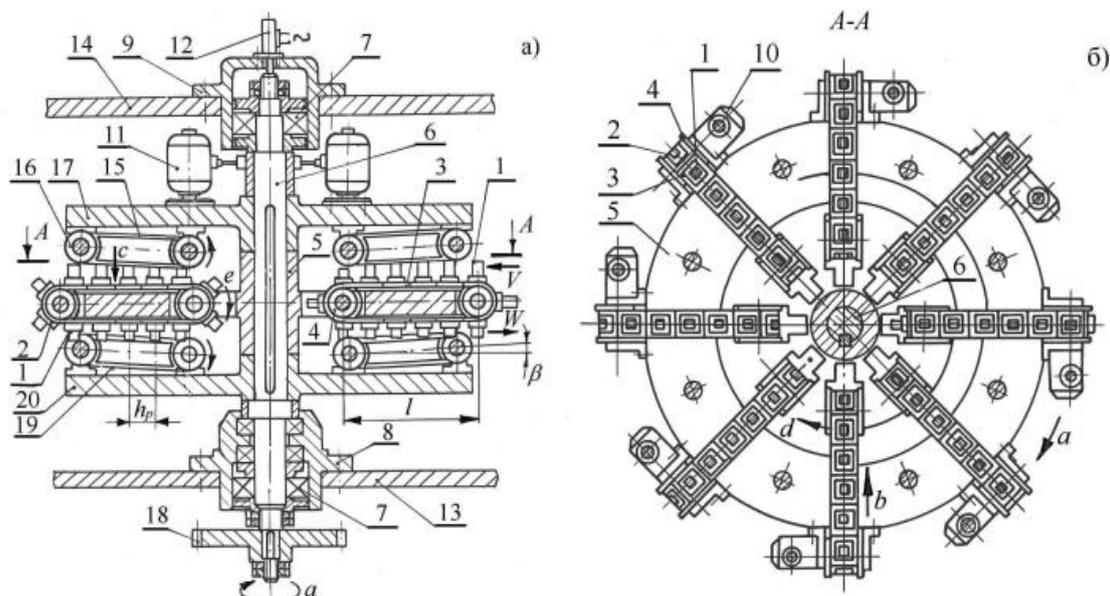


Рисунок 2. Компонировочная схема ПСТМ: а – продольный разрез, б – поперечный разрез

Верхняя планшайба 9 монтируется на подшипнике 12, установленном на хвостовике глобоида 3, а нижняя планшайба 8 на подшипнике 13, и связаны между собой опорами 7. На нижней планшайбе 8 располагается зубчатое колесо 14, связанное с приводом вращения 15 модуля.

В процессе работы ПГТМ реализуются два элементарных вращательных движений «а» и «в». При прохождении БТВ 2 через глобоид 3 реализуется рабочее движение инструментов 1, которое выполняется по касательной к окружности поворота роторов 4. ПО поступают в БТВ 2 по входному потоку V , а выгружаются по выходному потоку W . Цикловая производительность определяется по формуле (2).

Представленный ПГТМ защищен авторскими свидетельствами [6].

3. Заключение

Основным результатом проведенных в настоящем разделе исследований явилось разработка общих принципов компоновки и проектирования ППТС, которые можно обобщить в следующих выводах:

Установлено, что организация движений объемно-пространственной структурной модели ППТМ выполняется на базе композиции объемно-пространственной структуры и принципиальной кинематической схемы транспортного движения, которая формализовано выражается с помощью принципиально-структурных моделей. На базе принципиально-структурных моделей выполняется компоновка ППТМ и ППТС.

Разработана методика синтеза принципиально-структурных моделей, в основу которой положена операция декомпозиции объемно-пространственной структурной модели и принципиальной кинематической схемы на элементарные структуры и движения, затем объединения соответствующих элементарных структур и движений в упорядоченные пары и далее объединения этих упорядоченных пар (кортежей) в общую принципиально-структурную модель ППТМ. С помощью таких процедур можно созда-

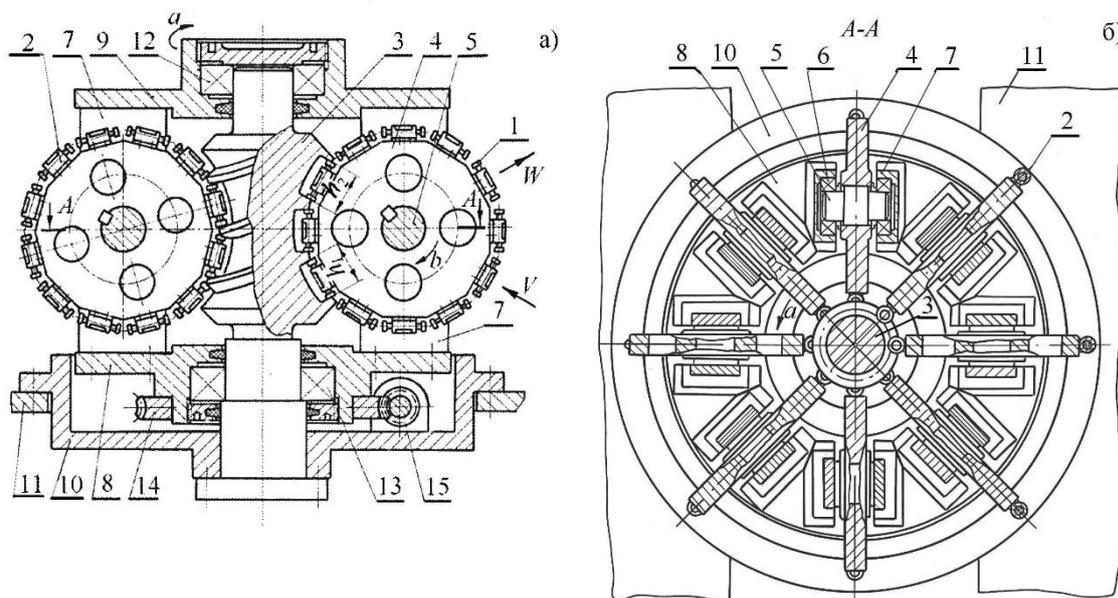


Рисунок 3. Компонировочная схема ПГТМ: а – продольный разрез, б – поперечный разрез

вать любые типы принципиально структурных моделей ППТМ.

С использованием разработанных положений в данной статье можно вести проектирование конкретных вариантов различных типов ППТС.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Самохвалов, Е. И. Логистические системы компьютерно-интегрированных производств (транспортно-складское и загрузочное обеспечение производственных систем): учебное пособие. Ч. 1 / Е. И. Самохвалов, В. А. Гречишников. – Москва: Станкин: Янус-К, 2004. – 224 с.
2. Степанов, В. И. Логистика производства: учебное пособие / В. И. Степанов. – Москва: ИНФРА-М, 2021. – 200 с.
3. А. с. 1669762 СССР МКИ В 30 В 11/12. Винтовой технологический ротор / А. Н. Михайлов; Опубл. 15.08.91, Бюл. № 30. – 3 с.
4. Михайлов А. Н., Тернюк Н. Э. Прогрессивные методы производства изделий на поточно-спиральных технологических модулях //Технология и орг. пр-ва, 1990, № 3, с. 15-18.
5. А. с. 1588556 СССР, МКИ В 30 В 11/12. Способ обработки изделий на технологическом роторе / А. Н.Михайлов, Н. Э.Тернюк; Опубл. 30.08.90, Бюл. № 32. – 3 с.
6. А. с. 1618672 СССР, МКИ В 30 В 11/12. Способ обработки изделий на поточно-глобoidном технологическом модуле / А. Н.Михайлов, Н. Э.Тернюк; Опубл. 07.01.91, Бюл. № 1. – 3 с.

Поступила в редколлегию 23.05.2025 г.

УДК 621.9.02:621.9.048

T. G. Ivchenko, Ph.D.

Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

Тел./Факс: +7 949 3349006

THE ESTIMATION OF POSSIBILITIES OF THE TURNING PRODUCTIVITY RISE WITH THE USE OF COATED CARBIDE CUTTING TOOLS AND TECHNOLOGICAL CUTTING FLUID

An optimization method for selecting turning parameters based on the maximum productivity criterion has been developed for machining with coated carbide cutting tools and technological cutting fluids. A mathematical model of the turning process was formulated, incorporating constraints related to the permissible cutting temperature. Using linear programming techniques, analytical relationships describing the optimal cutting conditions as functions of the principal turning parameters were obtained. A productivity growth factor was introduced to account for the increased service life of coated carbide tools as well as the cooling and lubricating performance of the technological cutting fluid. On the basis of this factor, the potential for productivity improvement under various turning conditions with the application of coated tools and cutting fluids was evaluated.

Keywords: turning, optimization, cutting temperature, coated tools, cutting fluid, productivity.

Т. Г. Ивченко**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТОЧЕНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ**

Разработан метод оптимизации режимов резания при точении по критерию максимальной производительности с применением твердосплавного режущего инструмента с покрытием и технологической смазочно-охлаждающей жидкости. Сформирована математическая модель процесса точения с учетом ограничений по допустимой температуре резания. С использованием методов линейного программирования получены аналитические зависимости оптимальных режимов резания от основных параметров точения. Введен коэффициент роста производительности, учитывающий увеличение стойкости твердосплавного инструмента с покрытием, а также охлаждающие и смазывающие свойства технологической смазочно-охлаждающей жидкости. На основе данного коэффициента выполнена оценка возможностей повышения производительности при различных режимах точения с применением инструмента с покрытием и смазочно-охлаждающей жидкости.

Ключевые слова: точение, оптимизация, температура резания, инструмент с покрытием, смазочно-охлаждающая жидкость, производительность.

1. Introduction

The intensification of the cutting process remains a central challenge in the machining of mechanical components. At present, the most effective approach to increasing machining efficiency involves the use of coated carbide cutting tools (CCT) in combination with technological cutting fluids (CF) [1]. These technological solutions enable higher cutting speeds and feeds while maintaining acceptable tool life and surface quality.

To achieve maximum benefit from their application, it is necessary to implement optimization procedures for selecting cutting parameters based on criteria such as maximum productivity or minimum production cost [2]. Among the available optimization techniques, linear programming is widely employed for determining optimal cutting speed and feed rate under operational constraints when maximizing productivity.

However, intensification of the cutting process inevitably leads to a significant increase in cutting temperature. This necessitates the incorporation of thermal constraints into optimization models. The studies presented in [3] provide methods for calculating heat flows and cutting temperatures during turning with the use of cutting fluids, enabling the solution of

optimization problems with explicit consideration of temperature limitations under various machining conditions.

Optimization problems for turning operations with the use of cutting fluids have been successfully addressed in previous studies [4, 5]. Nevertheless, the obtained results cannot be directly extended to coated carbide cutting tools, whose performance characteristics – particularly tool life – are substantially influenced by coating properties and thermal effects. Therefore, further development of optimization methods that account for the increased durability of coated carbide tools is both relevant and necessary. Such an approach makes it possible to justify higher cutting parameters and achieve a significant rise in machining productivity.

The objective of the present study is to refine the method for optimizing turning conditions and to evaluate the potential for productivity enhancement, taking into account the combined influence of cutting fluid and coated carbide cutting tools.

