

ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

*Научно-методический журнал
Издается с октября 2001 г.*

Периодичность – 4 раза в год

4(69) 2020

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ВАЙТЕХОВИЧ П. Е. Мощность, затрачиваемая на измельчение в роliko-маятниковой мельнице с планетарным движением рабочего органа.....	5
КАРПИЕВИЧ Ю. Д. Определение порогового значения работы трения фрикционных накладок ведомого диска муфты сцепления трактора «Беларус».....	12
КУЛЬГЕЙКО М. П., ПЕТРИШИН Г. В., СИМАНОВИЧ Н. М. Роль инверсионности способов магнитно-электрической обработки при создании технологических комплексов генерации поверхностей	21
МЕЛЬНИКОВ А. С., ЛУСТЕНКОВ М. Е., МЕЛЬНИКОВ А. А. Повышение эффективности заднего тормозного механизма колесного трактора.....	31
ПАШКЕВИЧ В. М., АФАНЕВИЧ В. В. Эмпирическая модель шероховатости, обеспечиваемой при инерционно-импульсной обработке.....	41
ТАРАСИК В. П., ПУЗАНОВА О. В. Методика определения основных параметров и характеристик электромобиля	50

ХАТЕТОВСКИЙ С. Н., ДОКОНОВ Л. Г., ГАЛЮЖИН Д. С. К вопросу оценки упругих деформаций звеньев прецессионной передачи.....	61
ШАТУРОВ Д. Г., СУХОЦКИЙ С. А. Методика по определению сил резания и коэффициентов трения на рабочих поверхностях призматического резца	70
ШАТУРОВ Д. Г., ШЕЛЕГ В. К. Физические и технологические основы процесса образования нароста на передней поверхности твердосплавного инструмента.....	79

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

КОВАЛЬ А. С., КОНДРАТЕНКО А. Г. К вопросу расчета сеперконденсатора накопителя энергии на базе двухуровневого повышающе-понижающего преобразователя DC/DC для привода лифта	89
--	----

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

САВКОВА Т. Н. Автоматизация расчета остаточного ресурса светодиодных осветительных установок.....	97
--	----

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

СЕМЕНЮК С. Д., МЕЛЬЯНЦОВА И. И. Исследование деформаций усадки конструкционного керамзитожелезобетона.....	105
---	-----

ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

АГЕЕВА Т. Н., ПУСКОВА В. М. Анализ динамики производственного травматизма в Могилевской области	115
--	-----

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

БОРОВИКОВА О. В. Применение дисперсионного и ковариационного анализа в управлении качеством продукции.....	125
ЛОБАНОВА Т. М. Оценка результативности инвестиционных процессов в обрабатывающей промышленности Республики Беларусь	133

- Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам
- Публикуемые материалы рецензируются
- Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014
для предприятий и организаций – 000142

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

VAYTEKHOVICH P. E. Power spent on grinding in a pendulum roller mill with a planetary motion of the working body	5
KARPIEVICH YU. D. Determining a threshold value for frictional work of friction linings on the clutch driven disc of the <i>Belarus</i> tractor	12
KULGEIKO M. P., PETRISHIN G. V., SIMANOVICH N. M. Role of inversionality of magnetoelectric machining methods in the creation of technological complexes of surface generation	21
MELNIKOV A. S., LUSTENKOV M. E., MELNIKOV A. A. Improving the efficiency of rear brake mechanism of wheeled tractors	31
PASHKEVICH V. M., AFANEVICH V. V. Empirical model of roughness produced during inertial impact treatment.....	41
TARASIK V. P., PUZANOVA O. V. Procedure for determining main parameters and characteristics of an electric vehicle.....	50
KHATETOVSKY S. N., DOKONOV L. G., GALYUZHIN D. S. On the issue of evaluating elastic deformations of precessional transmission links.....	61
SHATUROV D. G., SUKHOTSKY S. A. Technique for determining cutting forces and friction coefficients on working surfaces of a prismatic cutter.....	70
SHATUROV D. G., SHELEG V. K. Physical and technological basics of the process of buildup formation on the front surface of a carbide-tipped tool	79

ELECTRICAL ENGINEERING

KOVAL A. S., KONDRATENKO A. G. On calculating a super-capacitor energy storage device based on the two-level buck-boost DC/DC converter for elevator drives	89
--	----

INSTRUMENT MAKING

SAVKOVA T. N. Automated calculation of the residual life of led lighting units	97
--	----

CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE

SEMENIUK S. D., MELYANTSOVA I. I. Research into shrinkage deformations of structural expanded clay concrete.....	105
--	-----

LABOUR PROTECTION. ENVIRONMENT PROTECTION. GEOECOLOGY

AHEYEVA T. N., PUSKOVA V. M. Analysis of the dynamics of industrial injuries in the Mogilev region	115
--	-----

ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

BARAVIKOVA O. V. Application of analysis of variance and covariance in product quality management.....	125
--	-----

LOBANOVA T. M. Evaluating the effectiveness of investment processes in the manufacturing industry of the Republic of Belarus.....	133
---	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.926

П. Е. Вайтехович

МОЩНОСТЬ, ЗАТРАЧИВАЕМАЯ НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ В РОЛИКО-МАЯТНИКОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ПЛАНЕТАРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ РАБОЧЕГО ОРГАНА

UDC 621.926

P. E. Vaytekovich

POWER SPENT ON GRINDING IN A PENDULUM ROLLER MILL WITH A PLANETARY MOTION OF THE WORKING BODY

Аннотация

На основе анализа силовой схемы в зоне разрушения составлена расчетная модель для определения мощности, затрачиваемой на измельчение в ролико-маятниковой мельнице. Ее отличительная особенность заключается в отклонении вектора разрушающей силы от центробежной. Расчеты, проведенные по полученной аналитической зависимости, показали существенное влияние на мощность угловой скорости и геометрических соотношений размольного узла мельницы.

Ключевые слова:

мельница, ролик, маятник, размольное кольцо, центробежная сила, геометрический критерий, угловая скорость, мощность.

Abstract

Based on the analysis of the power diagram in the fracture zone, a calculation model was compiled to determine the power spent on grinding in a pendulum roller mill. Its distinctive feature is the deviation of the vector of destructive force from the vector of the centrifugal one. The calculations based on the obtained analytical dependence showed that the angular velocity and geometric ratios of the grinding mill assembly have a significant effect on the power.

Keywords:

mill, roller, pendulum, grinding ring, centrifugal force, geometric criterion, angular velocity, power.

Введение

Процессы измельчения находят широкое распространение во многих отраслях промышленности: химической, пищевой, производстве строительных материалов. Традиционно они реализуются в барабанных шаровых мельницах. Эти агрегаты характеризуются высокими энергопотреблением и металлоемкостью. Снижение отмеченных показателей достигается при переходе от тихоходных

мельниц (барабанные) к средне- и быстроходным [1, 2]. Это направление в последние годы успешно развивается творческим коллективом под руководством автора данной работы.

Одним из перспективных агрегатов, относящихся к классу быстроходных, является планетарная мельница. Аналогом для нее служит обычная барабанная мельница, только барабаны с шарами и материалом вовлечены в сложное планетарное движение. Значительная

часть исследований была направлена на изучение именно этого агрегата [3–5]. В процессе исследований были выявлены как преимущества, так и недостатки указанных мельниц, главный из которых – сложность загрузки материала для машин непрерывного действия.

Этот существенный недостаток вынудил нас обратить внимание на еще один агрегат с планетарным движением рабочего органа, принципиально отличающийся от упомянутых выше. Это роlikо-маятниковая мельница [6, 7] с преимущественно раздавливающим воздействием на измельчаемый материал. Он разрушается между кольцом и роликами, перекачиваемыми по его внутренней поверхности. Ролики, в свою очередь, шарнирно соединены с водилом с помощью маятников и совершают планетарное движение. Главным разрушающим фактором в таких мельницах является инерционная центробежная сила.

Важными параметрами роlikо-маятниковых мельниц, как и любых других, являются степень измельчения, производительность, энергозатраты на проведение процесса. В [8] были определены некоторые геометрические характеристики роlikо-маятниковых мельниц, влияющие на степень измельчения и производительность. Данная работа посвящена изучению энергетических параметров указанных мельниц, определяющее значение среды которых имеют затраты мощности непосредственно на измельчение.

Основная часть

Предварительную оценку затрат мощности на измельчение в роlikо-маятниковой мельнице можно осуществить по ее конструктивной схеме (рис. 1).

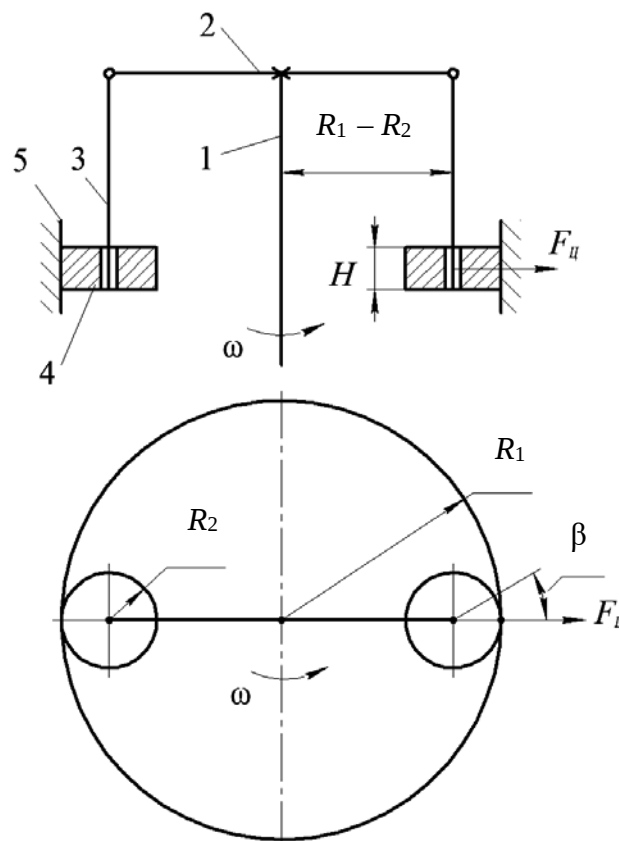


Рис. 1. Схема роlikо-маятниковой мельницы

Мельница включает приводной вал 1, жестко соединенный с крестовиной 2, выполняющей функции водила. К крестовине шарнирно присоединены маятники 3, на концах которых подвешены вращающиеся ролики 4. Ролики обкатываются по беговым дорожкам неподвижного кольца 5. Материал вводится в зазор между кольцом и роликами и разрушается под воздействием инерционной силы, возникающей при их вращении. Причем измельчение здесь осуществляется преимущественно методами раздавливания. Измельченный продукт удаляется из зоны разрушения в классификатор пневмотранспортом.

Основная часть мощности в ролико-маятниковой мельнице затрачивается непосредственно на разрушение материала между роликом и кольцом. Этот процесс подобен аналогичному, реализуемому в пресс-валковом измельчителе или в бегунах. Он характеризуется углом захвата [6] и длиной дуги сектора, по которому валок (ролик) контактирует с материалом.

Угол захвата, как для всех измельчителей раздавливающего действия, должен быть $\alpha \leq 2\varphi$, где φ – угол трения. Специфика ролико-маятниковой мельницы заключается в том, что камера измельчения в ней образуется между двумя дугами окружностей разного диаметра (ролика и кольца). Угол захвата при этом определяется между касательными, проведенными в точке соприкосновения куска материала с указанными окружностями. От него в данной конструкции измельчителя зависит только максимальный размер куска, который может затянуться под ролик. В [8] получено уравнение для его расчета:

$$r^2 - r \cdot (R_2 - R_1) - f^2 \cdot R_1 \cdot R_2 = 0. \quad (1)$$

Один из корней этого уравнения будет искомым размером максимального куска.

Одновременно для расчета указанного радиуса можно использовать упрощенное уравнение, предложенное в [6]:

$$r = \frac{R_2 \cdot (R_1 - R_2)}{R_1 + R_2}. \quad (2)$$

Расчеты по уравнениям (1) и (2) показали, что расхождение значений искомого параметра не превышает 10 %. Причем меньшие значения получены по второму уравнению. Поэтому для гарантированного затягивания материала под ролик предпочтение следует отдавать уравнению (2).

Особенность ролико-маятниковой мельницы и ее камеры измельчения заключается еще и в том, что углы захвата и сектора контакта ролика с материалом совсем разные. Последний предлагается [8] определять по формуле

$$\beta = \arcsin \frac{(R_2 + r) \cdot \sin \alpha}{R_1 - R_2}. \quad (3)$$

Длину дуги этого сектора можно рассчитать как

$$l = R_2 \cdot \beta, \quad (4)$$

где β – угол сектора, рад.

После анализа геометрии зоны измельчения можно приступить к определению мощности, затрачиваемой на разрушение материала. Расчетная схема для выполнения этой работы представлена на рис. 2.

Подход к определению мощности в данном случае аналогичен, как и на преодоление трения качения колеса (ролика) по плоскости. Однако ролик, перекатываясь по кольцу, должен не только преодолевать трение качения, но и разрушать материал, ограниченный сектором с углом β . Будем считать, что суммарная разрушающая сила F_p приложена по центру сектора в точке B с углом $\gamma = \beta/2$. Центробежная сила F_c направлена вдоль водила и проходит через точку A начала зоны контакта разрушаемого материала с роликом. В связи с этим для разрушения материала центробежная сила

$$F_y \geq \frac{F_p}{\cos \gamma}. \quad (5)$$

Центробежная сила, возникающая при перемещении ролика по окружности,

$$F_y = m \cdot \omega_1^2 \cdot (R_1 - R_2) \quad (6)$$

или с учетом того, что масса ролика равна произведению плотности на объем,

$$F_y = \rho \cdot H \cdot \pi \cdot R_2^2 \cdot \omega_1^2 \cdot (R_1 - R_2), \quad (7)$$

где ρ – плотность металла, из которого изготовлен ролик; H – высота ролика.

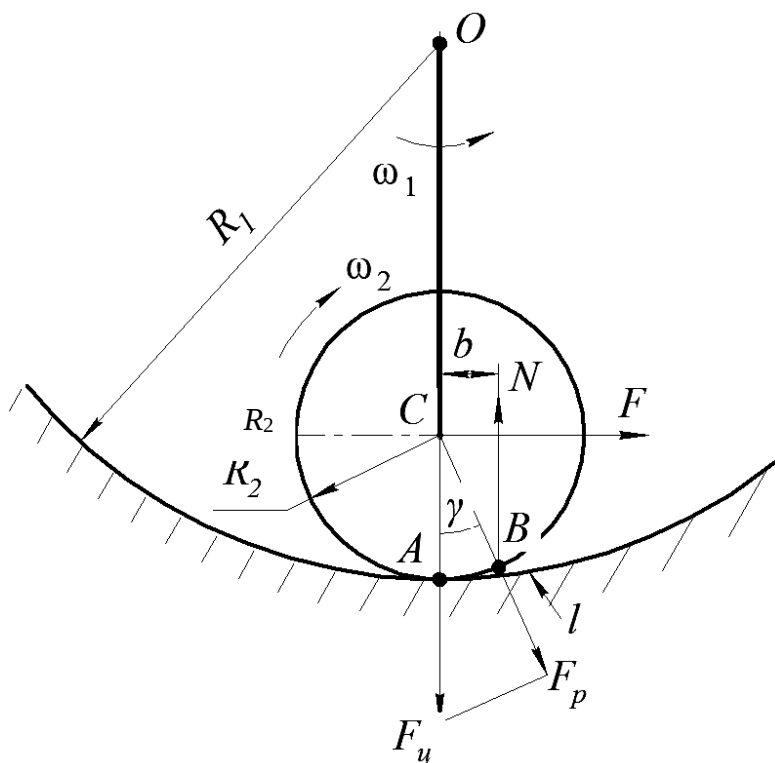


Рис. 2. Схема для определения мощности

Разрушающее усилие, как произведение напряжения на площадь, согласно [8]

$$F_p = \mu \cdot \sigma \cdot H \cdot R_2 \cdot \beta, \quad (8)$$

где μ – коэффициент разрыхления; σ – предел прочности измельчаемого материала.

Из условия (5) с учетом формул (7) и (8) найдем угловую скорость приводного вала ω_1 , при которой обеспечивается разрушение материала

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\mu \cdot \sigma \cdot \beta}{\rho \cdot \pi \cdot R_2 \cdot (R_1 - R_2) \cdot \cos \gamma}}. \quad (9)$$

Тяговое усилие F на перекачивание ролика с одновременным разрушением материала определяется из условия равенства тягового момента M_T и момента сопротивления M_c относительно мгновенного центра скоростей A . Это равенство можно записать в виде

$$F \cdot R_2 = N \cdot b, \quad (10)$$

где F – тяговое усилие; N – проекция нормальной реакции на ось, параллельную водилу; b – плечо силы.

Поскольку

$$\begin{aligned} N &= F_p \cdot \cos \gamma; \\ b &= R_2 \cdot \sin \gamma, \end{aligned} \quad (11)$$

то

$$F = F_p \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma. \quad (12)$$

Подставив выражение для силы разрушения, получим

$$F = \mu \cdot \sigma \cdot H \cdot R_2 \cdot \beta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma. \quad (13)$$

Мощность, затрачиваемая на перемещение ролика,

$$P = F \cdot v_c, \quad (14)$$

где v_c – линейная скорость центра ролика.

Руководствуясь правилом мгновенного центра скоростей (точка A), можем записать, что

$$v_c = v_{BC} = \omega_2 \cdot R_2. \quad (15)$$

Отсюда мощность

$$P = \mu \cdot \sigma \cdot H \cdot R_2^2 \cdot \omega_2 \cdot \beta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma. \quad (16)$$

В ролико-маятниковых мельницах определяющими параметрами чаще всего являются диаметр размольного кольца и частота вращения приводного вала. Аналоги их в нашей задаче – это радиус R_1 и угловая скорость ω_1 . Переход к ним, по подобию планетарных мельниц [1], можно осуществить через геометрический критерий $k = R_2 / R_1$. Тогда при внутренней обкатке ролика по кольцу

$$R_2 = k \cdot R_1; \quad (17)$$

$$\omega_2 = \omega_1 \cdot \frac{1-k}{k}. \quad (18)$$

Подставив эти выражения в формулу (16), получим окончательное уравнение для расчета мощности, затрачиваемой на измельчение материала в ролико-маятниковой мельнице:

$$\begin{aligned} P &= \mu \cdot \sigma \cdot H \cdot R_1^2 \cdot \omega_1 \cdot k \times \\ &\times (1-k) \cdot \beta \cdot z \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma, \end{aligned} \quad (19)$$

где z – количество роликов.

С использованием геометрического критерия можно трансформировать и формулы (2) и (3) для расчета максимального радиуса куска r и угла сектора контакта ролика с материалом β .

При этом получим

$$r = k \cdot R_1 \cdot \frac{1-k}{1+k}; \quad (20)$$

$$\beta = \arcsin \left(\frac{k \cdot R_1 + r}{R_1(1-k)} \right) \cdot \sin \alpha. \quad (21)$$

Небольшие изменения произойдут и в формуле (9) для расчета угловой скорости:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\mu \cdot \sigma \cdot \beta}{\rho \cdot \pi \cdot k \cdot R_1^2 \cdot (1-k) \cdot \cos \gamma}}. \quad (22)$$

После проведения всех преобразований можно приступить к апробации предлагаемой методики расчета мощности.

С анализа формулы (19) видно, что мощность зависит от прочности измельчаемого материала, геометрических соотношений размольного узла, угловой скорости рабочего органа. Если от прочности материала, угловой скорости рабочего органа она изменяется линейно, то от геометрических размеров и их соотношения это изменение неоднозначно.

В связи с этим проведем расчеты затрат мощности при измельчении конкретного материала, например гипсо-

вого камня, с неизменным пределом прочности $\sigma = 10$ МПа. Угловую скорость будем изменять в рабочем диапазоне $\omega_1 = 5 \dots 30$ рад/с. За базовый размер примем радиус размольного кольца $R_1 = 0,5$ м, что соответствует промышленному образцу мельницы. Изменения геометрических соотношений размо-

ного узла будут определяться разной величиной геометрического критерия $k = 0,1 \dots 0,3$. Количество роликов в мельнице принято $z = 3$.

Результаты расчетов представлены в виде графической зависимости $P = f(k)$ для разных угловых скоростей (рис. 3).

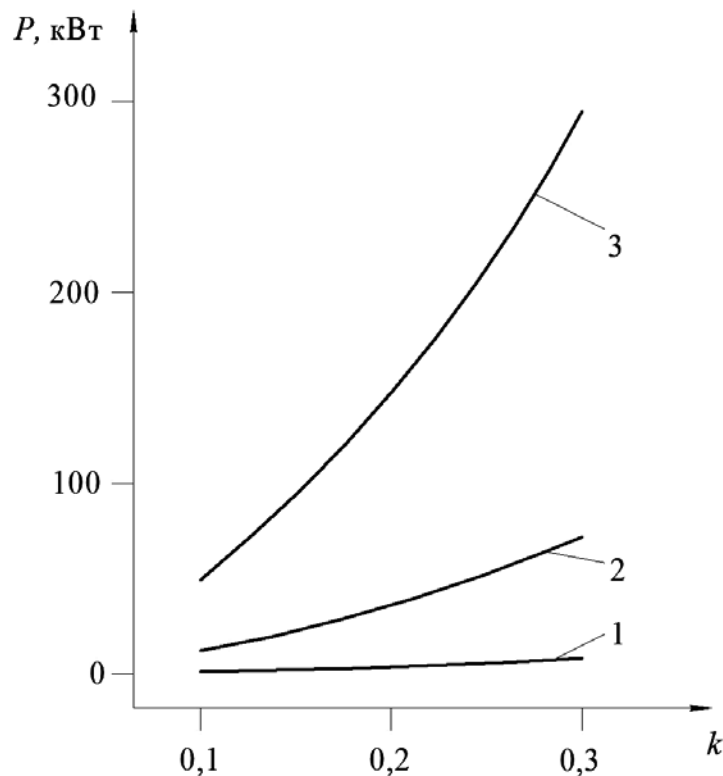


Рис. 3. Зависимость мощности на измельчение материала от геометрического критерия: 1 – $\omega = 5$ рад/с; 2 – $\omega = 15$ рад/с; 3 – $\omega = 30$ рад/с

На представленных графиках четко прослеживается повышение мощности при увеличении геометрического критерия, особенно в сочетании с увеличивающейся угловой скоростью. Причем ее изменение происходит нелинейно. Это можно объяснить тем, что увеличение геометрического критерия эквивалентно увеличению размеров размольного ролика. В свою очередь, размеры ролика влияют на величину углов в зоне контакта, входящих в расчетную формулу (19) для мощности.

Заключение

В работе предпринята попытка по составлению расчетной модели для определения мощности, затрачиваемой на измельчение материала в роlikо-матниковой мельнице. Эта модель основана на анализе силовой схемы в зоне разрушения твердого материала. Отличительной ее особенностью является то, что показано несовпадение векторов центробежной и разрушающей сил. Это отклонение определено по величине угла сектора контакта размольного

ролика с измельчаемым материалом. Заключительным этапом моделирования стало определение тягового усилия для перекачивания ролика по разрушаемому материалу и составление расчетной зависимости для мощности.

Апробация расчетной модели позволила установить степень влияния угловой скорости и геометрических параметров размольного узла на величину мощности. Установлено, что увеличение

соотношения радиусов ролика и кольца измельчающего органа, а также его угловой скорости приводит к повышению мощности, затрачиваемой на разрушение материала. Расчетные данные по мощности близки по значению к полученным в производственных условиях. Работа требует дальнейшего развития как в аналитическом, так и в экспериментальном направлениях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вайтехович, П. Е.** Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П. Е. Вайтехович. – Минск: БГТУ, 2008. – 220 с.
2. **Вайтехович, П. Е.** Тенденции и перспективы развития техники и технологии дезинтеграции / П. Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорганических веществ. – 2008. – Вып. XVI. – С. 106–112.
3. **Вайтехович, П. Е.** Анализ моделей относительного движения мелющих тел в планетарной мельнице / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко, Г. М. Хвесько // Труды БГТУ. Серия III. Химия и технология неорганических веществ. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 167–171.
4. **Вайтехович, П. Е.** Влияние взаимодействия между мелющими телами на характер их движения в планетарной мельнице / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 9. – С. 13–15.
5. **Вайтехович, П. Е.** Разрушающее воздействие мелющих тел в горизонтальной планетарной мельнице при различных способах обкатки помольных барабанов / П. Е. Вайтехович, Д. Н. Боровский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 3–6.
6. **Сиденко, П. М.** Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – Москва: Химия, 1977. – 368 с.
7. **Летин, Л. А.** Среднеходные и тихоходные мельницы / Л. А. Летин, К. Ф. Роддатис. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
8. **Вайтехович, П. Е.** Основные направления и перспективы использования ролико-маятниковых мельниц / П. Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. 2. Химические технологии, биотехнология и геоэкология. – 2017. – № 1 (199). – С. 203–208.

Статья сдана в редакцию 18 сентября 2020 года

Петр Евгеньевич Вайтехович, д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный технологический университет. E-mail: vpe51@mail.ru.

Petr Evgenyevich Vaytekhovich, DSc (Engineering), Prof., Belarusian State Technological University. E-mail: vpe51@mail.ru.

УДК 629.113-592.004.58

Ю. Д. Карпиевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВОГО ЗНАЧЕНИЯ РАБОТЫ ТРЕНИЯ
ФРИКЦИОННЫХ НАКЛАДОК ВЕДОМОГО ДИСКА МУФТЫ СЦЕПЛЕНИЯ
ТРАКТОРА «БЕЛАРУС»**

UDC 629.113-592.004.58

Yu. D. Karpievich

**DETERMINING A THRESHOLD VALUE FOR FRICTIONAL WORK
OF FRICTION LININGS ON THE CLUTCH DRIVEN DISC OF THE *BELARUS*
TRACTOR**

Аннотация

Определено на стенде пороговое значение работы трения фрикционных накладок ведомого диска сцепления, соответствующее их предельно допустимому износу. Приведена схема стенда для испытаний муфт сцепления тракторов «Беларус». Получены результаты испытаний.

Ключевые слова:

пороговое значение, муфта сцепления, трактор, работа трения, фрикционные накладки, бортовое диагностирование.

Abstract

A threshold value for the frictional work of friction linings on the clutch driven disc has been determined on the test stand which corresponds to their maximum allowable wear. The diagram of the stand for testing clutches of *Belarus* tractors is given. Test results have been obtained.

Keywords:

threshold value, clutch, tractor, friction, friction discs, on-board diagnostics.

Введение

Эффективное и безопасное автоматическое управление узлами и агрегатами трактора возможно при условии технически исправного состояния объекта управления, что предполагает наличие методов и технических средств диагностирования, способных своевременно выявлять неисправности и степень выработки [1]. Идентичность функциональных структур автоматического управления и диагностирования позволяет за счет совместного использования общей аппаратуры обеспечить непрерывный контроль объекта управления без применения каких-либо специализированных технических средств [2].

Разработка методов бортового диагностирования технического состояния ведомого диска муфты сцепления предполагает определение такого диагностического параметра, как пороговое значение работы трения фрикционных накладок при предельно допустимом их износе [3].

В результате проведенных стендовых испытаний ведомого диска муфты сцепления трактора «Беларус» это пороговое значение работы трения было определено экспериментальным путем.

Объект испытаний

Объектом испытаний являлся диск ведомый 70-1601130 с накладками сцеп-

ления 70-1601138-02 из материала «Фритекс-501» производства ОАО «Фритекс» (г. Ярославль) – два образца.

Цель испытаний

Экспериментальное определение на стенде порогового значения работы трения фрикционных накладок ведомого диска сцепления, соответствующего их предельно допустимому износу, и применение в дальнейшем работы трения в качестве интегрального показателя

степени износа фрикционных накладок при бортовом диагностировании технического состояния муфты сцепления тракторов «Беларус».

Методика испытаний

Испытания проводились на инерционно-тормозном стенде С-146, схема которого приведена на рис. 1, в цехе испытаний ОАО «Минский тракторный завод».