2. The main contents and outcomes of activity

By optimization of cutting regimes, productivity is accepted as an objective function of the machining which maximum is reaching at a minimum of basic time at rough turning limitations on possibilities of the cutting tool (1); on the maximum permissible cutting power N (2); on maximum permissible of cutting temperature Θ (3); on maximum permissible cutting tool strength (4); on maximum permissible ranges of a rotational speed n_{\min} (6), n_{\max} (7) and the feed S_{\min} (8), S_{\max} (9) operate, at finish turning on maximum permissible of machined surface roughness R_a (5), additionally operates in place of limitation on maximum permissible cutting tool strength. As a result of linearization of objective function and limitations by taking the logarithm the mathematical model of the cutting process expressed by system of the linear inequalities is defined ($X1 = \ln n$; $X2 = \ln S$):

At rough turning

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1, \\ (n_p + 1)X1 + y_P X2 \leq b_2, \\ z_t X1 + y_t X2 \leq b_3, \\ y_P X2 \leq b_4, \\ X1 \geq b_6, X1 \leq b_7, \\ X2 \geq b_8, X2 \leq b_9, \\ (X1 + X2) \rightarrow \max, \end{cases}$$

(1)

at finish turning

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1, \\ (n_p + 1)X1 + y_P X2 \leq b_2, \\ z_t X1 + y_t X2 \leq b_3, \\ k_3 X1 + k_2 X2 \leq b_5, \\ X1 \geq b_6, X1 \leq b_7, \\ X2 \geq b_8, X2 \leq b_9, \\ (X1 + X2) \rightarrow \max, \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \ln(1000C_VK_VK_T^m/\pi DT^m t^{(x_v)}); \\
 b_2 &= \ln(6 \cdot 10^{3(n_p+2)}N\eta/C_PK_PK_{MP}(\pi D)^{(n_p+1)}t^{x_p}); \\
 b_3 &= \ln(1000^{z_t}\Theta/\tilde{N}_\Theta K_\Theta K_O(\pi D)^{z_t}); \\
 b_4 &= \ln(34\tilde{n}^{1,35}K_\Phi/C_PK_PK_{MP}t^{(x_p-0,77)}); \\
 b_5 &= \ln(R_a(\pi D/1000)^{k_3}/k_oK_RK_{MR}); \\
 b_6 &= \ln n_{min}; b_7 = \ln n_{max}; b_8 = \ln S_{min}; b_9 = \ln S_{max}.
 \end{aligned}$$

where T – tool life; t – depth of cut; D – diameter of machining; C_v, K_v and x_v, y_v, m – factors and the indexes characterizing degree of influence of depth, feed and tool life for cutting speed; K_T – factor, which takes into account the increase of coated carbide cutting tool life; n – synchronous speed; C_p, K_p, x_p, y_p, n_p – factors and the indexes characterizing degree of influence of depth, feed and cutting speed for cutting force P_z ; K_{MP} – factor, which takes into account the oiling properties of CF for cutting force; η – efficiency of transmission of machine tool; k_o, K_R, k_2, k_3 – factors and the indexes characterizing degree of influence of feed and cutting speed; K_{MR} – factor, which takes into account the oiling properties of CF for treated surface roughness; C_Θ, K_Θ and z_t, y_t – factors and the indexes characterizing degree of influence of cutting speed and feed for cutting temperature; K_O – factor of temperature lowering, which takes into account the cooling properties of CF.

The example of definition of optimum of cutting regimes at rough and finish turning of steel 45 is reduced on a figure 1.

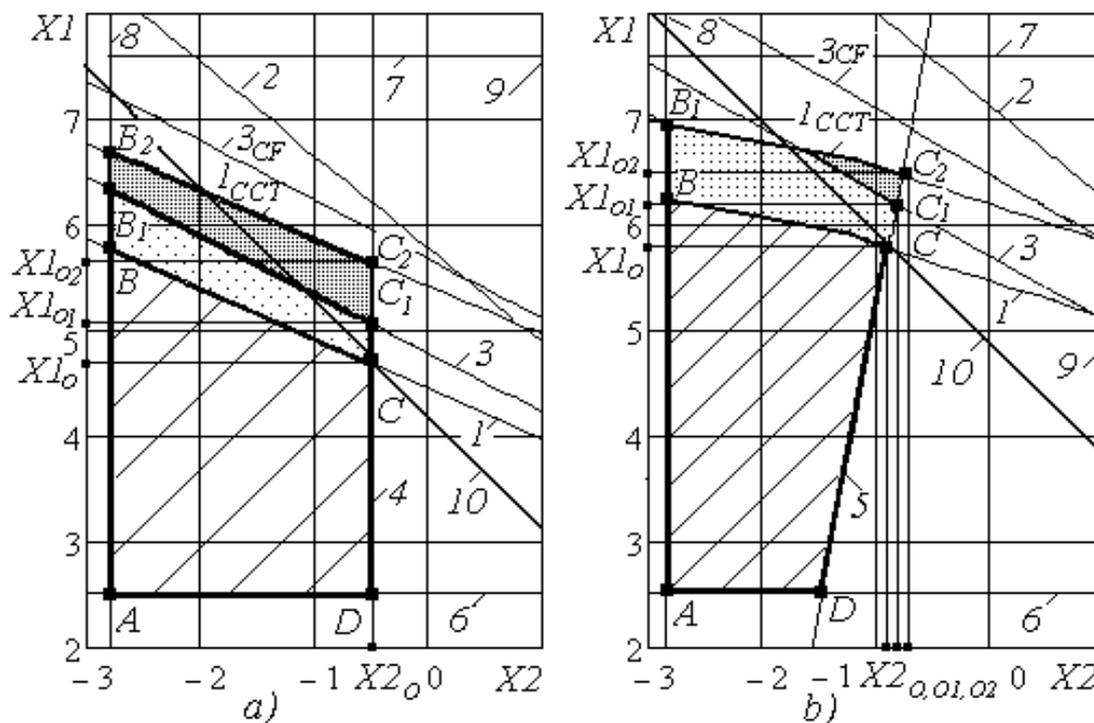


Figure 1. Graphs of determination of the optimum regimes at rough turning ($t=3mm; T=30min; c=5mm$) – a) and finish turning ($t=1mm; T=60min; R_a=3,2mkm$) – b) with use of CCT and CF

Polygon ABCD on reduced figure 1 represents the area of possible decisions at turning without CCT and CF. The objective function accepts the maximum value to a point C, for

which the sum of distances to shafts (X1+X2) is maximum to what the extremely possible position of the line 10 characterizing objective function testifies. The point C is a cross point of limitations on possibilities of the cutting tool (1) and cutting tool strength (4) at rough turning and on a roughness of machined surface (5) at finish turning. Coordinates of a point C (X1_o, X2_o) are required the best values of parameters.

The use of CCT increases tool life and changes limitations on possibilities of the cutting tool (1_{CCT}). However, the presence of temperature limitation does not allow realizing the possible of the cutting regimes increase. The point C₁ is a cross point of limitations on maximum permissible temperature of cutting (3) cutting tool strength (4) at rough turning and on a roughness of machined surface (5) at finish turning. Coordinates of a point C₁ (X1_{o1}, X2_{o1}) are required the best values of parameters.

The use of CF deletes temperature limitation and increases the cutting regimes. The point C2 is a cross point of limitations on possibilities of the cutting tool (1_{CCT}) and cutting tool strength (4) at rough turning and on a roughness of machined surface (5) at finish turning. Coordinates of a point C₂ (X1_{o2}, X2_{o2}) are required the best values of parameters.

Optimum cutting regimes – feed S_o and cutting speed V_o can be define analytically:

At rough turning:

$$S_{i1} = (34c^{1,35}t^{(0,77-x_p)}K_\phi/C_pK_PK_{MP})^{1/y_p} \tag{2}$$

$$V_{i1} = \begin{cases} (\Theta/C_\theta K_\theta K_o t^{x_t} S_{o1}^{y_t})^{1/z_t}, & \text{if } \Theta < \Theta_{o1} \\ C_V K_V K_T^m / T^m t^{x_v} S_{o1}^{y_v}, & \text{if } \Theta \leq \Theta_{o1} \end{cases} \tag{3}$$

At finish turning:

$$S_{o2} = \begin{cases} \left(\frac{\Theta(k_o K_R K_{MR})^{z_t/k_3}}{C_\theta K_\theta K_o R_a^{z_t/k_3} t^{x_t}} \right)^{\frac{k_3}{y_t k_3 - z_t k_1}}, & \text{if } \Theta < \Theta_o; \\ \left(\frac{R_a T^{m k_3} t^{k_3 x_v}}{k_o K_R K_{MR} (C_V K_V K_T^m)^{k_3}} \right)^{\frac{1}{k_1 - y_v k}}, & \text{if } \Theta \geq \Theta_o; \end{cases} \tag{4}$$

$$V_{o2} = \begin{cases} (R_a/k_o K_R K_{MR} S_{o2}^{k_1})^{1/k_3}, & \text{if } \Theta < \Theta_o; \\ C_V K_V K_T^m / T^m t^{x_v} S_{o2}^{y_v}, & \text{if } \Theta \geq \Theta_o. \end{cases} \tag{5}$$

where Θ_{o1}, Θ_{o2} – boundary value of cutting temperatures for which it is necessary to consider temperature limitation:

$$\Theta_{o1} = C_\theta K_\theta t^{x_t} \left(\frac{C_V K_V K_T^m}{T^m t^{x_v}} \right)^{z_t} \times \left[\frac{R_a T^{m k_3}}{k_o K_R (C_V K_V K_T^m)^{k_3}} \right]^{\frac{y_t - y_v z_t}{k_1 - y_v k_3}}$$

$$\Theta_{o2} = C_\theta K_\theta t^{x_t} \left(\frac{C_V K_V K_T^m}{T^m t^{x_v}} \right)^{z_t} \times \left[\frac{340c^{1,35}t^{(0,77-x_p)}K_\phi}{C_p K_P} \right]^{\frac{y_t - y_v z_t}{y_p}}$$

The results of analysis of cooling and oiling proper-ties for different CF are presented on table 1, 2, 3 [3].

The analysis for followings most widespread CF: Akvol-2 (CF, which owns the most expressed cooling properties); Ukrinol-1 (CF, which owns the most expressed cooling proper-ties and partly oiling properties); MR-1y (CF, which owns the most expressed oiling proper-ties and partly cooling properties) is carried out. MR-1y has the minimal factors of tempera-ture lowering K_O , factors cutting force at rough turning K_{MP} and machined surface roughness at finish turning K_{MR} .

The use of CF ensures possibility of optimum feeds S_{oCF} and cutting speed V_{oCF} rise in comparison with optimum cutting regimes S_o and V_o at machining without CF.