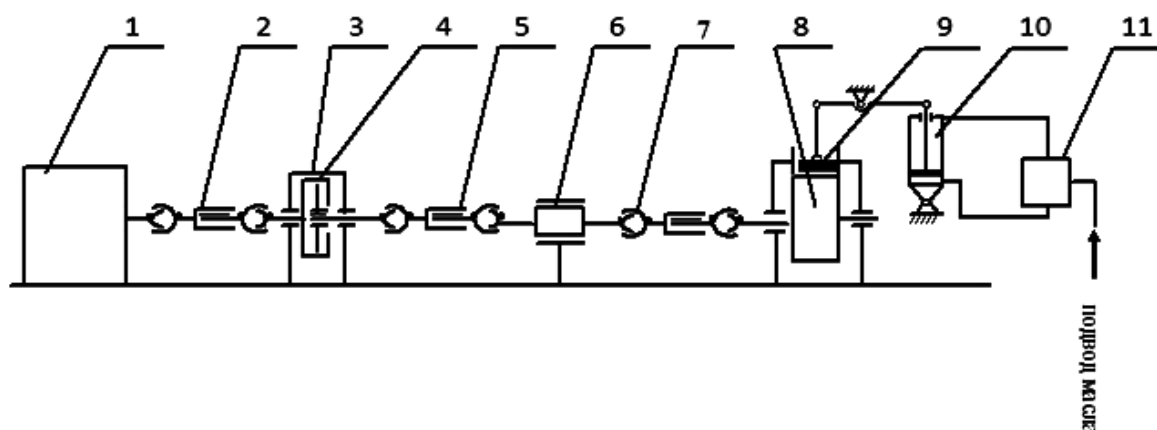


Рис. 1. Схема стенда для испытаний муфт сцепления тракторов «Беларус»: 1 – электродвигатель приводной мощностью 200 кВт; 2, 5, 7 – передачи карданные; 3 – корпус сцепления; 4 – муфта сцепления с испытуемыми накладками; 6 – измеритель крутящего момента (диапазон 0...2000 Н·м); 8 – массы инерционные с моментом инерции 7,8...8,2 кг·м²; 9 – тормоз остановочный инерционных масс; 10 – цилиндр механизма управления тормозом остановочных инерционных масс; 11 – распределитель

Ведомые диски с испытуемыми накладками поочередно устанавливались в однодисковую муфту сцепления.

Контртела (маховик и нажимной диск) в ходе испытаний не менялись.

Качество накладок определялось по следующим показателям:

- фрикционным свойствам;
- линейному износу испытуемого материала.

Фрикционные свойства накладок оценивались по статическому моменту срыва муфты сцепления, в которой в качестве фрикционных элементов ведомого диска использовались опытные накладки.

Перед установкой муфты сцепле-

ния на стенд определялось суммарное усилие пружин в диске сцепления в положении, соответствующем установке диска сцепления на маховик с ведомым диском толщиной 10 мм.

Объем испытаний каждого комплекта накладок оговаривался заданием на испытания и составлял 10000 циклов включений.

Управление работой стенда, сбор и обработка информации, построение графиков осуществлялось с автоматизированного рабочего места испытателя программируемым контроллером С12 фирмы OMRON (Япония).

После окончания испытаний производилась разборка муфты сцепления

для обмера толщины ведомого диска сцепления и оценки состояния фрикционных накладок.

Результаты испытаний

Суммарное усилие пружин в диске сцепления в положении, соответствующем установке диска сцепления на маховик с ведомым диском толщиной 10 мм,

в начале испытаний было в пределах 8900...9000 Н.

Результаты испытаний дисков приведены в табл. 1.

Первый образец ведомого диска отработал в объеме 10000 циклов включений. Средний темп износа накладок в заданном интервале наработки (10000 циклов) составил (0,50 мм) / (1000 ц).

Табл. 1. Результаты испытаний ведомых дисков 70-1601130 с накладками производства ОАО «Фритекс» на стенде С-146

Количество включений муфты сцепления, цикл	Диапазон момента срыва муфты сцепления (прогретой/непрогретой), Н·м	Средняя величина износа, мм	Средний темп износа в интервале наработки, мм/1000 ц
Образец № 1			
2000	475...505/580...590	1,39	0,69
3901	445...460/480...500	2,05	0,33
5975	550...570/500...520	2,84	0,39
8000	450...500/530...545	3,82	0,48
10000	475...490/540...560	5,08	0,63
Средний темп износа во всем диапазоне наработки – (0,50 мм)/(1000 ц)			
Образец № 2			
2000	695...705/735...765	0,73	0,36
4012	630...650/690...700	1,15	0,20
5901	635...645/630...645	1,93	0,41
8008	630...640/635...650	3,04	0,52
10000	500...530/550...560	4,27	0,62
Средний темп износа во всем диапазоне наработки – (0,42 мм)/(1000 ц)			

Второй образец ведомого диска отработал в объеме 10000 циклов включений. Средний темп износа накладок в заданном интервале наработки (10000 циклов) составил (0,42 мм)/(1000 ц).

Для получения более полной информации о фрикционных свойствах материала «Фритекс» (характере изменения динамического момента трения) в начале и в конце испытаний были проведены записи процессов включения муфты сцепления, приведенные на рис. 2, 4, 6 и 8, при непрогретой и

прогретой муфтах сцепления (температура измерялась на корпусе муфты сцепления).

Обозначения, используемые на графиках:

– $n_{вх.в}$, $n_{вых.в}$ – частоты вращения вала приводного электродвигателя и выходного вала муфты сцепления (вала инерционных масс) соответственно;

– T – вращающий момент на выходном (ведомом) валу муфты сцепления.

Интервал опроса параметров при записи процесса включения муфты

сцепления составлял 0,01 с.

Из приведенных графиков видно, что динамический момент трения на выходном валу муфты сцепления был в пределах 450...880 Н·м.

По результатам обработки графиков включения муфты сцепления (см. рис. 2, 4, 6 и 8) построены графики изменения во времени цикловой работы и мощности трения (рис. 3, 5, 7 и 9), из которых видно, что при включении муфты сцепления на стенде на заданных режимах нагружения поглощалась работа трения в пределах 149... 150 кДж.

Суммарное значение работы трения за период испытаний (за 10000 циклов включений муфты сцепления) как для образца № 1, так и для образца № 2

$$L = 150 \cdot 10000 = 1500000 \text{ кДж.}$$

По результатам испытаний, приведенных в табл. 1, средний износ фрикционных накладок ведомого диска муфты сцепления образца № 1 за 10000 включений (циклов) муфты сцепления составил $H_1 = 5,08$ мм. Средний износ фрикционных накладок ведомого диска муфты сцепления образца № 2 за такое же количество включений (циклов) муфты сцепления и при таких же условиях испытаний $H_2 = 4,27$ мм.

Следует отметить, что ни один из представленных на испытания опытных фрикционных материалов не вызвал износа поверхностей трения контртел (маховика и нажимного диска).

Суммарное усилие пружин в диске сцепления после испытаний не изменилось, т. е. осталось в пределах 8900...9000 Н.

Из анализа результатов испытаний следует, что средняя работа трения на единицу линейного износа (на 1 мм) фрикционных накладок ведомого диска муфты сцепления составляет:

– для фрикционных накладок образца № 1

$$L_1 = L/H_1 = 1500000/5,08 = \\ = 295275 \text{ кДж/мм;}$$

– для фрикционных накладок образца № 2

$$L_2 = L/H_2 = 1500000/4,27 = \\ = 351288 \text{ кДж/мм.}$$

Учитывая тот факт, что номинальное значение толщины ведомого диска – 10 мм, а замена фрикционных накладок производится, если толщина диска меньше допустимого предела, равного 6 мм, т. е. линейный износ накладок достигает предельного износа $H_{\max} = 4$ мм, то пороговое значение работы трения, соответствующее предельно допустимому износу фрикционных накладок ведомого диска муфты сцепления, составит [4]:

– для фрикционных накладок образца № 1

$$L_{01} = L_1 \cdot H_{\max} = 295275 \cdot 4 = \\ = 1181102 \text{ кДж;}$$

– для фрикционных накладок образца № 2

$$L_{02} = L_2 \cdot H_{\max} = 351288 \cdot 4 = \\ = 1405152 \text{ кДж.}$$

По результатам испытаний среднее пороговое значение работы трения, соответствующее предельно допустимому износу фрикционных накладок ведомого диска муфты сцепления,

$$L_0 = (L_{01} + L_{02})/2 = \\ = (1181102 + 1405152)/2 = \\ = 1293127 \text{ кДж.}$$

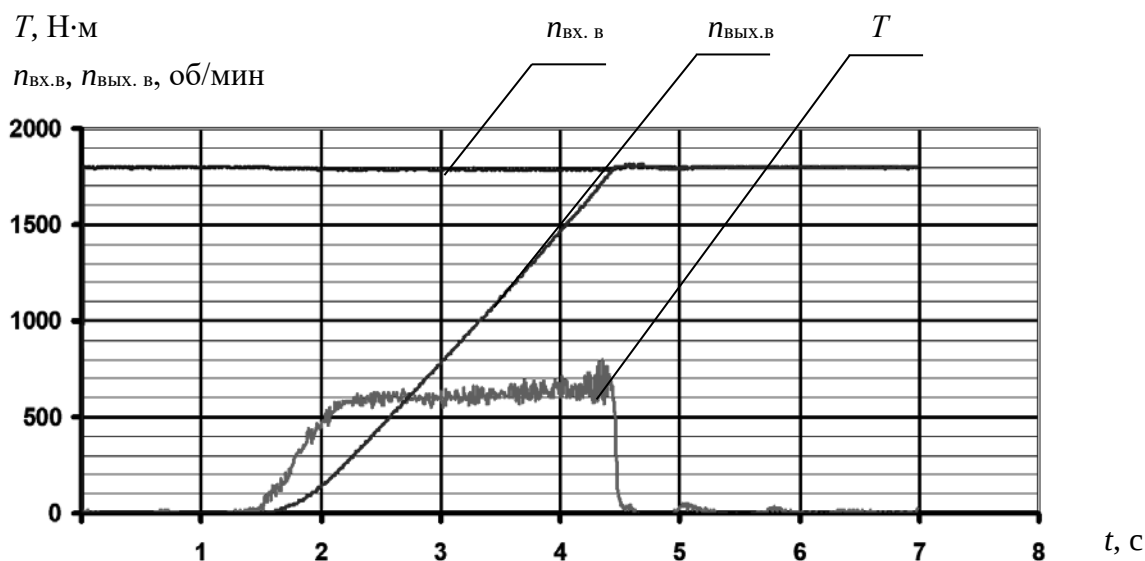


Рис. 2. Процесс включения прогретой муфты сцепления с образцом № 1 ведомого диска с накладками производства ОАО «Фритекс» при наработке 450 циклов (температура корпуса муфты сцепления $\approx 20^\circ\text{C}$)

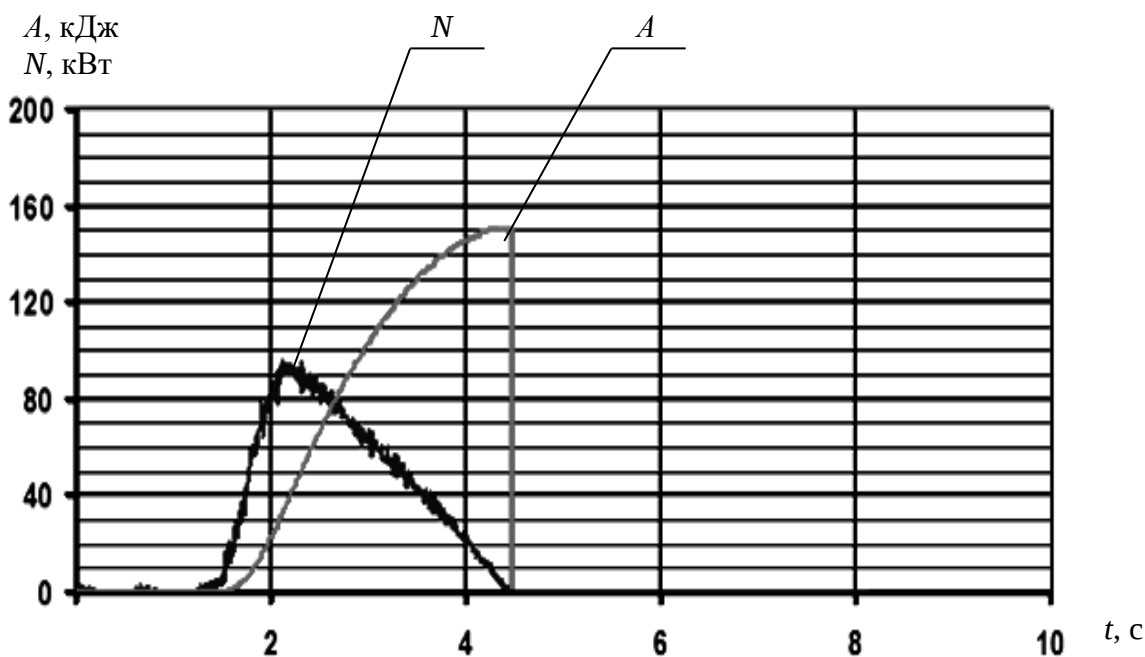


Рис. 3. Графики изменения цикловой работы A и мощности N трения при включении прогретой муфты сцепления с образцом № 1 ведомого диска с накладками производства ОАО «Фритекс» при наработке 450 циклов (температура корпуса муфты сцепления $\approx 20^\circ\text{C}$)

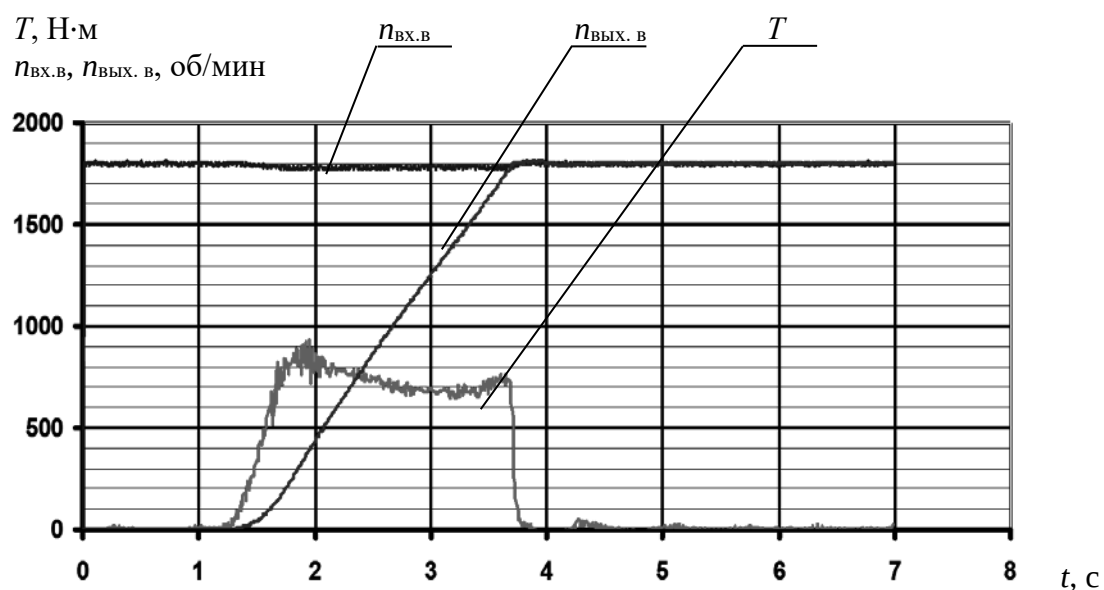


Рис. 4. Процесс включения прогретой муфты сцепления с образцом № 1 ведомого диска с накладками производства ОАО «Фритекс» при наработке 567 циклов (температура корпуса муфты сцепления $\approx 65^\circ\text{C}$)