Table 1. Factors of temperature lowering K_O for different CF

| Machining material | Factors of temperature lowering K_O for different CF: | | |
|----------------------|---|-----------|-------|
| | Acvol-2 | Ukrinol-1 | MR-1y |
| Constructional steel | 0,85 | 0,82 | 0,78 |
| Stainless steel | 0,80 | 0,76 | 0,73 |

Table 2. Factors K_{MP} of cutting force lowering at rough turning for different CF

| Machining material | Factors of t cutting force lowering K_{MP} for different CF: | | |
|----------------------|--|-----------|-------|
| | Acvol-2 | Ukrinol-1 | MR-1y |
| Constructional steel | 1 | 0,95 | 0,85 |
| Stainless steel | 1 | 0,9 | 0,8 |

Table 3. Factors K_{MR} of machined surface roughness lowering at finish turning for different CF

| Machining material | Factors of machined surface roughness lowering K_{MR} for different CF: | | |
|----------------------|---|-----------|-------|
| | Acvol-2 | Ukrinol-1 | MR-1y |
| Constructional steel | 1 | 0,97 | 0,9 |
| Stainless steel | 1 | 0,95 | 0,85 |

Quantitatively the rise of machining productivity can be justified based on factor $K = S_{oCF}V_{oCF}/S_oV_o$. Ground fixed analytical dependences of optimum feeds S_o and cutting speed V_o on machining conditions, the factor of machining productivity rise at the expense of use CF for rough turning K_1 and finish turning K_2 is defined:

$$K_1 = \begin{cases} K_O^{-n_1} K_{MP}^{n_2} K_T^m, & \text{if } K_O \geq K_{O1}; \\ \left(\frac{C_V K_V K_T^m}{T^m t^{x_v}} \right) \left(\frac{C_\theta K_\theta}{\theta t^{-x_t}} \right)^{n_1} \left(\frac{C_P K_P t^{(x_p - 0,77)}}{34 C^{1,25} K_\phi^{0,8}} \right)^{n_3} \end{cases} \quad (6)$$

$$n_1 = \frac{1}{z_t}; \quad n_2 = \frac{y_t - z_t}{y_p z_t};$$

$$n_3 = \frac{y_v z_t - y_t}{y_p z_t}$$

$$K_2 = \begin{cases} K_O^{n_4} K_{MR}^{n_5} K_T^m, & \text{if } K_O \geq K_{O2} \\ \left(\frac{C_V K_V K_T^m}{T^m t^{x_v}} \right)^{n_6} \left(\frac{C_\Theta K_\Theta}{\Theta t^{-x_t}} \right)^{n_7} \left(\frac{R_a}{k_0 K_R} \right)^{n_8} \end{cases} \quad (7)$$

$$n_4 = \frac{k_1 - k_3}{y_t k_3 - z_t k_1}; \quad n_5 = \frac{y_t - z_t}{y_p z_t};$$

$$n_6 = \frac{k_1 - k_3}{k_1 - y_p k_3}; \quad n_7 = \frac{k_3 - k_1}{y_t k_3 - z_t k_1};$$

$$n_8 = \frac{(y_p z_t - y_t)(k_1 - k_3)}{(y_t k_3 - z_t k_1)(k_1 - y_p k_3)}.$$

where $K_{O1} = \Theta/\Theta_{o1}$, $K_{O2} = \Theta/\Theta_{o2}$ – the factor considering cooling action of CF, which defines a limiting value for which it is necessary to consider temperature limitation.

Graphs of dependence of factors K_{O1} and K_{O2} on cutting feed t and machined surface roughness R_a (in the conditions of the machining, specified earlier) for different values tool life T are reduced on figure 2.

The factors considering cooling action of CF, which defines a limiting value, for which it is necessary to consider temperature limitation, are higher than cutting depths at rough turning (figure 2, a) and machined surface roughness at finish turning (figure 2, b) are higher.

With the use of the known normative information [6] the factors of machining productivity rise for different steels: steel 45, steel 30XГC, stainless steel X18H9T can be presented:

$$K_{1st45} = \begin{cases} K_O^{-2,6} K_{MP}^{-0,17} K_T^{0,2}, & K_O \geq K_{O1st45}; \\ 2,6 K_T^{0,23} / T^{0,2} t^{0,28}, \end{cases}$$

$$K_{2st45} = \begin{cases} K_O^{-3,0} K_{MR}^{-0,06} K_T^{0,2}, & K_O \geq K_{O2st45}; \\ 1,24 K_T^{0,23} R_a^{0,9} / T^{0,2} t^{0,15}, \end{cases}$$

$$K_{1st30XGC} = \begin{cases} K_O^{-2,6} K_{MP}^{-0,17} K_T^{0,2}, & K_O \geq K_{O1st30XGC}; \\ 3,4 K_T^{0,23} / T^{0,2} t^{0,28}, \end{cases}$$

$$K_{2st30XGC} = \begin{cases} K_O^{-3,0} K_{MR}^{-0,06} K_T^{0,2}, & K_O \geq K_{O2st30XGC}; \\ 2,14 K_T^{0,23} R_a^{0,9} / T^{0,2} t^{0,15}, \end{cases}$$

$$K_{1stX18H9T} = \begin{cases} K_O^{-2} K_{MP}^{-0,5} K_T^{0,25}, & K_O \geq K_{O1stX18H9T}; \\ 4,4 K_T^{0,29} / T^{0,25} t^{0,2}, \end{cases}$$

$$K_{2stX18H9T} = \begin{cases} K_O^{-2} K_{MR}^{-0,17} K_T^{0,25}, & K_O \geq K_{O2stX18H9T}; \\ 3,25 K_T^{0,29} R_a^{0,3} / T^{0,25} t^{0,3}. \end{cases}$$

The results of estimation of possibilities of the turning productivity rise with the use of technological cutting fluid based on presented method are reduced on figure 3-5.

Graphs of dependence of factors of machining productivity rise K_1 and K_2 on factor of temperature lowering K_0 considering cooling action of CF at rough and finish turning of different steels are reduced on figure 3.

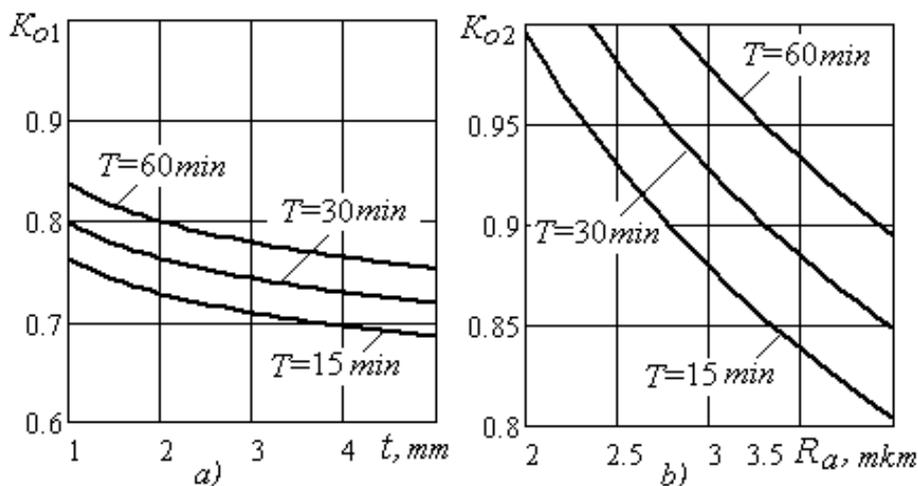


Figure 2. Graphs of dependence of factor K_{O1} and K_{O2} on cutting feed t at rough turning – a) and on machined surface roughness R_a at finish turning – b)

The machining productivity with use of CF rises in connection with reduction of factor of cutting temperature lowering to the level defined by removal of temperature limitation and then productivity remains constant. The subsequent change of factor of cutting temperature lowering becomes inexpedient from the point of view of machining productivity rise.

The greatest increasing of the productivity can be reached for stainless steel X18H9T at finish turning. Graphs of dependence of factor of machining productivity rise K_1 and K_2 on factor of temperature lowering K_0 for different factors K_{MP} and K_{MR} which takes into account the oiling properties of CF for cutting force at rough turning and machined surface roughness at finish turning are reduced on figure 4.

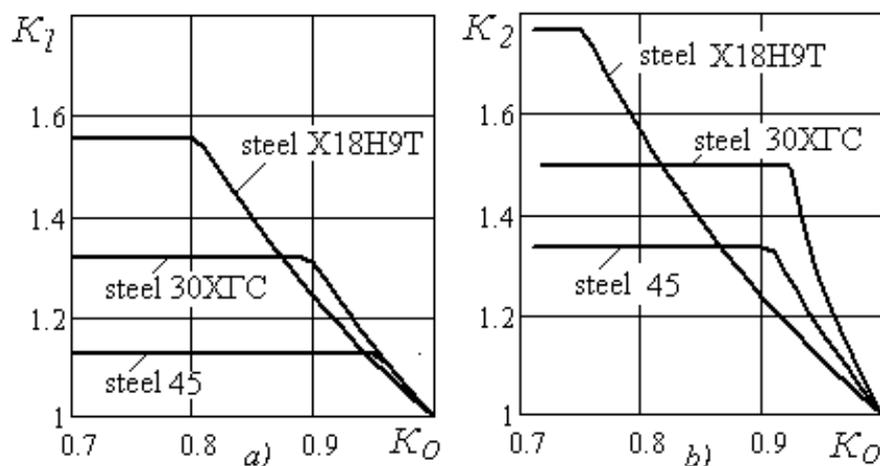


Figure 3. Graphs of dependence of factors of machining productivity rise K_1 and K_2 on factor of temperature lowering K_0 for different steels at rough turning – a) and finish turning – b)

Machining productivity is higher than factors K_{MP} and K_{MR} are less that corresponds to higher oiling properties CF. The greatest increasing of the productivity can be reached at value factors K_{MP} which takes into account the oiling properties of CF for cutting force at rough turning (figure 4, a) and small value factors K_{MR} which takes into account the oiling properties of CF for machined surface roughness at finish turnings (figure 4, b).

Graphs of dependence of factor of machining productivity rise K_1 and K_2 on factor of temperature lowering K_O for different cutting depth at rough turning and machined surface roughness at finish turning are reduced on figure 5.

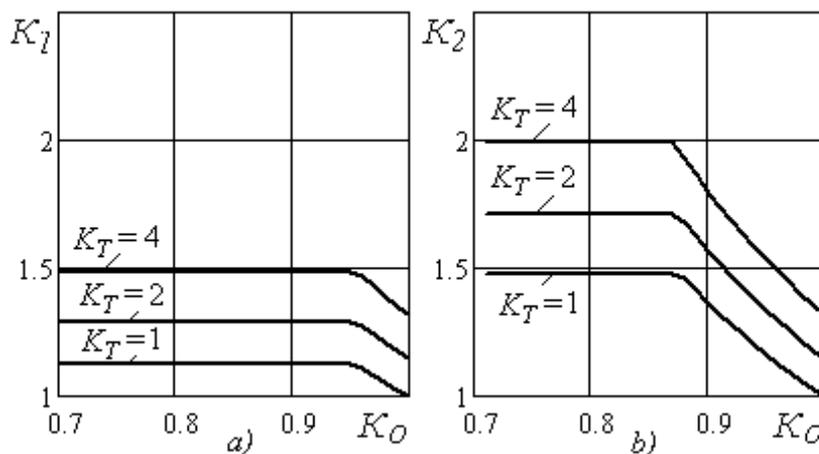


Figure 4. Graphs of dependence of factors of machining productivity rise K_1 and K_2 on factor of temperature lowering K_O for different factors K_T , which takes into account the increase of coated carbide cutting tool life at rough – a) and finish – b) turning steel 45

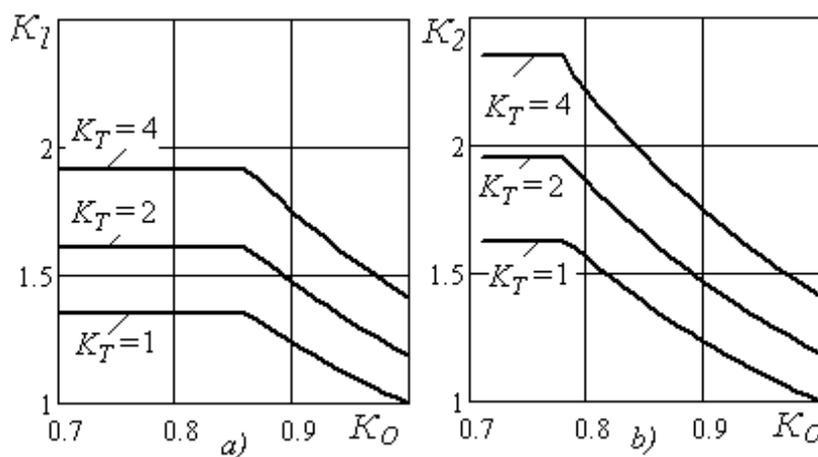


Figure 5. Graphs of dependence of factors of machining productivity rise K_1 and K_2 on factor of temperature lowering K_O for different factors K_T , which takes into account the increase of coated carbide cutting tool life at rough – a) and finish – b) turning steel X18H9T

Machining productivity is higher than cutting depths at rough turning and machined surface roughness at finish turning are higher. The greatest increasing of the productivity can be reached at great values of cutting depth (figure 5, a) and great values of the machined surface roughness (figure 5, b).

The results of estimation of possibilities of the turning productivity rise with the use of coated carbide cutting tools based on the presented method for different steels are reduced on

figure 6 and figure 7.

Machining productivity is higher than factors K_T , which takes into account the increase of coated carbide cutting tool life, are higher. The greatest increasing of the productivity can be reached at finish turning.

3. Conclusion

As a result of the conducted research, a methodology for optimizing turning parameters based on the criterion of maximum productivity has been developed. The approach incorporates the application of coated carbide cutting tools and technological cutting fluids. A mathematical model of the turning process was formulated, accounting for constraints imposed by permissible cutting temperature. Using linear programming techniques, analytical relationships describing the optimal cutting conditions as functions of the principal turning parameters were derived.

A productivity enhancement factor was introduced to quantitatively reflect the combined effects of increased tool life of coated carbide inserts, as well as the cooling and lubricating performance of technological cutting fluids. The influence of temperature reduction – considering both the thermo-physical properties of the cutting fluid and the characteristics of coated carbide tools for different steel grades – on the productivity growth factor was established.

An assessment of the potential productivity gains achievable through the application of coated carbide tools and cutting fluids under various turning conditions was performed. The results demonstrate that productivity improvements for all investigated steels are more significant in finish turning than in rough turning, reaching up to 30%. Moreover, greater productivity growth was observed in machining stainless steel X18H9T compared to structural steel 45, with increases of up to 25% under both rough and finish turning conditions.

The maximum productivity gain was achieved in finish turning operations with the combined use of coated carbide tools and technological cutting fluids: up to 2.5-fold for stainless steel X18H9T and up to twofold for structural steel 45.

The proposed method can be applied to evaluate the potential for productivity enhancement across various machining scenarios involving coated carbide cutting tools and technological cutting fluids.

REFERENCES:

1. Vereschaka A. S., Kushner V.S. Cutting of materials. Moscow: Higher school, 2009.
2. Starkov V. K. Machining. Management by stability and quality in the automated production. Moscow: Mechanical engineering, 1989.
3. Ivchenko T. G. Calculation of thermal streams and cutting temperatures at turning with the use of technological cutting fluid, Reliability of cutting tool and optimization of the technological systems. Kramatorsk: DDMA 26, P 90-96.
4. Bogouslavskiy V., Ivchenko T. Optimization of cutting regimes at application of technological cutting fluid. International journal of modern manufacturing technologies. 2011, 3, P 15-20.
5. Ivchenko T. G. Increase of the turning productivity with the use technological cutting fluid. Progressive technologies and systems of engineer. Progressive technologies and systems of engineer. Donetsk: DonNTU. 2013, 45, P 112-117.

Поступила в редколлегию 22.05.2025 г.

УДК 621.793.71

F. I. Panteleenko, a member- correspondent. NAN B, Ph. D., Professor, **V. A. Okovity**, Ph. D., **O. G. Devoino**, Ph. D., Professor, **V. V. Okovity**, **A. A. Litvinko**, Ph. D., **T. I. Bendik**, Ph. D., **V. Yu. Sereda**

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Tel. / Fax+375 17 293-95-99, E-mail: niil_svarka@bntu.by

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR THE FORMATION OF BORIED POWDER FOR PLASMA SPRAYING OF NICKEL ALLOY

The article describes the choice of the method and medium for diffusion alloying of nickel alloy powders. One of the main and most effective ways to protect parts from high-temperature corrosion and oxidation is to create a nickel-based plasma coating system on their working surface. Their performance properties depend on the order of distribution of γ' - and β - phases in the formed γ -solid solution. In the technologies for creating heat-resistant coatings based on nickel, a whole range of alloying materials (zirconium, tungsten, molybdenum, rhenium, hafnium, niobium, tantalum, vanadium, etc.) are introduced into these systems to further improve performance properties. They affect the thermal stability of the precipitates of the strengthening γ' - phase. Carbon and boron are also introduced, promoting the formation of carbide and boride phases, increasing fracture toughness, creep time, and long-term strength period. Based on a number of advantages (simplicity, general availability, reliability of the technology, high stability of results, possibility of repeated use of the saturating medium) for diffusion saturation of powders based on nickel alloys in order to ensure high performance properties, the method of saturation in powder media of boron and silicon carbides was selected. It was found that from the point of view of ensuring the stability of the shell thickness, good fluidity and stability of the dispersion composition, the best ratio of the saturating medium to the saturated one is in the range of 4:1, the ratio in the saturating medium is B₄C-SiC (40%:60%) with approximate equality of particle sizes and their size of 40-60 μm , and sodium fluorides in an amount of 1-1.5% are most suitable as an activator.

Keywords: nickel-based plasma coatings, method and environment for diffusion alloying of nickel alloy powders, diffusion saturation of powders, study of structure and properties, performance characteristics.

Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, А. А. Литвинко, Т. И. Бендик, В. Ю. Середя, В. В. Оковитый

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ БОРИРОВАННОГО ПОРОШКА ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

В статье описаны выбор метода и среды для диффузионного легирования порошков никелевых сплавов. Одним из основных и наиболее эффективных способов для защиты от воздействия высокотемпературных коррозии и окисления деталей является создание на их рабочей поверхности системы плазменных покрытий на никелевой основе. Их эксплуатационные свойства зависят от порядка распределения в сформированном γ -твердом растворе γ' - и β - фаз. В технологиях создания жаропрочных покрытий на базе никеля, для дальнейшего улучшения эксплуатационных свойств в данные системы вводят целый спектр легирующих материалов (цирконий, вольфрам, молибден, рений, гафний, ниобий, тантал, ванадий, и др.) Они оказывают влияние на термоустойчивость выделений упрочняющей γ' - фазы. Вводят также углерод и бор, способствующими образованию карбидных и боридных фаз, повышающие вязкость разрушения, время ползучести, период длительной прочности. Исходя из ряда преимуществ (простота, общедоступность, надежность технологии, высокая стабильность результатов, возможность многократного использования насыщающей среды) для диффузионного насыщения порошков на основе никелевых сплавов с целью обеспечения высоких эксплуатационных свойств выбран метод насыщения в порошковых средах карбидов бора и кремния. Установлено, что с точки зрения обеспечения стабильности толщины оболочки, хорошей текучести и устойчивости дисперсионного состава наилучшим является соотношение насыщающей среды к насыщаемой в интервале 4:1, соотношение в насыщающей среде B₄C-SiC (40%:60%) при примерном равенстве размеров частиц и их величине 40-60 мкм, а в качестве активатора наиболее целесообразны фтористые натрий в количестве 1-1,5%.

© Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Litvinko A. A., Bendik T. I., Sereda V. Yu.; 2025

Ключевые слова: плазменных покрытий на никелевой основе, метод и среда для диффузионного легирования порошков никелевых сплавов, диффузионное насыщение порошков, исследование структуры и свойств, эксплуатационные характеристики.

1. Introduction

Since the beginning of the 21st century, the use of thermal spray coatings to improve the quality of parts in various industries has become the norm. If at first thermal spraying technologies for restoration or strengthening were used for important or expensive parts due to the high cost of high-quality materials, the complexity of technological processes, the need for qualified personnel, problems with subsequent processing, then after many years of development in the technological and theoretical aspects of this area, they have become more accessible. New types of spraying have been developed - high-speed, hybrid, plasma spraying technologies in air and vacuum have been improved, methods for feeding small and submicron powder materials have been developed, processes for subsequent high-energy processing have been developed, modern spraying equipment has been automated and computerized, i.e. thermal spraying processes are becoming standard. At present, in the Republic of Belarus, restoration and strengthening technologies are used in various industries for a wide range of industrial equipment parts. The main characteristics of coatings that determine their high-quality use are operational: hardness, adhesive and cohesive strength of adhesion, porosity. However, a number of questions remain regarding the application of these technologies, especially in agriculture. As a rule, the indicators of reducing the cost of restoration and strengthening processes come first, the acquisition of high-quality powder materials is difficult, and technological equipment has a long service life. It is necessary to create materials, if possible, on a local raw material base or from inexpensive components that are available and relatively inexpensive for applying wear-resistant and corrosion-resistant coatings that operate under high-temperature conditions. One of the main and most effective methods for protecting parts from high-temperature corrosion and oxidation is the creation of a nickel-based plasma coating system on their working surface. Their operational properties depend on the order of distribution of γ' - and β - phases in the formed γ - solid solution. In the technologies of creating heat-resistant coatings based on nickel, for further improvement of operational properties, a whole range of alloying materials (zirconium, tungsten, molybdenum, rhenium, hafnium, niobium, tantalum, vanadium, etc.) are introduced into these systems. They affect the thermal stability of the precipitates of the strengthening γ' phase. Carbon and boron are also introduced, promoting the formation of carbide and boride phases, increasing the fracture toughness, creep time, and the period of long-term strength.