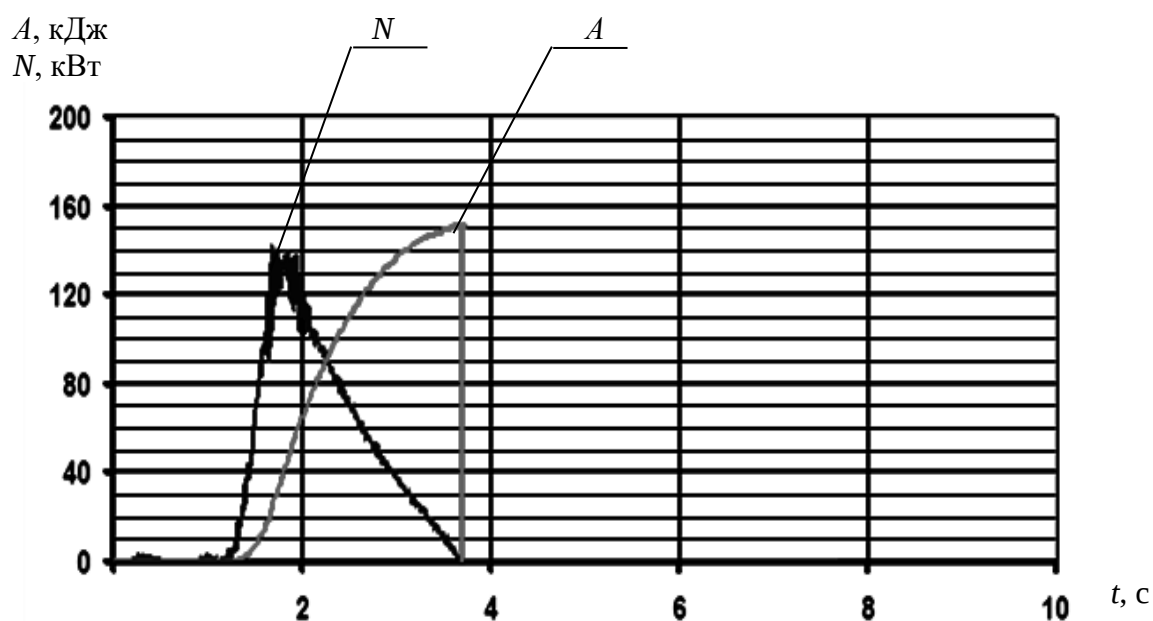


Рис. 5. Графики изменения цикловой работы A и мощности N трения при включении прогретой муфты сцепления с образцом № 1 ведомого диска с накладками производства ОАО «Фритекс» при наработке 567 циклов (температура корпуса муфты сцепления $\approx 65^\circ\text{C}$)

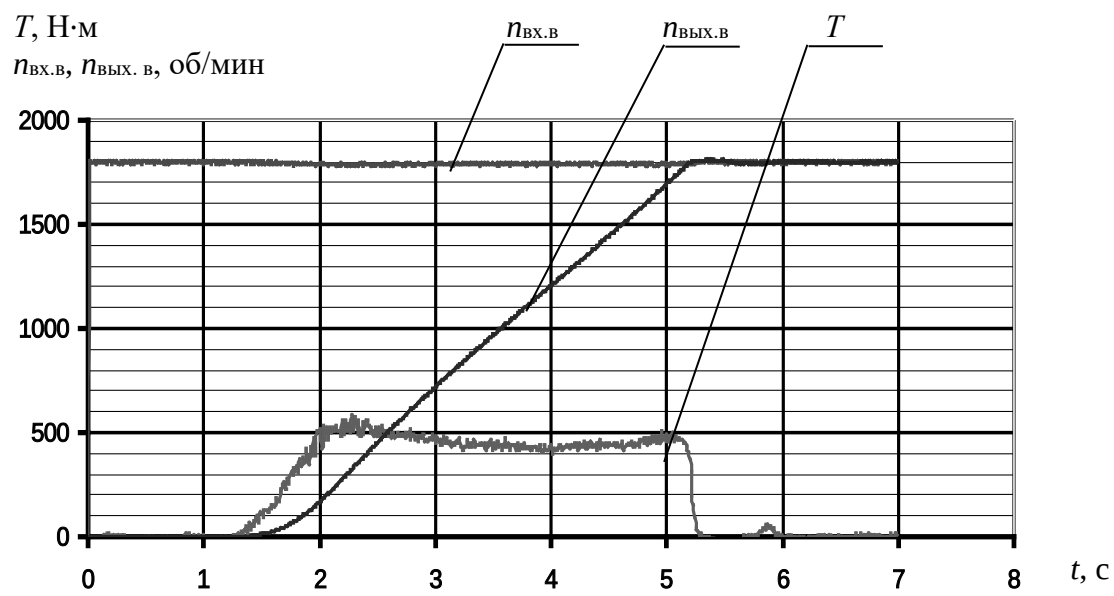


Рис. 6. Процесс включения прогретой муфты сцепления с образцом № 1 ведомого диска с накладками производства ОАО «Фритекс» при наработке 9272 цикла (температура корпуса муфты сцепления $\approx 20^\circ\text{C}$)

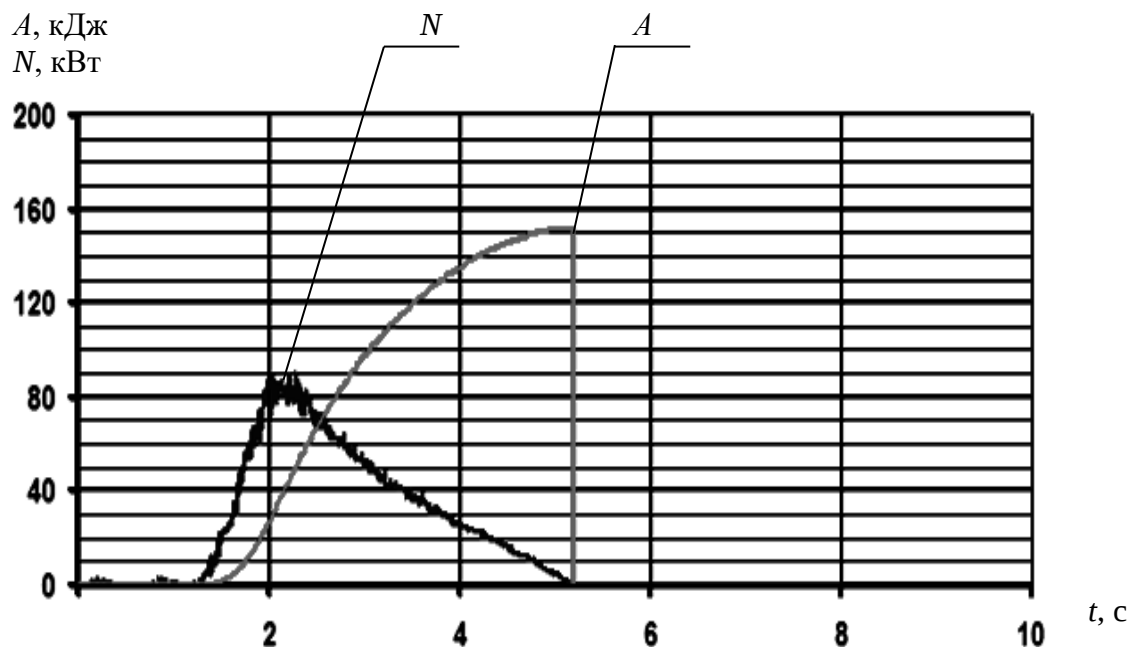


Рис. 7. Графики изменения цикловой работы A и мощности N трения при включении прогретой муфты сцепления с образцом № 1 ведомого диска с накладками производства ОАО «Фритекс» при наработке 9272 цикла (температура корпуса муфты сцепления $\approx 20^\circ\text{C}$)

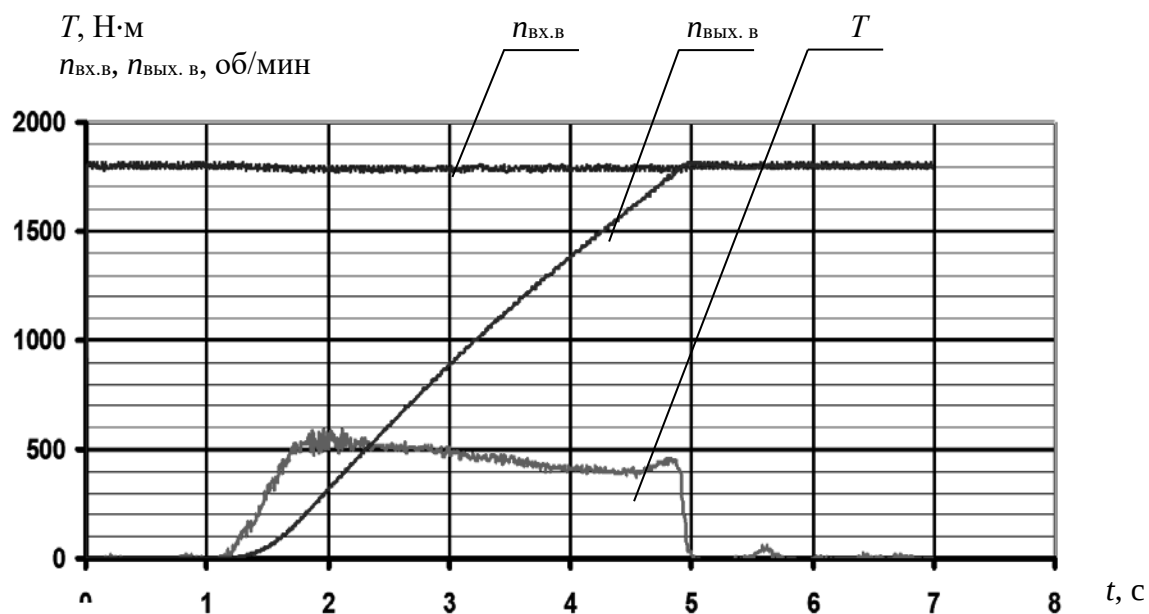


Рис. 8. Процесс включения прогретой муфты сцепления с образцом № 1 ведомого диска с накладками производства ОАО «Фритекс» при наработке 9477 циклов (температура корпуса муфты сцепления $\approx 65^\circ\text{C}$)

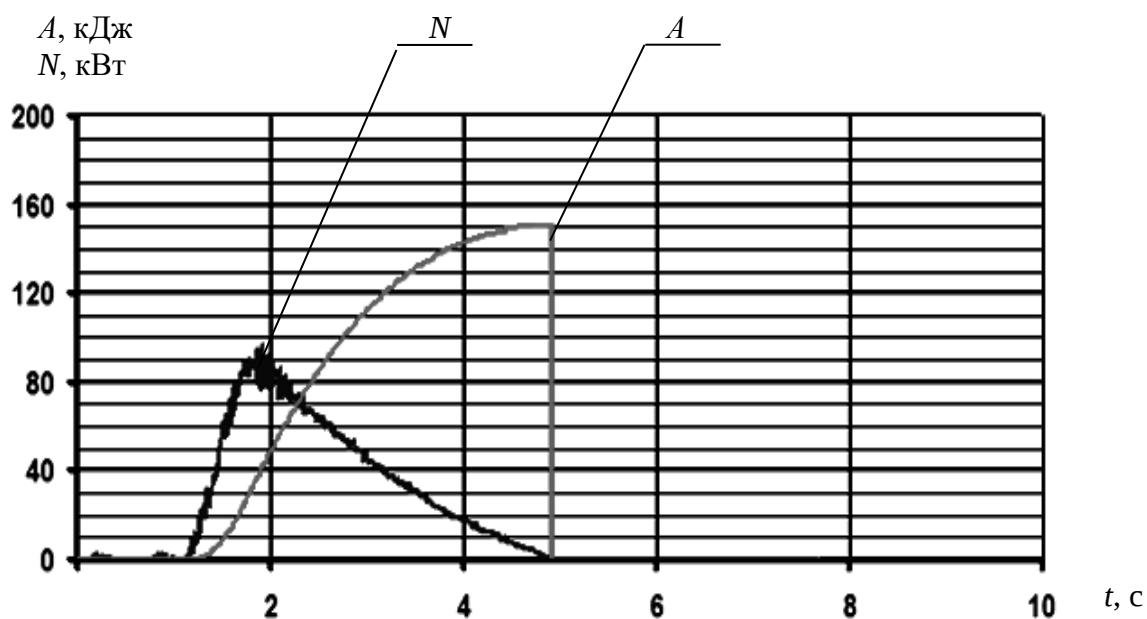


Рис. 9. Графики изменения цикловой работы A и мощности N трения при включении прогретой муфты сцепления с образцом № 1 ведомого диска с накладками производства ОАО «Фритекс» при наработке 9477 циклов (температура корпуса муфты сцепления $\approx 65^\circ\text{C}$)

Заключение

В результате проведенных стендовых испытаний ведомого диска сцепления экспериментальным путем определено пороговое значение работы трения фрикционных накладок ($L_0 = 1293127$ кДж),

соответствующее их предельно допустимому износу, позволяющее прогнозировать выработку ресурса фрикционных накладок ведомого диска сцепления, используя при этом работу трения как интегральный показатель при их бортовом диагностировании.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудвин, Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребен, М. Э. Сальгадо. – Москва: Бином, 2004. – 912 с.: ил.
2. Мельников, А. А. Управление техническими объектами автомобилей и тракторов. Системы электроники и автоматики / А. А. Мельников. – Москва: Академия, 2003. – 376 с.: ил.
3. Сцепление транспортных и тяговых машин / И. Б. Барский [и др.]; под ред. Ф. Р. Геккера [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1989. – 344 с.
4. Пуховой, А. А. Тракторы. Устройство. Техническое обслуживание. Ремонт. «БЕЛАРУС» серия 1000-2000: учебное пособие / А. А. Пуховой, И. Н. Шило. – Астана: КАТУ им. С. Сейфуллина, 2012. – 779 с.