2. Selection of the method and environment for diffusion alloying of nickel alloy powders

Analysis of existing methods and techniques of boriding processes shows that the most common is processing in powder media [1-15] due to its manufacturability and applicability for processing powder materials [9, 10]. Boriding in liquid media is unacceptable due to the problems of extracting processed powder materials from melts and cleaning them; boriding in liquid media is unacceptable. Application in industry of processing in electrolyte solutions has not found due to its non-ecological friendliness. Due to the complexity of the equipment, low reliability and instability of the results of the technology - the explosion hazard of boriding in gaseous environments has also not found wide application. Boriding using technical boron carbide powder as a saturating medium has a number of qualitative advantages due to general availability, simplicity and reliability of the technology, high stability of the results, the possibility of repeated use of materials of the saturating medium. For the diffusion alloying meth-

od, we selected technical boron carbide powders as the main boron-containing components, and for borosilicate coating, the silicon-containing saturating component is silicon carbide in powder mixtures [8-10]. To conduct preliminary studies for borosilicate coating, the ratio of boron carbide and silicon powders was 40:60 [1, 2]. Further, it was assumed that it was necessary to optimize the compositions of the saturating medium and the conditions during diffusion processing. The important role of the ratio in the powder mixture of the saturating and saturating media is known. Their optimal ratio was established empirically at constant temperature-time values (Figure 1). From Figure 1 it is evident that the formation of a continuous boride layer on the M-roll powder material is observed when the amount of boron carbide is 4 times or more greater than the amount of metal powder in the mixture. A smaller amount does not ensure the formation of a continuous boride layer, which subsequently causes the formation of low-quality coatings. With an increase in the proportion of boron carbide from 4 to 5 parts, the power of the diffusion source increases, and the growth of the continuous borated layer is activated. At ratios of 5:1 and higher, the growth of the diffusion layer stabilizes. Based on the fact that with a further increase in the proportion of the saturating medium, the proportion of metal powder decreases and the productivity of the process for obtaining borated powder material decreases, we refused to further increase the proportion of the saturating medium. The study of the effect of the ratio of components in the powder mixture on fluidity also showed that with an increase in the proportion of metal powder over 25%, fluidity deteriorates sharply (Figure 2). This pattern occurs with an insufficient amount of boron carbide in the mixture, in which case the particles of the metal powder sinter together. The results of chemical-thermal treatment directly depend on the particle sizes of the powder media [14, 15].

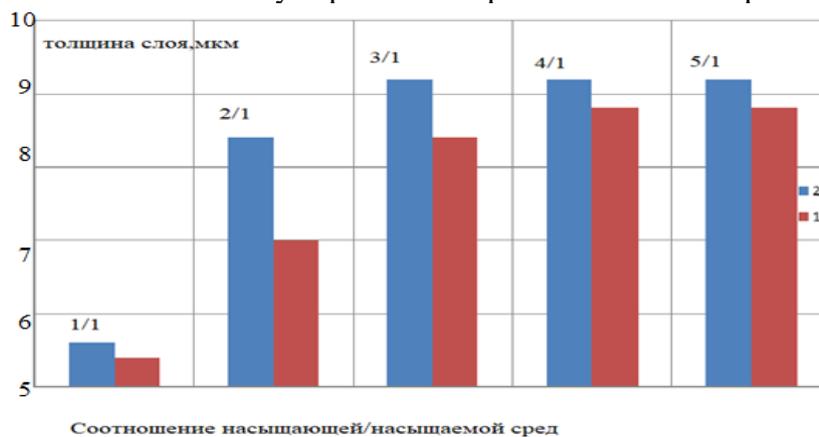


Figure 1. Effect of the ratio of the saturating and saturable media during boriding of nickel-chromium-aluminum-yttrium (1) and nickel-cobalt-chromium-aluminum-yttrium (2) powders for 2 hours at 900°C on the thickness of the continuous diffusion layer

Studies of the effect of the particle sizes of the saturating and saturable media on the thickness of the diffusion layer on spheroidized metal powder (Figure 3) have proven that the best results are obtained with equal particle sizes constituting the powder mixtures. In this case, the size of the powder particles should be within 40-60 μm . Reducing the size of the powder particles to less than 40 μm reduces the thickness of the resulting layer due to deterioration in the gas permeability of the powder mixture for moving the vapor-gas phase with boron halides. At particle sizes over 60 μm , due to the decrease in the total surface area of the powder particles of boron carbide and metal powder, the process of formation of boron halides and the amount of boron itself capable of diffusion decrease. An important characteristic of the technology is the possibility of multiple use of the saturating mixture. The study of the

frequency of use of the saturating mixture made it possible to establish the following pattern. With an increase in the frequency of use of the powder mixture, the proportion of the fine fraction of boron carbide (less than 40 μm) increases and the flowability of the powder worsens (Figure 4).

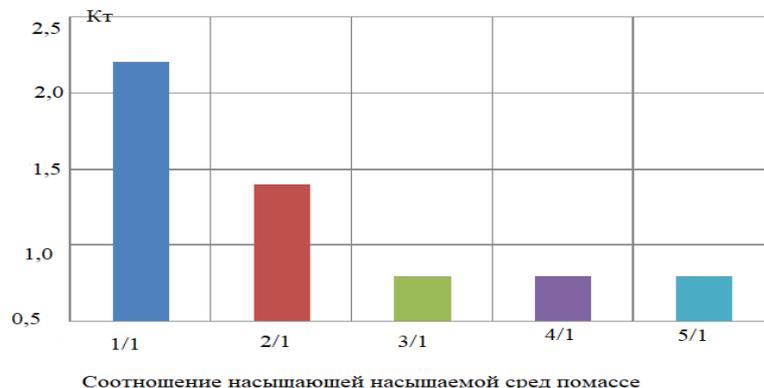
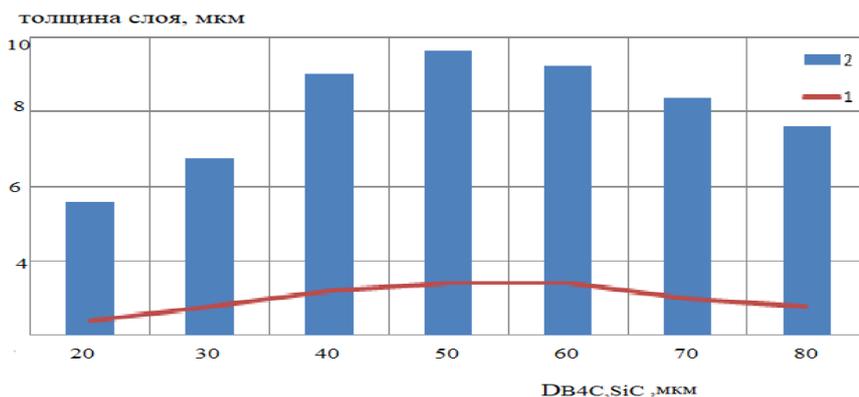


Figure 2. Effect of the mixture component ratio on the fluidity of the processed nickel-chromium-aluminum-yttrium powder (T=9000, t=2h)



a)



б)

Figure 3. Effect of the particle size of the powder medium on the thickness of the diffusion layer during boriding of nickel-chromium-aluminum-yttrium powder for 2 hours at a temperature of: 1 – 800°C; 2 – 900°C a – saturating medium; b – nickel-chromium-aluminum-yttrium powder

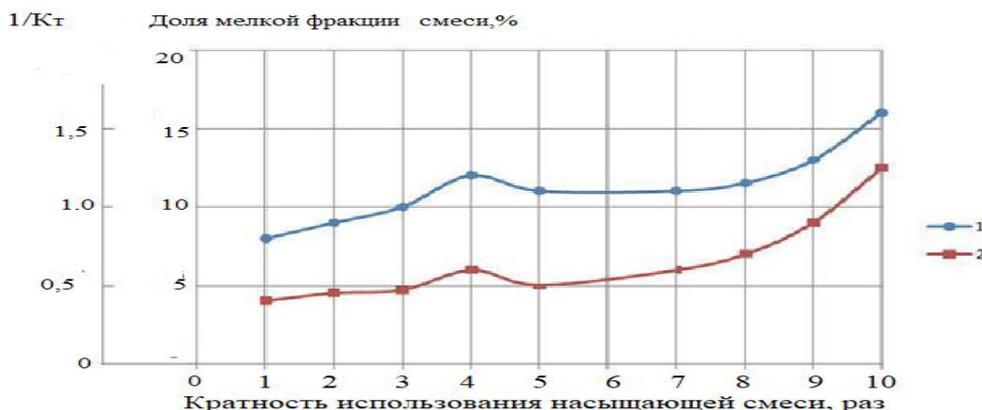


Figure 4. Effect of multiplicity when using a saturating powder mixture without regeneration on the particle size of the saturating mixture (1) and the flow properties of the processed nickel-chromium-aluminum-yttrium powder (2)

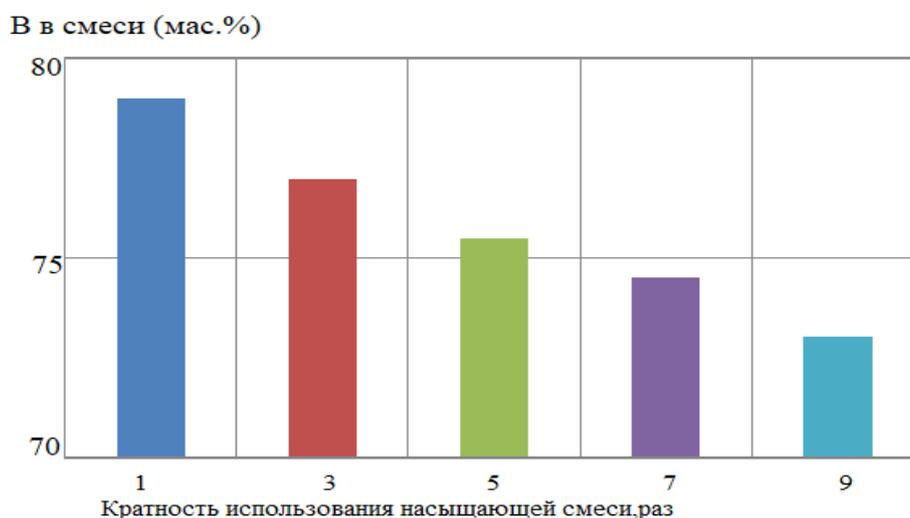


Figure 5. Effect of multiplicity when using a powder mixture on the boron content in it

The grinding of the boron carbide powder occurs due to its interaction with activating halides, with oxygen and the gradual transformation of a certain part into volatile compounds with the corresponding depletion of the powder in boron (Figure 5). A sharp increase in the proportion of fine fraction occurs after 6-7 times the mixture is used (without regeneration). The nature of the effect of multiplicity on the fluidity (see Figure 5) of the processed powder is similar; a study of the appearance of the powder material using a microscope indicates the sintering of the smallest particles of boron carbide to the metal powder of the m-croll (Figure 6, a).

This is additionally confirmed by the increase in the integral hardness of the layer sprayed from the processed powder with a decrease in the thickness of the diffusion layer on the powder and its microhardness (Figure 7). Before the six-fold use of the saturating powder mixture, there is some increase in the thickness of the diffusion layer on the powder material, caused by an increase in the reaction surface of boron carbide. Then, when using the mixture and grinding it, there is a decrease in the thickness of the diffusion layer with a decrease in the amount of boron in the saturating mixture, which is caused by a decrease in the gas permeability of the mixture. A decrease in the supply of boron halides to the processed surface of the

metal powder causes a simultaneous decrease in both the proportion of the high-boron phase in the diffusion layer itself on the powder material and the microhardness of the diffusion layer (see Figure 7). Therefore, the main factor limiting the frequency of use of boron carbide is grinding and, accordingly, deterioration of the technological and physical-mechanical properties of the processed powder. Accordingly, it is advisable to use the saturating mixture without regeneration no more than 6-7 times. After that, the resulting small fractions are screened out with further use of the mixture. The effect of the activator on the results of diffusion processing of metal powder was studied. Sodium fluoride, aluminum fluoride and ammonium chloride were taken as activators (Figure 8).