Статья сдана в редакцию 18 сентября 2020 года

Юрий Дмитриевич Карпиевич, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: irina-mi-k@yandex.ru.

Yury Dmitrievich Karpievich, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: irina-mi-k@yandex.ru.

УДК 621.9.044

М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин, Н. М. Симанович

РОЛЬ ИНВЕРСИОННОСТИ СПОСОБОВ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ СОЗДАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГЕНЕРАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

UDC 621.9.044

M. P. Kulgeiko, G. V. Petrishin, N. M. Simanovich

ROLE OF INVERSIONALITY OF MAGNETOELECTRIC MACHINING METHODS IN THE CREATION OF TECHNOLOGICAL COMPLEXES OF SURFACE GENERATION

Аннотация

В работе проанализированы два наиболее важных направления технологии магнитно-электрической обработки: магнитно-электрическое упрочнение и магнитно-абразивная обработка. Показана взаимосвязь этих направлений, основанная на принципе инверсии. Приведен обзор наиболее значимых технологических факторов технологии магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки, показаны области их применения. Определены перспективные направления исследований технологии магнитно-электрической обработки, направленные на совмещении технологий, обеспечивающих создание на поверхности обрабатываемой детали комплекса свойств.

Ключевые слова:

поверхность, магнитно-абразивная обработка, магнитно-электрическое упрочнение, инверсионность процессов, совмещенные технологии.

Abstract

This article analyzes the two most important areas of the technology of magnetoelectric machining, namely magnetoelectric hardening and magnetic abrasive machining. The interrelation of these areas based on the principle of inversion is shown. An overview of the most significant technological factors of magnetoelectric hardening and magnetic abrasive machining is given, and the areas of their application are shown. The perspective directions of the research into the technology of magnetoelectric machining have been determined which are aimed at combining the technologies ensuring the obtaining of a complex of properties on the surface of a workpiece.

Keywords:

surface, magnetic abrasive machining, magnetoelectric hardening, inversionality of processes, combined technologies.

Введение

Важнейшим фактором научно-технического, экономического и социального прогресса на современном этапе развития общества стало качество продукции. Высокий технический уровень и качество изготовления продукции являются не только одной из основных целей производства, но и его средством, одним из самых мощных инструментов. Без коренного повышения качества продукции

невозможно обеспечить ускоренное развитие всех отраслей народного хозяйства страны. Качество продукции является главным условием ее конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках, необходимым требованием выхода на мировой уровень.

Ведущая роль в интенсификации всех отраслей промышленного производства принадлежит машиностроению. Обеспечение высокого качества продукции, повышение производительности

труда и эффективности общественного производства, повышение конкурентоспособности производимой продукции является одной из важнейших задач современного машиностроения.

Стремление поддерживать конкурентоспособность продукции машиностроения приводит к непрерывному усложнению технических средств, повышению мощности и производительности, силовых и скоростных параметров машин. Современные тенденции развития машиностроения направлены на повышение требований к улучшению технических характеристик машин. Это требует обеспечения их функциональных характеристик, важнейшими из которых являются точность, надежность, долговечность и экономичность.

Постановка задачи

В решении задач, стоящих перед машиностроением, большое внимание отводится проблеме обеспечения надежности и долговечности деталей машин. А так как большинство деталей машин отказывает не из-за поломок, а в результате износа и разрушения поверхностей, то актуальной является проблема создания эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей. Таким образом, задача состоит в создании гетерогенного поверхностного материала, обладающего дифференцированными свойствами по отношению к объемно-прочностным свойствам детали.

Инженерия поверхности, модификация ее эксплуатационных свойств непосредственно связаны с развитием современной технологии машиностроения. Основная роль в создании поверхности принадлежит окончательным (отделочным) финишным технологиям обработки материалов. До настоящего времени вопросы поверхностных явлений во многом решаются эмпирически, т. е. при создании и изучении поверхности применяется «прикладной», феноменологический подход, преимущественно

с технологической точки зрения. В результате поверхность, как особое состояние материала, применительно к области машиностроения образуется, в том числе, вследствие энергетического воздействия технологическими методами.

В современном машиностроении прикладная инженерия поверхности обладает большим разнообразием технологических методов генерации поверхностного слоя. Отличаются известные методы способом энергетического воздействия, определяющего физико-механические и электрохимические явления, лежащие в основе обеспечения гетерогенности материала поверхностного слоя относительно объема детали. И, как следствие, они, соответственно, отличаются результатами этого воздействия, т. е. достигаемыми геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами поверхности. При всей сложной совокупности явлений, происходящих в поверхностном слое, каждый из методов характеризуется своим доминирующим процессом, определяющим изменение состояния поверхности и модификацию ее свойств. Это может быть изменение химического состава и структуры поверхностного слоя, шероховатости поверхности, образование нового слоя в виде пленки или покрытия и т. п. Выбор конкретного метода повышения эксплуатационных свойств поверхностного слоя определяется технологическими, экономическими, экологическими и другими факторами.

В зависимости от результата энергетического воздействия с технологической точки зрения среди известных методов можно выделить следующие направления генерации поверхности.

1. Образование поверхности путем удаления материала и формирование заданной микрогеометрии. Включает финишные методы механической и физико-технической обработки.

2. Формирование заданной микрогеометрии и структуры поверхностного слоя без удаления материала, практи-

чески не изменяя исходную точность размеров. Это, в основном, методы обработки поверхностно-пластическим деформированием.

3. Создание поверхностного слоя определенного химического состава и структуры, практически не изменяя микро- и макрогеометрии поверхности и геометрии детали (исходных размеров). Это направление включает методы термической, криогенной, химико-термической обработки, а также физико-термической (лазерная и плазменная закалка) и др.

4. Создание поверхностного слоя путем нанесения дополнительного материала на поверхность детали. К этому направлению относятся многочисленные методы напыления и наплавки, а также другие методы создания поверхностных пленок.

Для решения поставленных задач по созданию поверхностного слоя деталь должна пройти ряд технологических систем, решающее значение среди которых имеют процессы модификации поверхности на заключительных стадиях технологического маршрута, устраняющие накопленные дефекты на предшествующих операциях [1]. Взаимосвязанная совокупность технологических систем, которые дополняют возможности друг друга по обеспечению состояния поверхностного слоя, образуют технологический комплекс [2, 3]. Такой технологический комплекс обеспечивает в целом эволюцию и трансформацию свойств поверхностного слоя детали. Технологические модули, входящие в технологический комплекс, реализуют заданное технологическое направление генерации поверхности за счет определенного энергетического воздействия на поверхностный слой детали. Они, как правило, имеют возможность автономного функционирования, обладают условиями самоорганизации процессов, структурного синтеза и параметрической оптимизации компонентов системы. Важной особенностью технологических модулей явля-

ется совместимость и дополняемость реализуемых ими процессов.

Цель работы – определение методологической основы принципа совместности технологий при формировании поверхностей на базе магнитно-электрических методов обработки.

Основная часть

В настоящее время в машиностроении широкое развитие находят методы формирования поверхностного слоя с использованием концентрированных потоков энергии [4, 5]. Значительный интерес представляет применение в технологических целях энергии электрического и магнитного полей [1, 6–12]. В частности, на основе электромагнитных технологий разрабатывается ряд технологических комплексов высокоэффективной обработки, упрочнения и восстановления деталей машин [1–3, 13]. Такому направлению развития способствует, отчасти, высокая технологичность электрофизических воздействий [1, 13] и управляемость электромагнитными процессами [3, 9], и как следствие – перспективность финишных методов, в которых магнитным полем формируется абразивный инструмент и осуществляется управление процессом обработки [3, 9, 13]. Однако, несмотря на то, что электромагнитные потоки энергии наиболее технологичны и удобны в управлении, применение энергии магнитного поля в технологических целях является сложной научной и технической задачей [8], и совместное использование нескольких потоков энергии создает технологические ограничения при оптимизации режимов и стабилизации процессов [10]. Поэтому при создании технологии и оборудования для комбинированной обработки целесообразно использовать синергетический подход и явление самоорганизации в технологических системах.

Технологические процессы, основанные на использовании магнитных и

электрических полей, образуют совокупность магнитно-электрических способов обработки. Сущность способов магнитно-электрической обработки (МЭО) в общем случае заключается в генерации поверхности детали при одновременном совместном воздействии магнитной, электрической и механической энергии [14]. Такое комбинированное сочетание видов энергии позволяет концентрировать в небольшом объеме формируемого поверхностного слоя значительную величину управляемого энергетического воздействия, что обеспечивает интенсификацию технологического процесса. А так как в процессе обработки возможно преобразование видов энергии, то, комбинируя их параметры и характеристики энергетического воздействия, можно создавать новые технологические

способы, позволяющие решать различные технологические задачи.

На основе общности процессов энергетического воздействия при МЭО предложено [14] символическое изображение способов обработки в виде векторной интерпретации, где магнитная, электрическая и механическая энергии изображены, соответственно, векторами: магнитной индукции $\vec{B}$, электрического тока $\vec{I}$, механического движения $\vec{V}$, и разработана [15] классификация возможных принципиальных схем обработки применительно к процессам упрочнения.

Наиболее общая классификация способов магнитно-электрической обработки может быть выполнена на основе признаков, представленных в табл. 1.

Табл. 1. Характеристика классификационных признаков МЭО

Номер признака	Признак классификации (образуемое классификационное множество способов)	Характеристика	Условное обозначение
1	Взаимное направление факторов энергетического воздействия (класс)	Перпендикулярное	1. $\vec{B} \perp \vec{I} \perp \vec{V}$
		Параллельно-перпендикулярное	2. $(\vec{B} // \vec{I}) \perp \vec{V}$
		Параллельно-перпендикулярное	3. $(\vec{B} // \vec{V}) \perp \vec{I}$
		Параллельно-перпендикулярное	4. $\vec{B} \perp (\vec{I} // \vec{V})$
		Параллельное	5. $\vec{B} // \vec{I} // \vec{V}$
2	Временной характер энергетического воздействия (группа)	Постоянное заданной величины	$F_i = \text{const}(c)$
		Переменное с заданной частотой	$F_i = f(\omega t)$
		Импульсно	$F_i = f(\tau)$
		Отсутствует	$F_i = 0$
3	Энергетическое преобразование факторов в рабочей зоне (подгруппа)	В тепловую энергию	$F_i \rightarrow T$
		В механическую энергию	$F_i \rightarrow P$
		В химическую энергию	$F_i \rightarrow R$
4	Энергетический фактор как результат взаимодействия других факторов (вид)	Магнитное поле создается электрическим током в движущемся проводнике (рабочем теле)	$B = f(I, V)$
		Электрический ток индуцируется при перемещении рабочего тела в магнитном поле	$I = f(B, V)$
		Рабочее тело с током перемещается в магнитное поле	$V = f(B, I)$

Использование феноменологической классификации позволяет более рационально и результативно осуществлять анализ известных и разработку новых технологий магнитно-электрической обработки.

Одним из первых практически освоенных способов магнитно-электрической обработки является магнитно-абразивная обработка (МАО). МАО реализует первое технологическое направление генерации поверхности, т. е. образование поверхностного слоя путем удаления материала и формирования заданной микрогеометрии.

Сущность МАО заключается в том, что порошковая ферромагнитная абразивная масса под действием магнитного поля уплотняется и прижимается к обрабатываемой детали и при их относительном перемещении осуществляет абразивное воздействие на ее поверхность, в результате которого происходит процесс микрорезания со снятием тончайших слоев металла и его окислов, а также сглаживание микронеровностей поверхностного слоя путем их пластического деформирования.

Диспергирование и пластическое деформирование поверхностного слоя при МАО усиливается химическими и адсорбционными процессами, происходящими на поверхности детали в присутствии химических и поверхностно-активных веществ (ПАВ) – компонентов СОЖ. Процесс микрорезания сопровождается разрушением и удалением непрерывно образующихся на поверхности химических пленок, в основном оксидных [6, 12]. Таким образом, в основе процесса формирования поверхностного слоя при МАО лежит механический и (или) механохимический механизм съема металла и его оксидов [1, 7, 13]. В целом, МАО включает в себя признаки как механического, так и физического методов обработки и по существу, в соответствии с традиционной терминологией, относится к физико-техническим методам обработки, как и все

способы МЭО.

Магнитно-абразивная обработка является способом МЭО, который характеризуется отсутствием целенаправленного использования электрической энергии. Реализация технологии МАО осуществляется без подвода электрического тока как одного из энергетических технологических факторов процесса. Однако его присутствие в зоне обработки отмечается в многочисленных исследованиях технологии МАО. Собственно, технология наплавки в магнитном поле как способ генерации поверхностей деталей возникла вследствие обнаруженного эффекта оплавления частиц порошка и вершин микронеровностей обрабатываемой поверхности под действием электрического тока [16].

Если фактор присутствия электрического тока в рабочей зоне МАО практически у всех исследователей не вызывает возражений, то о его роли в процессе съема материала существуют различные точки зрения [1, 6–8, 11–13]. Обобщая известную информацию, можно сделать вывод, что значимость роли электрического тока в процессе формирования обрабатываемой поверхности зависит от многих факторов и, прежде всего, от величины ЭДС, самопроизвольно индуцируемой в зоне обработки, или же электрической энергии, подводимой извне от специальных источников. В первом случае имеем четвертый классификационный признак способов МАО (см. табл. 1), т. е. один энергетический фактор (электрический) является результатом взаимодействия двух других факторов, $I = f(B, V)$.

Магнитно-абразивная обработка как составная часть большой совокупности способов магнитно-электрической обработки, в свою очередь, объединяет способы формирования поверхностного слоя, основанные на комплексном воздействии силовых факторов абразивным методом в магнитном поле.

Наиболее распространенной областью МАО является генерация поверх-

ностного слоя с формированием минимальной шероховатости поверхности. Совокупность этих способов предложено называть магнитно-абразивным полированием (МАП) [6]. Кроме основной функции – снижения шероховатости поверхности, МАП обеспечивает повышение точности геометрической формы и размеров, уменьшение волнистости и гранности, увеличение опорной площади поверхности, повышение физико-механических характеристик поверхностного слоя, обеспечивая формирование в нем остаточных сжимающих напряжений, повышение износостойкости, контактной прочности и сопротивления коррозии [6, 12].

Отдельную область МАО образуют технологические операции магнитно-абразивной зачистки (МАЗ) поверхностей деталей. Под МАЗ понимаются способы обработки (генерации поверхности), имеющие своей основной целью удаление с обрабатываемой поверхности слоя окислов, других химических и механических загрязнений [12], т. е. создание максимально чистой (ювентильной) поверхности. Эти способы охватывают операции подготовки (зачистки) поверхностей изделий для дальнейшего передела и, в зависимости от их технологического назначения, кроме очистки, решают и другие задачи [17, 18].

Магнитно-абразивная обработка, наряду с широким распространением в

области технологий МАП и МАЗ, применяется также на операциях удаления заусенцев и скругления острых кромок, получения на поверхности рельефных изображений, упрочнения металлорежущих инструментов и т. п. [6].

Во всех способах МАО магнитное поле, как важнейший и неотъемлемый фактор процесса, кроме основной функции формирования инструмента и создания силового взаимодействия между режущими элементами и обрабатываемой поверхностью, оказывает влияние непосредственно на материал детали [6, 8]. В тонких процессах магнитно-абразивного полирования роль магнитного поля в повышении эксплуатационных свойств изделий, например режущих инструментов [6], сопоставима с эффектом от их отделочной механической обработки. В этих условиях важным является преобразование энергетических факторов не только в механическую, но также в тепловую и химическую энергию (см. табл. 1). В результате реализуется как первое технологическое направление генерации поверхности путем удаления материала и формирования заданной микрогеометрии, так и третье направление – создание поверхностного слоя определенного химического состава и структуры.

В общем случае условная символическая (см. табл. 1) запись процесса МАО может быть представлена в виде

$$[\bar{B}(c \vee \omega t \vee \tau)] \perp \vee // [\bar{I}(c \vee \omega t \vee 0) \wedge f(B, V)] \perp [V(c \vee c \wedge \tau)] \Rightarrow P \vee (P \wedge T \wedge R).$$

Тогда краткая интерпретация записи будет следующая. Возможно использование энергии постоянного, переменного или импульсного магнитного поля. Электрический ток может быть постоянным, переменным или вообще отсутствовать, но в любом случае он индуцируется при перемещении рабочих элементов системы в магнитном поле. Механическое движение – постоянное равномерное или с дополнительным импульсным (осциллирующим). При этом

векторы, характеризующие энергетическое воздействие, взаимно перпендикулярны, или векторы $\bar{B}$ и $\bar{I}$ могут быть параллельными. Энергетическое преобразование факторов – преимущественно в механическую работу, с возможностью дополнительного преобразования в тепловую и химическую энергию.

Вторым по времени появления, уровню практического освоения и глубине теоретической проработки способом МЭО является магнитно-электриче-

ское упрочнение (МЭУ). Как отмечается в [7], предпосылкой к созданию способа МЭУ явился обнаруженный при исследованиях процесса МАО [16] эффект действия микротоков, возникающих при движении ферромагнитных зерен порошка в магнитном поле.

Сущность способа МЭУ заключается в одновременном воздействии на ферроабразивный порошок и обрабатываемую деталь электрической, магнитной и механической энергии, в результате которого под действием электрических разрядов происходит расплавление зерен порошка, сформированного магнитным полем в токопроводящие цепочки между деталью и полюсным накопником, оплавление поверхности детали, полярный перенос капель расплава на деталь, распределение расплава порошка по упрочняемой поверхности и формирование нового поверхностного слоя в магнитном поле [19].

Процесс формирования поверхности при МЭУ сопровождается одновременно двумя явлениями: нанесением покрытия и эрозией его отдельных участков, т. е. разрушением поверхностного слоя [7]. По физической сущности происходящих явлений МЭУ имеет много общего с электроискровым легированием [7, 20]. В то же время, как отмечается в [11], по характеру формирования разрядных импульсов процесс МЭУ близок вибродуговой наплавке. Основываясь на том, что основную роль – нагрев и плавление зерен порошка, выполняет энергия электрического поля, а энергия магнитного поля совместно с механической выполняет вспомогательную роль – удержание порошка и формирование токопроводящих цепочек, метод назван электромагнитной наплавкой (ЭМН). Здесь магнитное поле рассматривается как силовой фактор, воздействующий на макроскопические элементы технологической системы, в т. ч. частицы ферромагнитного порошка. При этом не принимается во внимание воздействие электромагнитных полей на микрообъемы

металла, т. е. на расплав микрованны и диффузионные процессы при формировании поверхностного слоя из расплава порошка.

Однако, результаты экспериментальных исследований, представленные далее в указанной работе, а также в ряде других [10, 13–15], свидетельствуют о более значимой роли магнитного поля в процессе формирования покрытий. Магнитная индукция влияет не только на интенсивность образования цепочек порошка, их устойчивость и электрическую проводимость, но и на распределение расплава порошка и эрозию наплавленного покрытия. Очевидно, что магнитное поле также оказывает влияние на структурные и фазовые превращения в материале поверхностного слоя при МЭУ аналогично, как и при МАО [6, 8].

Относительно терминологии при МЭУ можно отметить еще ряд вариантов, предложенных в зависимости от акцентирования внимания на отдельных явлениях и преобладающих факторах процесса. Например, нанесение покрытий магнитно-электрическим методом [21], упрочнение и восстановление деталей машин в электромагнитном поле [10], упрочнение и восстановление деталей машин наплавкой в электромагнитном поле (наплавка в ЭМП) [11] и т. п.

Необходимость дополнительной обработки для обеспечения микрогеометрии поверхности, а также развитие комбинированных технологий с применением концентрированных потоков энергии, стимулировало развитие совмещенных процессов генерации поверхностного слоя деталей машин. В качестве отдельного метода можно выделить перспективную технологию электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием (ЭМН с ППД) [11].

На основе метода МЭУ получило развитие термомеханическое упрочнение и восстановление деталей в электромагнитном поле [10] и некоторые другие упрочняющие технологии.

МЭУ является одним из эффективных методов упрочнения и восстановления деталей машин, позволяющим реализовать в едином технологическом процессе восстановление геометрических размеров и формы поверхности и создание упрочненного поверхностного слоя. Особенно эффективно применение МЭУ для упрочнения быстроизнашивающихся деталей машин и технологического оборудования, работающих в условиях абразивного и абразивно-коррозионного изнашивания с переменными по величине ударными нагрузками, а в сочетании с последующей механической обработкой позволяет также повышать долговечность деталей, работающих в условиях трения скольжения.

Технология магнитно-электрического упрочнения реализует четвертое технологическое направление генерации поверхности, т. е. формирование поверхностного слоя путем нанесения дополнительного материала на поверхность детали. В соответствии с энергетическими факторами, действующими в процессах магнитно-электрической обработки, процесс МЭУ заключается в формировании поверхности из ферромагнитных порошковых материалов под воздействием импульсов электрического тока в зоне влияния магнитного поля с (или без) направленным механическим воздействием на расплав порошка. Тогда условная символьная (см. табл. 1) запись процесса МЭУ имеет вид:

$$[\bar{B}(c \vee \omega t \vee \tau)] \perp \vee // [\bar{I}(c \vee \omega t \vee \tau)] \perp \vee // [V(c \vee c \wedge \tau) \wedge f(B, I)] \Rightarrow T \wedge R.$$

Интерпретация условной записи процесса следующая. Магнитно-электрическое упрочнение осуществляется при постоянном, переменном или импульсном воздействии магнитного поля и электрического тока. Механическое движение может быть постоянным или с дополнительным импульсным активированием. Кроме того, механическое перемещение осуществляется как результат взаимодействия магнитного поля и электрического тока. При этом векторы магнитной индукции, электрического тока и механического движения могут быть взаимно перпендикулярными и параллельными в любых их сочетаниях. Энергетическое преобразование факторов процесса – в тепловую и химическую энергию.

Условная символьная запись предусматривает полное феноменологическое многообразие возможных вариантов реализации технологии. Разумеется, в настоящее время на практике применяется ограниченное количество способов и схем процесса обработки.

В целом анализ способов маг-

нитно-электрической обработки позволяет сделать вывод, что технология МЭУ имеет много общего с процессами МАО. Так магнитно-абразивную обработку можно проводить на устройствах для магнитно-электрического упрочнения [11], т. к. в устройствах, реализующих эти процессы, силовым источником и упругой связкой является энергия магнитного поля. В обоих процессах могут применяться одни и те же ферроабразивные материалы [12, 21, 22]. Отмечается также аналогия некоторых явлений в процессе реализации методов МЭО при различных технологических направлениях формирования поверхностного слоя.

Таким образом, магнитно-абразивную обработку и магнитно-электрическое упрочнение объединяет такое свойство, как инверсионность процессов, т. е. их обратимость при соответствующем задании параметров реализации. Это свойство особенно важно при проектировании технологических модулей совмещенной обработки.

Заключение

Технология магнитно-электрической обработки реализует в основном два технологических направления генерации поверхности: методами магнитно-абразивной обработки и магнитно-электрического упрочнения. Эти методы имеют органическую связь их осуществ-

ления, основанную на принципе инверсии. Развитие свойства инверсионности представляет методологическую основу для создания технологий на принципе совмещения. Свойство совмещенности определяет основополагающий подход к созданию и развитию технологий с использованием современных технологических комплексов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 376 с.
2. Ящерицын, П. И. Основы проектирования технологических комплексов в машиностроении / П. И. Ящерицын, Л. М. Акулович, М. Л. Хейфец. – Минск: Технопринт, 2006. – 248 с.
3. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 239 с.
4. Григорьев, С. Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии / С. Н. Григорьев, Е. В. Смоленцов, М. А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 279 с.
5. Паркин, А. А. Технология обработки концентрированными потоками энергии / А. А. Паркин. – Самара: СГТУ, 2004. – 494 с.
6. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 176 с.
7. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: Навука і тэхніка, 1988. – 270 с.
8. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 215 с.
9. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 232 с.
10. Акулович, Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л. М. Акулович. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
11. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск: Технопринт, 2000. – 268 с.
12. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н. С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
13. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 463 с.
14. Шулев, Г. С. Перспективы использования магнитных и электрических полей в машиностроении и металлообработке / Г. С. Шулев // Материалы 3 науч.-техн. семинара с междунар. участием по технологии финишной обработки. – Варна (Болгария), 1987. – С. 4–7.
15. Люцко, В. А. Технология и установки магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Люцко; ПГУ. – Новополоцк, 2004. – 24 с.
16. Коновалов, Е. Г. Исследование процесса генерации поверхностей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е. Г. Коновалов, Г. С. Шулев, Б. П. Чемисов // Докл. АН БССР. – 1970. – Т. 14, № 4. – С. 127–129.
17. Кульгейко, М. П. Разработка процессов и оборудования для магнитно-абразивной обработки проволоки: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. П. Кульгейко; БПИ. – Минск, 1989. – 20 с.
18. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная зачистка кромок листов и проволоки перед сваркой / Н. С. Хомич, С. И. Романюк, М. П. Кульгейко // Материалы 4 науч.-техн. семинара с междунар. участием по неконвенцион. технологиям в машиностр. – Ботевград, 1989. – Т. 2. – С. 36–45.
19. Механизм формирования поверхностного слоя при магнитно-электрическом упрочнении / М. П. Кульгейко [и др.] // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2000. – № 1. – С. 19–25.
20. Химухин, С. Н. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии: монография / С. Н. Химухин, Хосен Ри, Э. Х. Ри. – Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2015. – 127 с.

21. **Петришин, Г. В.** Износостойкие гетерогенные покрытия из борированных материалов на основе отходов стальной дробы, нанесенных магнитно-электрическим методом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. В. Петришин; ПГУ. – Новополоцк, 2006. – 24 с.

22. **Хомич, Н. С.** Работоспособность ферромагнитных абразивов в условиях автоматизированной обработки длинномерных изделий / Н. С. Хомич, М. П. Кульгейко, А. П. Лепший // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Пензен. политехн. ин-т, 1991. – Вып. 19. – С. 49–53.

Статья сдана в редакцию 24 ноября 2020 года

Михаил Петрович Кульгейко, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный университет транспорта. Тел.: 8-029-141-35-64. E-mail: kulgeyko82@rambler.ru.

Григорий Валентинович Петришин, канд. техн. наук, доц., Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-029-188-76-50. E-mail: petrishin@gstu.by.

Наталья Михайловна Симанович, аспирантка, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-044-545-83-59. E-mail: kulgeikolianat@mail.ru.

Mikhail Petrovich Kulgeiko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State University of Transport. Tel.: 8-029-141-35-64. E-mail: kulgeyko82@rambler.ru.

Grigori Valentinovich Petrishin, PhD (Engineering), Associate Prof., P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: 8-029-188-76-50. E-mail: petrishin@gstu.by.

Natalia Mikhailovna Simanovich, PhD student, P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: 8-044-545-83-59. E-mail: kulgeikolianat@mail.ru.

УДК 629.113

А. С. Мельников, М. Е. Лустенков, А. А. Мельников

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАДНЕГО ТОРМОЗНОГО МЕХАНИЗМА КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

UDC 629.113

A. S. Melnikov, M. E. Lustenkov, A. A. Melnikov

IMPROVING THE EFFICIENCY OF REAR BRAKE MECHANISM OF WHEELED TRACTORS

Аннотация

Рассматривается разработанный тормозной механизм задних колес ведущего моста колесного трактора. Предложенный тормозной механизм позволяет повысить эффективность работы путем создания эффекта самоусиления.

Ключевые слова:

тормозной механизм, повышение эффективности, самоусиление.

Abstract

The brake mechanism developed for rear wheels of the driving axle of a wheeled tractor is considered. The braking mechanism proposed makes it possible to increase the efficiency of operation by creating a self-enhancement effect.

Keywords:

brake mechanism, efficiency improvement, self-enhancement.

Введение

Повышение энергонасыщенности, веса и средних скоростей движения тракторов, выпускаемых Минским тракторным заводом, потребовало повышения эффективности тормозной системы, устанавливаемой на тракторы.

Предлагается оснастить задние колеса тракторов, выпускаемых Минским тракторным заводом, разработанным тормозным механизмом. Это позволит добиться повышения эффективности торможения путем полного использования веса трактора, приходящегося на задние колеса. Согласно требованиям, предъявляемым к тормозному механизму трактора, и исходя из условий работы трактора, была принята конструкция дискового тормоза закрытого типа для задних колес [1–8].