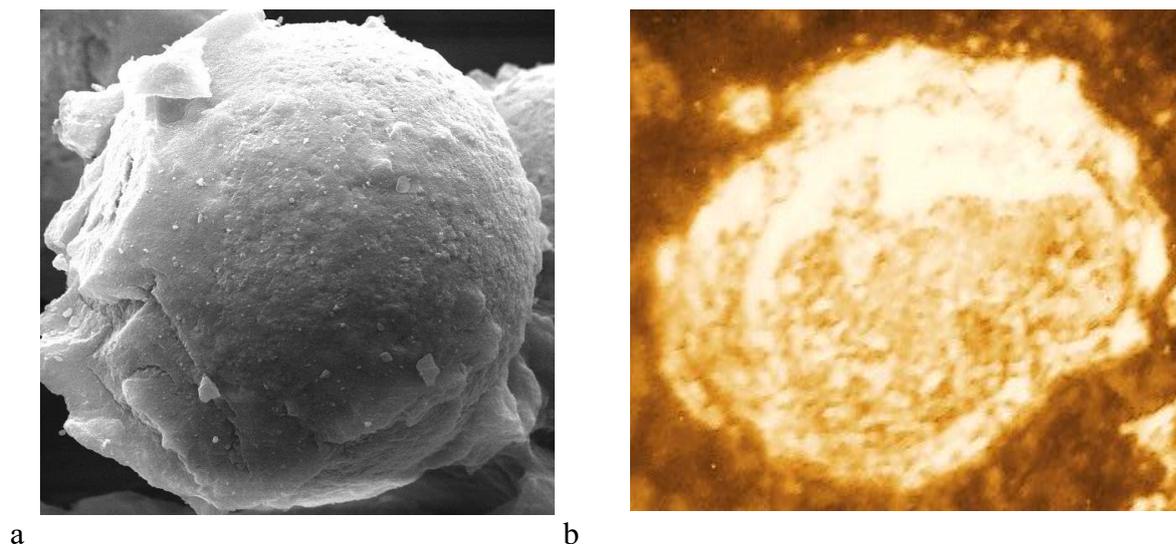


Figure 6. Appearance a) and microstructure b) of diffusion-alloyed NiCrAlY powder (x300)

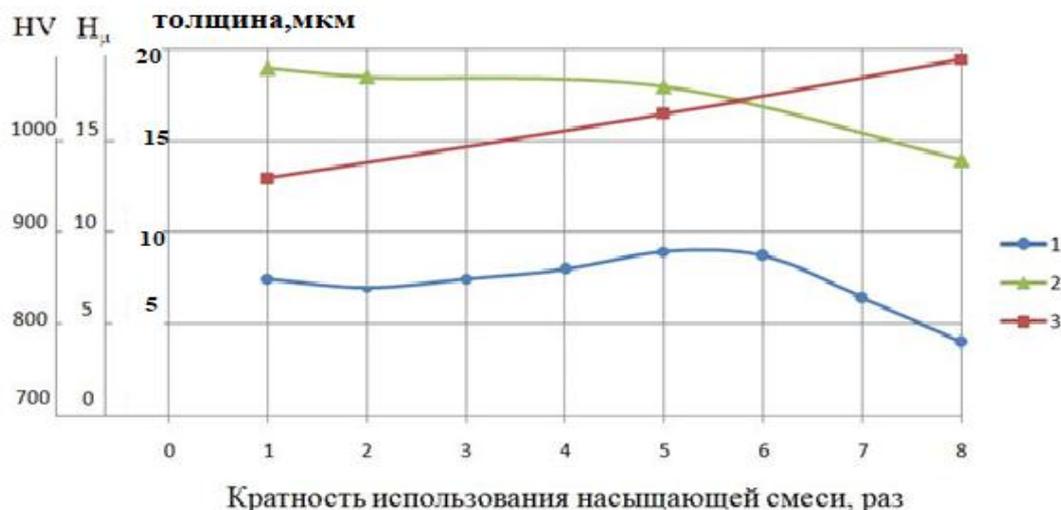


Figure 7. Effect of multiplicity when using a powder mixture on the thickness (1), microhardness of the boride layer on nickel-chromium-aluminum-yttrium powder (2) and on the hardness of the sprayed layer (3)

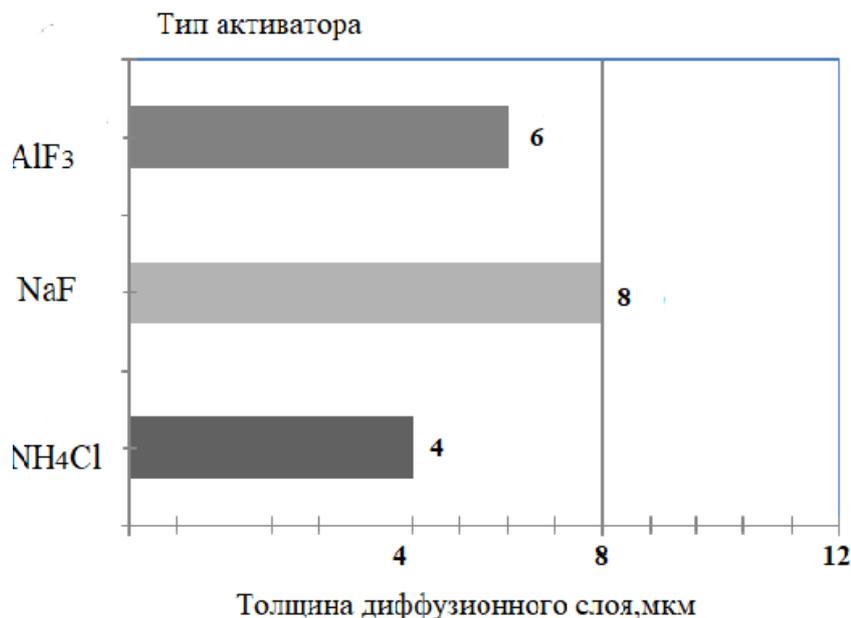


Figure 8. Effect of the type of activator on the thickness of the diffusion layer when boriding m-grain for 2 hours at a temperature of 950°C

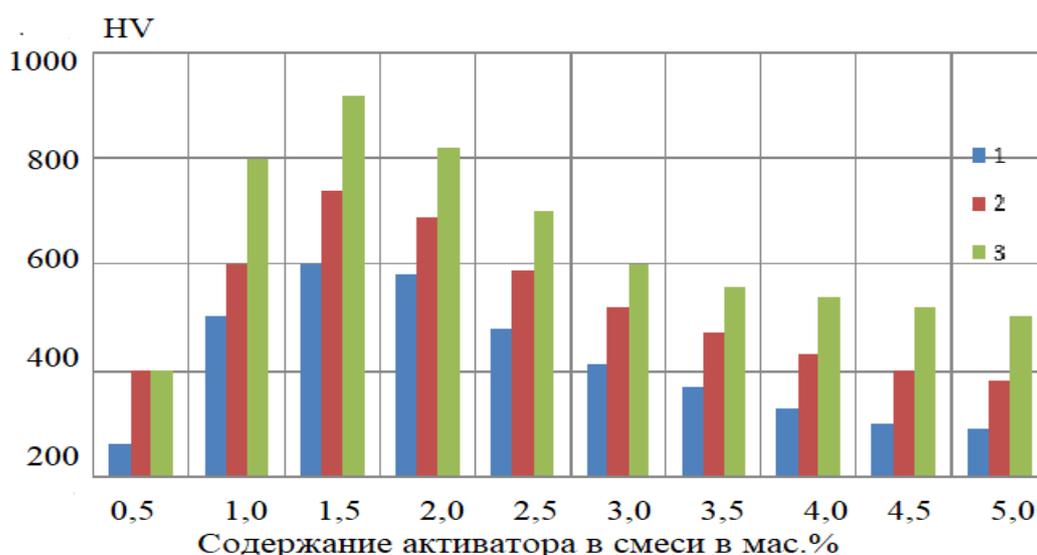


Figure 9. Effect of the activator type 1 – NH₄Cl; 2 – NaF; 3 – AlF₃, its amount in the mixture (b) on the hardness of the sprayed layer during boriding of m-roly for 2 hours at a temperature of 950°C

The best results were obtained when using sodium fluoride and aluminum fluoride as activators (Figure 9) in an amount of no more than 1-2%. The activator - ammonium chloride shows a good result in terms of layer thickness during diffusion treatment in the mixture, but has a number of significant drawbacks: the dispersion of boron carbide powder worsens and increases due to corrosion by chlorides, with repeated use of mixtures their gas permeability worsens, the surface of the metal powder is deformed, its fluidity is worse, and the tendency to corrosion increases upon contact with the atmosphere. The main reason for the increase in intensity when adding 1-2% of the activator of diffusion saturation of the powder is the pres-

ence of a sufficient amount of boron fluorates formed in the powder mixture, actively transporting boron to the saturated surface of the m-roll. In the absence of sodium fluoride in the mixture, B_2O_3 , contained in an amount of up to 3.5 wt.% in boron carbide, can play a significant role of the activator. The scheme of the installation for diffusion boriding is shown in Figure 10. In accordance with the previously conducted studies, we optimized the boriding duration, temperature conditions, the ratio of the components of the working mixture during boriding in a rotating container, and the rotation frequency of the container. Mixing of the components of the powder mixture is best carried out for 20-30 minutes in drum-type mixers at a rotation speed of 60-100 rpm. The optimal rotation frequency of the container n , ensuring maximum mixing of the working mixture during boriding of powders, was determined based on the source [13]. According to the calculation results using the dependence from the source, the value of n , consistent with the capabilities of the installation, should be 60-100 rpm. The prepared powder mixture is packed in a container. The container is sealed by backfilling with layers of boron carbide and silicon carbide. When heated at temperatures of 600-700°C, boron carbide reacts with oxidizing silicon carbide and creates a sintered layer of borosilicates sealing the container. The studies have shown that the rate of formation of diffusion layers at a temperature below 800°C is low to create the required properties in the powder (experiments were carried out in the range of 700-1000°C at 25°C and holding for 3-4 hours). Therefore, heat treatment was carried out at 850-1000 °C for 3-4 hours. Further increase in temperature is impractical, since there is a decrease in the significance for activation of cyclic deformation-recrystallization processes in the mobile working mixture during boriding. After the processing, the container was cooled, opened and the mixture was subjected to magnetic separation. The isolated diffusion-alloyed m-krol powder was used to obtain sprayed coatings, and the saturating medium was reused. The appearance of the obtained diffusion-alloyed powder material is shown in Figure 6, a. As can be seen from Figure 6, b in section, each powder particle is formed from a core and a diffusion layer of a certain thickness and phase composition. The thickness of the diffusion layer, its structure, phase, chemical composition for each type of powder material depend on the type of saturating mixture, process temperature and duration of diffusion treatment. It is clear that the technological properties of the obtained powder materials also depend on the parameters listed above.