Отличие разработанного тормозного механизма заключается в создании условий для снижения величины необходимых приводных усилий на основании использования эффекта самоусиления.

Цель исследования

Цель исследования – повышение эффективности торможения колеса трактора путем полного использования сцепного веса, приходящегося на задние колеса при увеличении общего веса трактора, возникающего при развитии его конструкции, на основе разработки тормозного механизма, обладающего высокими значениями создаваемых тормозных моментов.

Методика исследования

Для формирования требований к разрабатываемому тормозному механизму, выбора оптимальной схемы интеграции тормозного механизма в конструкцию заднего моста и определения его основных параметров рассмотрим тормозные системы тракторов ведущих фирм-производителей.

Учитывая, что тормозной механизм разрабатывается исходя из конструктивных особенностей тракторов, выпускаемых Минским тракторным заводом, рассмотрим более подробно тормозные механизмы и их размещение в конструкции заднего моста трактора «Беларус-1523».

На основе анализа тормозов, используемых в колесных тракторах ведущих фирм-производителей тракторов, можно определить общие принципы построения тормозных систем колесных тракторов.

Особенности конструкции тормозных систем отдельных моделей тракторов представлены в табл. 1.

Рабочие тормоза подавляющего большинства тракторов фирм «Сэйм» (SAME), «Ситайр» (STEYR), «Казе Их» (CASE IH), «Мэсси Фергюсон» (MASSEY FERGUSON), «Линднер» (LINDNER) дисковые, работающие в масле, встроенные в задний мост и расположенные перед конечной передачей. Возросшие до 50 км/ч скорости движения тракторов при выполнении транспортных работ требуют повышения эффективности тормозных систем. В связи с этим в процессе торможения участвуют все ведущие колеса, что обеспечивается подключением переднего ведущего моста (ПВМ) при торможении или установкой отдельного тормоза в приводе ПВМ. Такие фирмы, как «Сэйм» (SAME), «Ламборгини» (LAMBORGHINI), «Хурлиман» (HURLIMAN), «Ландини» (LANDINI), «Дойтц» (DEUTZ), устанавливают тормоза в переднем ведущем мосту. Фирма «Джей Си Би» (JCB)

на тракторах серии Fastrac устанавливает сухие дисковые тормоза (как на легковых автомобилях). Привод тормозных механизмов чаще всего является гидравлическим, используются усилители. Рабочие тормоза имеют, как правило, раздельный, двухпедальный привод на правую и левую стороны, педали блокируются различными устройствами [1].

Используемые в настоящее время тормоза задних колес трактора «Беларус-1523», представленные на рис. 1, являются дисковыми. Фрикционные диски 2 установлены на шлицевых концах ведущих шестерен конечных передач 8. Нажимные диски 5 конструктивно подобны применяемым в сухих тормозах, но имеют уменьшенный угол подъема лунок под шарики для обеспечения необходимого усилия сжатия пакетов фрикционных и промежуточных дисков.

Промежуточные диски 3 фиксируются от проворота в корпусах 7 и 1 при помощи заплечников, выполненных на наружном контуре. Герметичность масляных ванн обеспечивается уплотнительными кольцами, прокладками и резиновыми чехлами. Корпуса снабжены контрольными и сливными пробками. Управление тормозами осуществляется через валик педалей 4. Вместе с фрикционными дисками 2 в шлицевых концах ведущих шестерен конечных передач 8 размещена муфта блокировки дифференциала 9.

Наиболее существенной особенностью данного дискового тормозного механизма, используемого для задних колес тракторов производства Минского тракторного завода, является его недостаточная эффективность при увеличившихся весе и средних скоростях движения, сложность, возрастание стоимости при применении гидравлического привода из-за необходимости повышения приводных усилий, при сохранении конструкции имеющегося тормозного механизма.

Табл. 1. Особенности конструкции тормозных систем тяговых колесных машин

Фирма	Серия	Мощность, л. с.	Максимальная ско- рость, км/ч	Рабочий тормоз	Стояночный тормоз	Примечание
«Сэйм» (SAME)	Frutteto	55...95	40	«Мокрые» дисковые с гидравлическим приводом, торможение четырех колес, раздельное торможение задних колес, два тормоза в конечных передачах переднего моста, минеральное масло	Независимый ручной привод рабочих тормозов заднего моста, рычаг слева	—
	Dorado	55...87	37			—
	Silver	90...135	40			Пневмопривод тормозов прицепа по заказу
	Iron	141...184				
	Diamond	227...277				
«Джон Дир» (JOHN DEERE)	5020	72...88	40	Одnodисковые в масляной ванне	—	—
	6020	80...160	40	Одnodисковые в масляной ванне, саморегулирующиеся, гидропривод, автоматическое подключение ПВМ	Независимый в масле, парковое положение в коробке передач	—
			50	Одnodисковые в масляной ванне, саморегулирующиеся, сервогидропривод	Независимый ленточный в масле, рычаг слева, парковое положение в коробке передач	
	7020	170...200	—	—	—	—
	8020	200...295	42			
	9020	375...450	40	Многодисковые серво-тормоза на обеих осях, гидропривод	Дополнительный ручной дисковый тормоз в коробке передач, парковое положение в коробке передач	—
	«Мэсси Фергюсон» (MASSEY FERGUSON)	MF2400	66...82	40	В масляной ванне, гидропривод, торможение четырех колес	Торможение четырех колес, рычаг справа
MF3400		67...98				
MF4400		74...98				
MF5300		82...120				
MF 5400		75...120				

Продолжение табл. 1

Фирма	Серия	Мощность, л. с.	Максимальная ско- рость, км/ч	Рабочий тормоз	Стояночный тормоз	Примечание
«Мэсси Фергюсон» (MASSEY FERGU- SON)	MF 6400	115...215	—	«Мокрые» дисковые, диаметр диска 356 мм, включение переднего моста при торможении, привод от гидросистемы трактора	Рычаг слева	—
	MF 7400	120...185		«Мокрые», два диска, диаметр диска 356 мм, включение переднего моста при торможении, привод от гидросистемы трактора		Комбинированный пневмопривод тормозов прицепа
	MF 8400	215...290		«Мокрые», четыре диска, диаметр диска 312 мм, площадь трения 1290 см ² , включение переднего моста при торможении, привод от гидросистемы трактора		
«Дойтц Фар» (DEUTZ FAHR)	Agrokid	30...50	40	—	—	—
	Agrolux	50...90		Четыре дисковых «мокрых» тормоза передней оси однодисковые, задней оси многодисковые, гидропривод, минеральное масло	Механический привод рабочих тормозов задней оси, рычаг слева	—
	Agrocompact	70...95				
	Agroplus	58...101				
	Agrotron MK3	99...118	50	Дисковые в масле в заднем мосту, подключение при торможении переднего моста, гидропривод, минеральное масло		
		131...260				
«Фэндт» (FENDT)	200S	59...76	—	—	—	—
	Farmer 300Ci	92...112	40	Задние дисковые, передние барабанные, гидропривод, тормозная жидкость	Дисковый на карданном валу, на все колеса, рукоятка слева вытяжного типа	—
	Farmer 400 Vario	95...128	50	«Мокрые» многодисковые в заднем мосту, включение переднего моста при торможении, гидропривод, тормозная жидкость	Рычаг слева	По заказу: пневмопривод тормозов прицепа, моторный тормоз-замедлитель
	Favorit 700 Vario	126...185		«Мокрые» многодисковые в заднем мосту, «мокрый» многодисковый на карданном приводе переднего моста, пневмопривод	Рычаг выключения пружинного пневмоэнергo-аккумулятора	Пневмопривод тормозов прицепа. По заказу моторный тормоз-замедлитель
	800 Vario	168...195				
	Favorit 900 Vario	198...310				
	828 EVO	180	65	Тормоза четырех колес, передние дисковые, пневмопривод, антиблокировочная система	—	—

Окончание табл. 1

Фирма	Серия	Мощность, л. с.	Макси- мальная ско- рость, км/ч	Рабочий тормоз	Стояночный тормоз	Примечание
«Нью Холланд» (NEW HOL- LAND)	TL TS TM	72...100 101...136 124...194	40	Четыре тормоза диско- вые «мокрые» в заднем и переднем мостах, гидро- привод	Ручной привод тормозов заднего моста, рычаг справа	—
	TVT	134...192	50		—	—
	TG	225...311			—	—
«Ламбор- гини» (LAMBO RGHINI)	R4	90...114	40	Передние и задние дис- ковые, гидропривод че- тырех тормозов, три ре- жима торможения	Ручной привод задних тормозов	—
	R6	141...184				—
	R7	185...214				По заказу: пнев- мопривод тормо- зов прицепа
	R8	227...277				Пневмопривод тормозов при- цепа

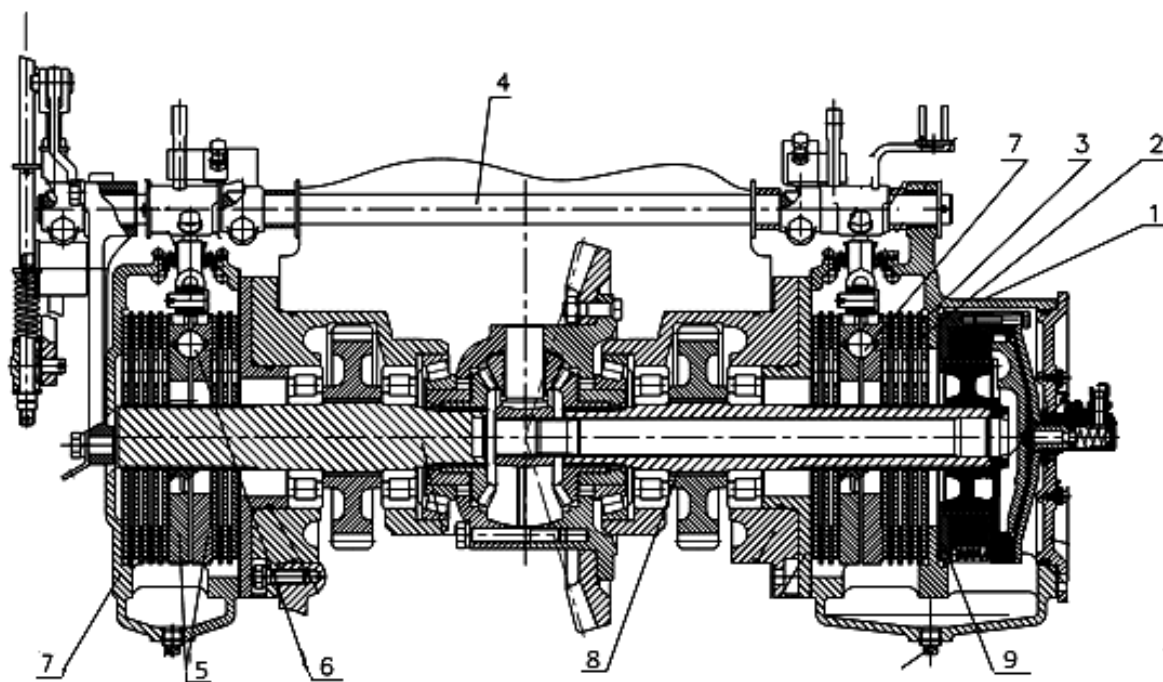


Рис. 1. Рабочие тормоза трактора «Беларус-1523»: 1 – корпус тормоза; 2 – диск фрикционный; 3 – диск промежуточный; 4 – валик педалей; 5 – диск нажимной; 6 – шарик; 7 – корпус тормоза; 8 – ведущая шестерня конечной передачи; 9 – муфта блокировки дифференциала

Это означает, что использование гидравлического привода дискового тормоза без изменения его конструкции влечет за собой увеличение общей стоимости и сложности как тормозной системы, так и самого трактора.

Недостаточная эффективность выражается в том, что используемый механизм не в состоянии создать необходимые усилия прижатия колодок к корпусу и тормозному кожуху, и вызвана повышением веса тракторов «Беларус-1523, -1222» и др., а также увеличением средних скоростей движения.

В связи с этим возникла задача повысить эффективность тормозных механизмов для обеспечения полного использования веса трактора, приходящегося на задние колеса, и гарантированности безопасности движения тракторов по дорогам общего пользования.

Тормозной механизм задних колес трактора с самоуслением

При разработке тормоза задних колес учитывались требования к тормозному механизму, сформированные исходя из условий работы трактора, минимальных материальных и финансовых затрат при разработке данного механизма.

Для разработанного дискового тормоза задних колес принята схема закрытого тормоза аналогично применяемой в настоящее время. Использование закрытого типа тормоза позволяет избежать воздействия внешних негативных факторов при работе трактора в неблагоприятных погодных и климатических условиях.

Исходя из удовлетворения требований по уменьшению стоимости и материалоемкости, связанных с изменением конструкции заднего моста трактора при установке тормозного механизма, разрабатываемый тормоз размещается на конструктивных элементах, использующихся для размещения штатного тормоза.

В данном случае используется имеющийся шлицевой вал для размещения тормозных дисков с фрикционными накладками. Корпус заднего моста с накладкой выполняет функцию неподвижной поверхности, как и в штатном тормозе. Механизм привода штатного тормоза используется для разработанного тормоза и сохранил свои основные конструктивные элементы.

Дисковые тормозные механизмы задних колес трактора показаны на рис. 2. Дисковые тормозные механизмы 1 установлены на корпусе заднего моста 3 колесного трактора и связаны с колесами трактора 4 через полуось 5 шестерни бортовой передачи и дифференциал 2.

Дисковый тормозной механизм (рис. 3) содержит: корпус 1, являющийся одновременно корпусом заднего моста трактора; кожух тормоза 13, зафиксированный неподвижно на корпусе 1 с помощью болтов 3 и 14; шлицевой вал 19; два нажимных диска 8 и 15, установленные на шлицевом валу 19 с помощью шлицевого соединения; две фрикционные накладки 9 и 18, прикрепленные к нажимным дискам 8 и 15; шарики 4, 7, 16 и 17; промежуточный диск 6, выполненный с двумя наклонными торцевыми поверхностями, свободно установленный на шлицевом валу 19 между двумя нажимными дисками 8 и 15, которые выполнены с наклонной торцевой поверхностью.

Шарики 4, 7, 16 и 17 установлены в канавках, выполненных в торцевых наклонных поверхностях промежуточного диска 6 и двух нажимных дисков 8 и 15. Каждая фрикционная накладка 9 и 18 прикреплена к рабочей поверхности соответствующего нажимного диска 8 и 15. Имеются две отжимные пружины 2 и 10. Первая отжимная пружина 2 установлена между корпусом 1 и нажимным диском 15; вторая отжимная пружина 10 установлена между нажимным диском 8 и шайбой 11, закрепленной на торце шлицевого вала 19 с помощью болта 12.

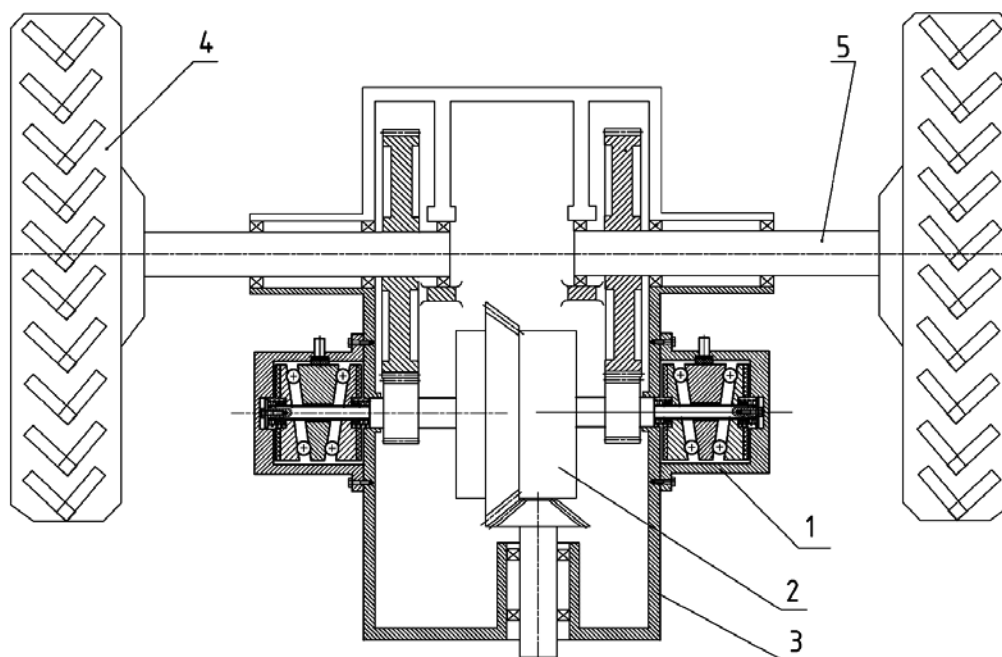


Рис. 2. Задний мост трактора с установленными тормозными механизмами: 1 – тормозной механизм; 2 – дифференциал; 3 – корпус заднего моста; 4 – заднее колесо; 5 – полуось

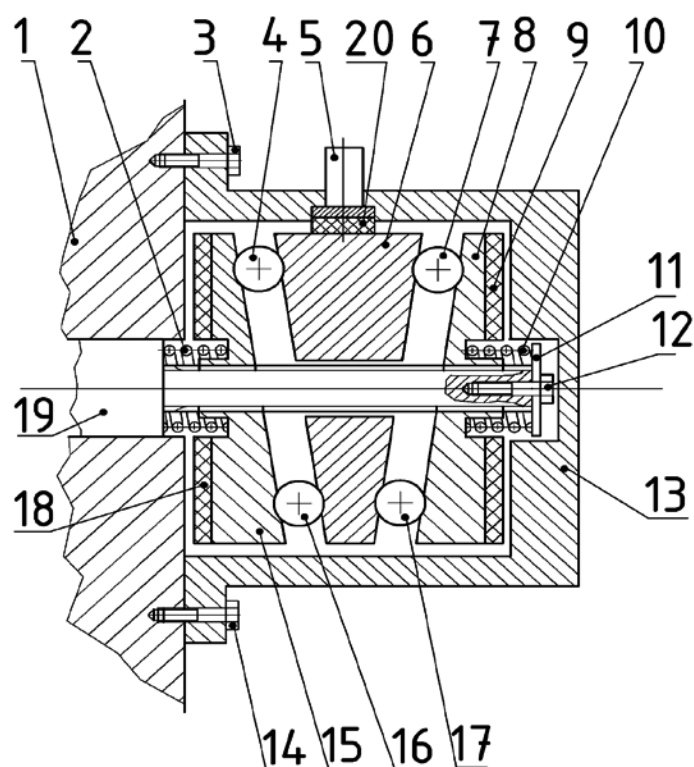


Рис. 3. Тормозной механизм: 1 – корпус заднего моста; 2 – возвратная пружина левая; 3 – винт крепления крышки; 4 – шарики; 5 – шток; 6 – промежуточный диск; 7 – корпус тормоза; 8 – ведущая шестерня конечной передачи; 9 – фрикционная накладка; 10 – возвратная пружина правая; 11 – упорная шайба; 12 – винт крепления шайбы; 13 – кожух; 14 – винт крепления крышки; 15 – нажимной диск; 16 – шарик; 17 – шарик; 18 – фрикционная накладка; 19 – шлицевой вал; 20 – фрикционная накладка

Шток 5 с фрикционной накладкой 20 установлен в кожухе тормоза 13 и контактирует с фрикционной накладкой 20 по боковой поверхности промежуточного диска 6.

Главное отличие разработанного тормозного механизма от своих прототипов заключается в том, что прижатие тормозных дисков происходит не под действием усилия оператора, а вследствие сил, возникающих в тормозном механизме при создании эффекта самоусиления. Оператор при этом прикладывает лишь управляющее воздействие.

При торможении прикладывается усилие к штоку 5 с фрикционной накладкой 20, установленному в кожухе тормоза 13. Шток 5 с фрикционной накладкой прижимается к промежуточному диску 6, выполненному с двумя наклонными торцевыми поверхностями, и останавливает его.

Остановленный промежуточный диск 6 разжимает нажимные диски 8 и 15, выполненные с одной наклонной торцевой поверхностью, с установленными на нажимные диски 8 и 15 фрикционными накладками 9 и 18, воздействуя на них через четыре шарика 4, 7, 16 и 17, равномерно расположенные по диаметру промежуточного диска 6.

Нажимные диски 8 и 15, закрепленные с помощью шлицевых соединений, продолжают вращаться на шлицевом валу 19.

Нажимной диск 15, преодолевая сопротивление пружины 2, установленной на шлицевом валу 19, прижимает фрикционную накладку 18 к корпусу 1 и затормаживает нажимной диск 15 и шлицевой вал 19.

Нажимной диск 8, преодолевая сопротивление пружины 10, зафиксированной на шлицевом валу 19 с помощью упорной шайбы 11 и болта 12, прижимается к кожуху тормоза 13, который закреплен на корпусе 1 с помощью болтов 3 и 14, и затормаживает нажимной диск 8 и шлицевой вал 19.

Шлицевой вал 19 передает

тормозное усилие через шестерни 24 на ведомый вал 22, который установлен в корпусе 1 на подшипниках 21, и затормаживает колесо трактора.

При растормаживании, после снятия усилия, приложенного к штоку 5 с фрикционной накладкой 20, установленному в кожухе тормоза 13, шток 5 с фрикционной накладкой 20 отходит от промежуточного диска 6 и промежуточный диск 6 растормаживается.

Под действием пружины 2, установленной на шлицевом валу 19, нажимной диск 15 отходит от корпуса 1, позволяя растормозить шлицевой вал 19. Под действием пружины 10, зафиксированной на шлицевом валу 19 с помощью упорной шайбы 11 и болта 12, второй нажимной диск 8 отходит от кожуха тормоза 13, который закреплен на корпусе 1 с помощью болтов 3 и 14, также позволяя растормозить шлицевой вал 19.

Нажимные диски 8 и 15 воздействуют на промежуточный диск 6 через четыре шарика 4, 7, 16 и 17, равномерно расположенные по его диаметру, поворачивая промежуточный диск 6, и растормаживают шлицевой вал 19.

Результаты исследования

Разработанный тормозной механизм задних колес имеет конструктивные особенности, позволяющие устанавливать его на заднем мосту трактора без значительных изменений конструкции заднего моста трактора «Беларус-1523».

Тормозной механизм размещен на внешней боковой поверхности заднего моста трактора, тормозные диски с фрикционными накладками – на шлицевом валу, вращение которому передается от бортовой передачи заднего моста трактора. Схема размещения тормоза соответствует схеме размещения штатного тормоза.

Изменения коснулись шлицевого вала и крышки тормозного механизма. На шлицевом валу предусмотрено размещение возвратной пружины, функцию

крышки тормозного механизма в разработанном тормозе выполняет кожух тормоза, закрепляемый винтами к корпусу заднего моста.

Таким образом, разработанный дисковый тормоз для задних колес трактора «Беларус-1523» не требует значительного изменения конструкции заднего моста, а незначительные изменения касаются только двух деталей: шлицевого вала и крышки тормозного механизма.

В конструкции тормозного механизма реализован эффект самоусиления, позволяющий получать высокие значения тормозного момента без увеличения радиуса тормозных дисков и приводных усилий.

Принципиальное отличие разработанного тормоза заключается в том, что оператор не создает усилие, сжимающее тормозные диски, формируя тем самым тормозной момент, а управляет самоусилением тормоза. Управляющее воздействие оператора в этом случае значительно меньше усилия, необходимого для сжатия тормозных дисков, и не требует использования усилителей или гидравлического привода.

Заключение

1. Разработанный тормозной механизм, создающий высокие значения тормозных моментов, повышает эффек-

тивность торможения трактора путем полного использования сцепного веса, приходящегося на задние колеса при увеличении общего веса трактора, возникающего при развитии его конструкции.

2. В тормозном механизме реализован эффект самоусиления, что позволяет повысить эффективность тормоза при сохранении массогеометрических параметров тормоза.

3. Разработанный тормозной механизм позволяет применить измерительные устройства, дающие возможность использования тормоза в составе антиблокировочной системы, функционирующей на принципе анализа силовых факторов, возникающих в контакте колеса с опорной поверхностью.

4. Конструктивные параметры разработанного тормозного механизма не требуют значительных изменений конструкции трактора при внедрении его в конструкцию заднего моста, что существенно снижает финансовые и материальные затраты, связанные с внедрением тормозного механизма в конструкцию тормозной системы трактора.

5. Использование тормоза на тракторах, выпускаемых Минским тракторным заводом, позволит повысить безопасность движения, увеличить объем реализации тракторной техники как на внутреннем, так и на внешнем рынке вследствие повышения эффективности тормозной системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тормозные системы колесных машин: монография / И. С. Сазонов [и др.]; под общ. ред. И. С. Сазонова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – 351 с.
2. Повышение эффективности тормоза передних колес трактора МТЗ / А. С. Мельников [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1. – С. 42–53.
3. Тормоз передних ведущих колес трактора «Беларус» / А. С. Мельников [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 3. – С. 33–40.
4. Мамити, Г. И. Проектирование тормозов автомобилей и мотоциклов / Г. И. Мамити. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 111 с.
5. Барабанный тормозной механизм транспортного средства: пат. ВУ21724 / А. В. Юшкевич, М. Л. Петренко, А. С. Мельников, И. С. Сазонов, В. А. Ким, П. А. Амелеченко. – Оpubл. 30.04.2018.
6. Тормоз ведущего переднего моста колесного трактора: пат. ВУ 9620 / А. С. Мельников, И. С. Сазонов, В. А. Ким, П. А. Амелеченко, А. Г. Стасилевич, М. Л. Петренко, А. В. Юшкевич. – Оpubл. 30.10.2013.

7. Теоретический метод анализа эффективности и быстродействия барабанного тормоза / И. С. Сазонов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 3. – С. 121–126.

8. Дисковый тормозной механизм: пат. ВУ 9621 / А. С. Мельников, И. С. Сазонов, В. А. Ким, П. А. Амелеченко, А. Г. Стасилевич, М. Л. Петренко, А. В. Юшкевич. – Опубл. 30.10.2013.

Статья сдана в редакцию 12 ноября 2020 года

Александр Сергеевич Мельников, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: f_av@bru. mogilev.by.

Михаил Евгеньевич Лустенков, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
E-mail: f_av@bru. mogilev.by.

Артем Александрович Мельников, магистрант, Белорусско-Российский университет.
E-mail: f_av@bru. mogilev.by.

Aleksandr Sergeyevich Melnikov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: f_av@bru. mogilev.by.

Mikhail Evgenyevich Lustenkov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: f_av@bru. mogilev.by.

Artem Aleksandrovich Melnikov, MSc student, Belarusian-Russian University.
E-mail: f_av@bru. mogilev.by.

УДК 621.787.6

В. М. Пашкевич, В. В. Афаневич

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ, ОБЕСПЕЧИВАЕМОЙ ПРИ ИНЕРЦИОННО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

UDC 621.787.6

V. M. Pashkevich, V. V. Afanovich

EMPIRICAL MODEL OF ROUGHNESS PRODUCED DURING INERTIAL IMPACT TREATMENT

Аннотация

Представлены результаты исследования шероховатости поверхности, получаемой при инерционно-импульсном раскатывании после растачивания. Выявлено влияние факторов на формирование шероховатости обработанной поверхности. В качестве обрабатываемой поверхности использован высокопрочный чугун.

Ключевые слова:

поверхностно-пластическое деформирование, инерционно-импульсная обработка, полный факторный эксперимент, экспериментальные исследования, шероховатость поверхности.

Abstract

The paper presents the results of studying the surface roughness obtained by inertial impact rolling after boring. The effect of factors on the formation of roughness of the surface treated has been revealed. High-strength cast iron has been used as the surface subjected to treatment.

Keywords:

surface plastic deformation, inertial impact treatment, complete factorial experiment, experimental studies, surface roughness.

Введение

Шероховатость поверхности оказывает существенное влияние как на эксплуатационные свойства деталей машин, так и на качество подвижных и неподвижных соединений. Шероховатость поверхности влияет на износостойкость от истирания, сопротивление коррозии, прочность, плотность (герметичность) соединений, химическую стойкость, внешний вид и т. д. Поэтому при проектировании деталей машин и механизмов данному фактору уделяется особое внимание.

Исследования шероховатости при инерционно-импульсной обработке

Экспериментальные исследования влияния исходной шероховатости поверхности и режимов обработки (осевой подачи инструмента на один оборот и частоты вращения заготовки) на качество обработанной инерционно-импульсным раскатыванием поверхности проводились с использованием в качестве технологического оборудования для привода инструмента токарно-винторезного станка модели 16K20ПФ1 в описанном далее порядке. Применяемый материал заго-

товки – специальный высокопрочный чугун с механическими характеристиками, близкими к чугуну марки ВЧ60.