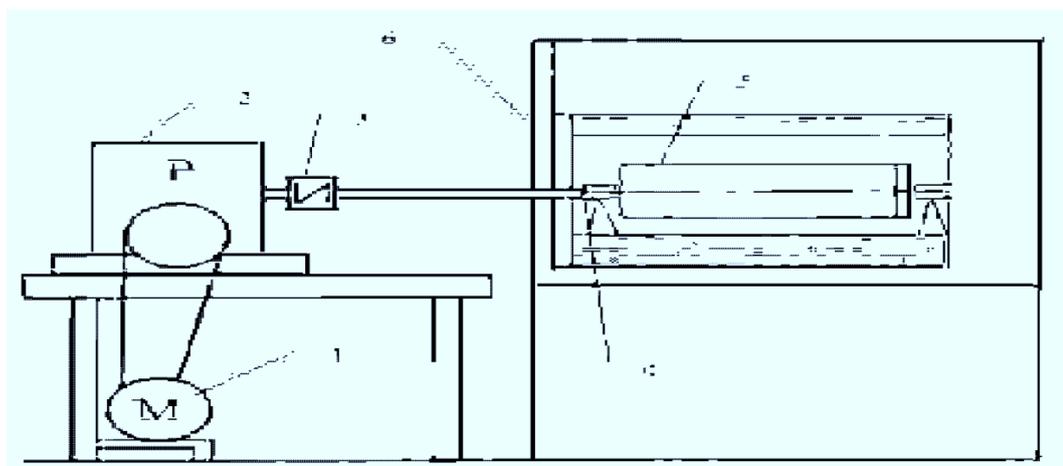


Figure 10. Scheme of the setup for diffusion borating of powders 1 – engine; 2 – reducer, variator; 3 – cardan coupling; 4 – supports; 5 – container; 6 – furnace

Concerning the ratio of components in the working mixture - to form thin-film ceramic shells with a thickness of about 8-10 μm (according to the accepted criterion) on the particles of the powder material, it is necessary to significantly reduce the proportion of the saturating medium. Experiments have shown that the ratio of the volumes of the saturated powder and the saturating medium (99% amorphous boron, 1% sodium fluoride) should be fixed at the level of 1 – 3. This composition of the working mixture was placed in a sealed container made of heat-resistant steel. The degree of filling the container with the powder mixture was selected taking into account the recommendations of the source [13] and was approximately 70%. Borating of powder materials was carried out at different durations (τ) with analytics of the change in the thickness of the diffusion shell. The results of the conducted research are presented in Table 1.

Table 1. Results of the study on the optimization of the boriding process

| Composition of the powder material | Thickness of the diffusion shells, μm | | |
|---|--|----------------|----------------|
| | $\tau = 2,0$ h | $\tau = 3,0$ h | $\tau = 4,0$ h |
| Nickel-chromium-aluminum-yttrium | 4,9 | 6,3 | 8,4 |
| Note – The table provides average data on the thickness of the shells | | | |

As can be seen from Table 1, the averaged data on the shell thickness indicate that the optimal duration of boriding is 4.0 h. With this duration, a thickness of 8.4 μm is achieved, which corresponds to the adopted optimization criterion. At the same time, metallographic analysis of the powder particle sections showed that there is an increase in the interval in which the shell thicknesses obtained in one boriding duration mode are located. For example, for a duration of 2.0 h, a change in thickness from 3.8 to 4.9 μm was observed. It should be noted that the lower limit of this interval does not correspond to the optimization criterion. Thus, a duration of 2.0 h does not ensure stable formation of a sufficient thickness of the cladding shells. Therefore, the optimal duration of boriding is finally accepted as 3-4 h.

3. Conclusions

The method and medium for diffusion alloying of M-roll powders have been selected, and technological recommendations for boriding nickel M-roll have been developed. Based on a number of advantages (simplicity, general availability, reliability of the technology, high stability of results, the possibility of repeated use of the saturating medium) for diffusion saturation of powders based on m-rolays in order to ensure high performance properties, the method of saturation in powder media of boron and silicon carbides was selected. It was found that from the point of view of ensuring the stability of the shell thickness, good fluidity and stability of the dispersion composition, the best is the ratio of the saturating medium to the saturable one in the range of 4:1, the ratio in the saturating medium B4C-SiC (40%:60%) with approximate equality of particle sizes and their size of 40-60 μm , and sodium fluoride in an amount of 1-1.5% is most appropriate as an activator. It was revealed that 6-7 times the use of the saturating mixture without regeneration ensures stable results. However, its further use leads to deterioration of the technological and physical and mechanical characteristics of the processed powder due to significant grinding of the boron carbide powder. Regeneration consists of screening out the fine fraction (smaller than 40 μm). The highest stability of results in terms of the diffusion layer thickness is provided by saturating media containing 40...80% B4C, 20...60% SiC with a content of saturable powder based on m-rabbits of 25...33%.

REFERENCES:

1. Kh.G. Schmitt-Thomas, H. Haindl, D. Fu, Surf. Coat. Technol. 94-95 (1997) 149-154.
2. N. Czech, M. Juez-Lorenzo, V. Kolarik, W. Stamm, Surf. Coat. Technol. 108-109 (1998) 36-42.
3. F. Tang, L. Ajdelsztajn, G. E. Kim, V. Provenzano, J. M. Schoenung, Surf. Coat. Technol. 185 (2004) 228-233.
4. F. Tang, L. Ajdelsztajn, J. M. Schoenung, Oxid. Met. 61 (2004) 219-238.
5. Y. N. Wu, M. Qin, Z. C. Feng, Y. Liang, C. Sun, F. H. Wang, Mater. Lett. 57 (2003) 2404-2408.
6. T. A. Taylor, D. F. Bettridge, Surf. Coat. Technol. 86-87 (1996) 9-14.
7. T. A. Taylor, P. N. Walsh, Surf. Coat. Technol. 188-189 (2004) 41-48.
8. M. Limarga, S. Widjaja, T. H. Yip, Surf. Coat. Technol. 197 (2005) 93-102.
9. Kh. G. Schmitt-Thomas, M. Hertter, Surf. Coat. Technol. 120-121 (1999) 84-88.
10. J. Muller, D. Neuschütz, Vacuum 71 (2003) 247-251.
11. H. E. Sliney, Wide temperature spectrum self-lubricating coatings prepared by plasma spraying, Thin Solid Films 64(1979)211-217.
12. Kim, H. Choi, C. Han, S. Uhm, C. Lee, Characterization of atmospheric plasma spray NiCr-Cr₂O₃-Ag-CaF₂/BaF₂ coatings. Surf. Coat. Technol. 195(2005)107-115.
13. G. Bolelli. Thermal protective properties of the gradient ceramic coating NiCrAlY / Al₂O₃ are made by plasma spraying and spraying of a suspension/ G. Bolelli, A. Candelini//Wear 344-345.-2015. P. 69-85.
14. Choi H, Yoon B, Kim H, Lee C 2002 Surf. Coat. Tech. 150 297-308.
15. Li Z, Qian S and Wang W 2011 Appl. Surf. Sci. 257 -270.

Поступила в редколлегию 19.05.2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Глушко В. Ю., Михайлов Н. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗУБЬЕВ МУФТ ТРАНСМИССИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ. | 3 |
| Жарких Д. С., Михайлов А. Н. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПРИНЦИПИАЛЬНО-СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОТОЧНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ..... | 10 |
| Звягинцева А. В., Долженков С. В., Кульнева В. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ИЗ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ..... | 20 |
| Киселица Д. О., Михайлов А. Н. ЦИКЛОВАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПОТОЧНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ..... | 26 |
| Михайлов Н. В., Лахин А. М. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПО ПЯТНУ КОНТАКТА ЗУБЬЕВ МУФТЫ ПРИ БЛИЗКИХ РАДИУСАХ КРИВИЗНЫ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ ПЕРЕКОСОВ ОСЕЙ ВАЛОВ..... | 32 |
| Огренич Д. В. ОСОБЕННОСТИ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОТОЧНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ..... | 42 |
| Ivchenko T. G. THE ESTIMATION OF POSSIBILITIES OF THE TURNING PRODUCTIVITY RISE WITH THE USE OF COATED CARBIDE CUTTING TOOLS AND TECHNOLOGICAL CUTTING FLUID..... | 49 |
| Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Litvinko A. A., Bendik T. I., Sereda V. Yu. DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR THE FORMATION OF BORIED POWDER FOR PLASMA SPRAYING OF NICKEL ALLOY..... | 58 |

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

| | |
|-------------------|---------------|
| Глушко В. Ю. | 3 |
| Долженков С. В. | 20 |
| Жарких Д. С. | 10 |
| Звягинцева А. В. | 20 |
| Киселица Д. О. | 26 |
| Кульнева В. В. | 20 |
| Лахин А. М. | 32 |
| Михайлов А. Н. | 10, 26 |
| Михайлов Н. В. | 3, 32 |
| Огренич Д. В. | 42 |
| Bendik T. I. | 58 |
| Devoino O. G. | 58 |
| Ivchenko T. G. | 49 |
| Litvinko A. A. | 58 |
| Okovity V. A. | 58 |
| Okovity V. V. | 58 |
| Panteleenko F. I. | 58 |
| Sereda V. Yu. | 58 |

ПРАВИЛА

представления материалов в международный сборник научных трудов ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» «ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» издается с 1994 года. В этом сборнике публикуются ученые и специалисты более чем из 35 стран мира.

Сборник научных трудов является специальным изданием, научно-технические статьи которого проходят **обязательное рецензирование**. Данный сборник включен в следующие программы:

1. В сборнике могут публиковаться научно-технические статьи и результаты диссертационных работ.
2. Сборник включен в перечень ВАК.
3. Сборник имеет сайт <http://ptsm.donntu.ru> ДонНТУ, г. Донецк.
4. Сборник включен **базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)** и размещен на сайте НЭБ (Научная электронная библиотека, г. Москва, Россия, <http://elibrary.ru>)
5. Данный сборник имеет **международную индексацию ISSN 2073-3216** (печатная версия) и **ISSN 2518-7120** (сетевое издание)

Статьи представляемые в данный сборник должны отвечать следующим требованиям.

Содержание статей должно отражать новые достижения науки и техники в области машиностроения, их практическое значение, соответствовать технической направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

В статье должно быть кратко изложено то новое и оригинальное, что разработано авторами, показано преимущество перед аналогами предлагаемых разработок, описаны их особенности и практическая значимость. Результаты работы не должны представляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, за несоблюдение действующих стандартов и за недостоверность в статье данных полностью несут авторы статьи.

Присланные в редакционную коллегию статьи подвергаются обязательному рецензированию. Редакционная коллегия оставляет за собой право вносить в текст статьи изменения редакционного характера без согласования с авторами, а также не публиковать статьи, которые не отвечают нашим требованиям.

Языки представления рукописей: **русский и английский.**

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА

Тематика представляемых статей должна основываться на проблемах машиностроения (механики) и представляться в рамках следующих направлений:

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий машиностроения. Интегрированные технологии. Сборка в машино- и приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии. Гибридные и комбинированные технологии машиностроения. Наукоемкие технологии машиностроения.
2. Механизация и автоматизация производственных процессов машиностроения. Прогрессивное оборудование машиностроительных производств.
3. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления машиностроительным производством.

4. Проблемы создания и применения прогрессивных инструментов и инструментальных материалов в машиностроении.

5. Управление качеством продукции и технических систем машиностроения. Проблемы инженерии поверхностного слоя изделий.

6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.

7. Современные проблемы инженерии материалов. Упрочняющие технологии и покрытия изделий машиностроения. Наноматериалы и нанотехнологии в машиностроении.

8. Вопросы моделирования и расчетов сложных технологических систем машиностроения.

В рамках сборника можно представлять рекламу продукции, которая будет помещена после рукописей статей.

СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ

Научно-технические статьи, представляемые в данный сборник должны иметь следующие элементы:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, выделение нерешенных раньше частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;
- формулирование цели и постановка задач работы;
- представление основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов, формулирование рекомендаций;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Для принятия решения о включении материалов Вашей статьи в сборник необходимо выслать в адрес редакционной коллегии следующее:

- заявку и сведения об авторах статьи;
- материалы статьи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;
- все материалы отправляются по E-mail адресу: mntk21@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

1. Текст статьи выполняется объемом от 7 до 10 страниц (**обязательно полные страницы**), формат А4 (210x297 мм) с полями: верхнее и нижнее – 30 мм, а левое и правое - 25 мм. Страницы не нумеровать. Статьи оформить с применением редактора WinWord (не ниже версии 6,0) шрифтом Times New Roman, выполненным в соответствии с образцом оформления, межстрочный интервал - 1,0, шрифт – 12pt. Материалы представить в электронном виде.

2. Порядок оформления. Материалы должны отвечать следующей структурной схеме: УДК, инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (сокращение по ГОСТ 7.11 и 7.12), полное название организаций и стран, тел./факс, E-mail, название статьи, аннотация на языке статьи, ключевые слова, основной текст, заключение или выводы, список литературы, дополнительная аннотация на английском языке с ключевыми словами, внизу первой страницы необходимо указать авторский знак - ©. УДК печатать прописными (жирными) буквами в верхнем правом углу не отступая от верх-

него поля. На следующей строке слева жирными строчными буквами – **инициалы и фамилии** авторов с учеными степенями и званиями, на следующих строках – полное название *организаций и стран* (через запятую, слева). На следующей строке курсивом слева – тел./факс и *электронный адрес* одного из авторов. Через один интервал - название статьи, печатать прописными (жирными) буквами, без переносов, центрировать по ширине, максимально три строки. Через один интервал - аннотации с ключевыми словами (слово аннотация не пишется) на двух языках шрифтом 10 pt, курсивом. Через один интервал – материалы статьи, шрифт 12 pt (язык изложения – по выбору авторов, межстрочный интервал 1,0). Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Между соответствующими разделами статьи необходимо делать интервал. (См. образец оформления материалов). Абзац текста – 1,25.

3. Графический материал (рисунки, графики, схемы) следует выполнять в формате *.bmp, *.gif, *.psx, *.dwg, *.jpg - размерами не менее 60x60 мм внедренными объектами (по ходу материалов). Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте. Позиции на рисунке должны располагаться по часовой стрелке. Под каждым рисунком указывается его номер и название, например: Рисунок 3. Схема устройства. Текст названия рисунка группируется с рисунком. Каждый рисунок должен иметь один интервал сверху и снизу.

4. Формулы и математические знаки должны быть понятны. Показатели, степени и индексы должны быть меньше основных знаков и выполняться в соответствии с редактором формул Microsoft Equation. Формулы номеруются (справа в круглых скобках, не отступая от правого поля), только в том случае, если на них в тексте имеются ссылки. Между крайними знаками формулы и текстом должен выполняться один интервал. Формулы выполняются курсивом.

Стиль формул для Microsoft Equation: Full - 12 pt, Subscript/Superscript - 10 pt, Sub-Subscript/Superscript - 8 pt, Symbol - 12 pt, Sub-Symbol - 10 pt.

5. Все таблицы должны иметь название и порядковый номер и располагаться после упоминания по тексту, например: Таблица 2. Классификация муфт. Каждая таблица должна иметь один интервал сверху и снизу.

6. **Список литературы** должен быть приведен в конце статьи в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 . Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5, в том числе 3 источника должно быть представлены за последние 5 лет.

7. Файл со статьей необходимо назвать по фамилиям и инициалам авторов в соответствии с работой (например: Иванов И.И., Петренко П.П.)

8. Материалы статьи представляются в электронном виде.

9. Материалы, не отвечающие перечисленным требованиям и тематике данного сборника, а также поступившие в редакционную коллегию с опозданием, **опубликованы не будут.**

СТАТЬИ ДОЛЖНЫ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩУЮ СТРУКТУРУ:

1. **УДК** (Например, **УДК 621.01**) (располагать вверху справа, шрифт жирный, 12 pt).

2. **Инициалы и фамилии авторов** (слева, шрифт жирный, 12 pt), ученая степень и звание, затем на следующей строке - полное название *организаций и стран* (слева, 12 pt), на следующей строке – *Тел./факс и электронный адрес* (слева, курсив, 12 pt).

3. **Название статьи** (слева, шрифт жирный, 12 pt, максимум три строки).

4. Пустые строки, межстрочный интервал и размеры шрифта статьи. Пустые строки выполняются между названием статьи - вверху и внизу, перед соответствующими разделами работы (один пробел) и списком литературы, а также между дополнительной аннотацией вверху и внизу. Межстрочный интервал – **1,0**. Размер шрифта статьи - **12 pt**, размер шрифта аннотаций и авторского знака - **10 pt**.

5. Аннотации (Abstract) (слово аннотация не пишется), (курсив, 10 pt). Первая аннотация пишется на языке статьи, а вторая на английском, если статья на английском языке, первая аннотация пишется на английском языке, а вторая – на русском языке.

В аннотации приводятся краткие сведения о всей статье в целом на языке статьи. Объем аннотаций приблизительно до 10 строк, аннотация выполняется курсивом.

6. Ключевые слова (Keywords) (приводится 5-6 ключевых слов статьи), выполняются курсивом на следующей строке от аннотации. (курсив, 10 pt)

7. Введение (Introduction). (12 pt)

Во введении приводится аналитический (исторический) обзор современного состояния вопроса исследования, выполняется постановка проблемы исследования или показывается актуальность данного исследования (работы). Здесь нужно обязательно указать результаты последних исследований других авторов. А также сформулировать цель и задачи исследований.

8. Основное содержание и результаты работы (The main contents and outcomes of activity). (Авторы могут дополнять работу другими разделами) (12 pt).

В данном разделе излагаются и подробно разъясняются полученные авторами теоретические положения и практические результаты. Приводятся принятые гипотезы и используемые допущения, разъясняются малоизвестные термины, аббревиатуры и условные обозначения. Для теоретических положений приводятся их доказательства и необходимые математические преобразования. Для экспериментальных исследований кратко описываются методики их проведения, способы обработки данных и результаты проверок адекватности и достоверности результатов.

9. Авторский знак. Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Например: © Иванов И.И., Петренко П.П.; 2025 (10 pt).

10. Заключение (Conclusion) (12 pt)

В заключении излагаются выводы по полученным авторами результатам, описываются примеры их практического применения, предлагаются рекомендации относительно их использования, приводятся выводы, а также указываются перспективы дальнейших исследований по данной проблематике.

11. Литература (References). (12 pt)

Список литературных источников должен быть составлен в порядке ссылок на них. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5-6, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Российская Федерация, 283001, ДНР, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, кафедра «Технология машиностроения», Редакционная коллегия сборника «Прогрессивные технологии и системы машиностроения».

Тел.: +7 856 3010840, +7 856 3010805;

Тел. моб.: +7 949 306-08-79.

E-mail: mntk21@mail.ru <http://ptsm.donntu.ru>

Публикация статей в международном сборнике научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» - выполняется бесплатно.

Образец оформления материалов

УДК 621.85.05-034 (12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

И. И. Иванов, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР (12 pt)
Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия (12 pt)
Тел./Факс: +7 856 3050104; E-mail: tm@fimm.donntu.ru (курсив, 12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

ОСНОВЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СБОРОЧНЫХ СИСТЕМ (слева, 12 PT, ЖИРНЫМ, ЗАГЛАВИЕ МАКСИМУМ ТРИ СТРОКИ)

(пустая строка - 12 pt)

*В статье приведены данные по структурному синтезу сборочных
..... уравнений описывающих процесс сборки изделий. (курсив, 10 pt, до 10 строк).*

Ключевые слова: структура технологии, синтез, процесс, технология, сборка. (курсив, 10 pt, 5
...6 слов)

(пустая строка - 10 pt)

I. I. Ivanov, P. P. Petrenko (10 pt)
(10 pt)

BASES OF THE STRUCTURED SYNTHESSES OF THE ASSEMBLY SYSTEMS (10 pt)

*The efficient design of assembly machinery is vitally important
..... as noun description of functions of presented in the paper.*

Keywords: structured syntheses, process of the assembly, technological system. (курсив, 10 pt)

(пустая строка - 12 pt)

1. Введение (12 pt)

Сборочные системы являются сложными иерархическими системами. Одним из условий [1] повышения производительности ... сборочных технологических систем (рисунок 5). Технологические системы

(пустая строка - 12 pt)

2. Основное содержание и результаты работы (12 pt)

Для сборки изделий широко применяются технологические системы
информационные и другие потоки могут быть описаны следующим образом:

$$k_m = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (1)$$

где k_m - элемент множества;

© Иванов И.И., Петренко П.П.; 2022 (приводится внизу первой страницы статьи, 10 pt)

.....
..... позволили разработать общие алгоритмы функционирования системы.

(пустая строка - 12 pt)

3. Общий алгоритм и рекомендации (12 pt)

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм
..... основывается на итерационном подходе.

(пустая строка - 12 pt)

4. Цифровые модели (12 pt)

В работе разработаны цифровые структурно-логические модели структуры сборочных систем, выполненные с применением основных положений алгебры структур

(пустая строка - 12 pt)

5. Заключение (12 pt)

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов
..... отличительной особенностью данной методики.
2. Установить закономерности
..... позволили произвести процесс итерации.
3. Разработать рекомендации
..... внедрить на производстве.

(пустая строка - 12 pt)

ЛИТЕРАТУРА:

(центрировать, 12 pt, не менее 5 ... 6 библиографических источников)

1. Ким, И. П. Исследование эффективности роторных машин / И. П. Ким. – К: КПИ, 1985. – 123 с. ISBN 966-7907-22-8.
2. Устюгов, А. В. Надежность технологических машин / А. В. Устюгов. – Донецк: ДонНТУ, 1998. – 425 с. ISBN 966-7907-23-6.
3. Савельев, А. А. Сборка машин / А. А. Савельев – М.: Наука, 2009. - 342 с. ISBN 966-7907-26-9.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. ISBN 966-7907-24-4.
5. Базров, Б. М. Модульные технологии / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2000. – 368 с. ISBN 5-217-03061-5.
6. Сидоров, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Сидоров, А.Н. Алехин //Научно-технический журнал в машиностроении: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – М: Машиностроение. – 2024. - № 9. – С. 11-17.
7. Любшин, А. Н. Особенности полировки лопаток с коррозионными разрушениями покрытий / А. Н. Любшин, А. Н. Шейко, Б. Л. Недашковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2025. – Вып. 1 (25). – С. 207-212

пустая строка - 12 pt)

Поступила в редколлегию _____ (дата поступления статьи, 10 pt)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И
СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Выпуск 4 (91)' 2025

Главный редактор

д-р техн. наук, проф. А. Н. Михайлов

E-mail: tm@fimm.donntu.ru

Технический редактор Д. О. Киселица

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: Россия, ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ФГБОУ ВО
«ДонНТУ»,

+7 (856) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: Россия, ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58,
тел. +7 (949) 306-08-79, +7 (856) 301-08-05.

E-mail: tm@fimm.donntu.ru

Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики.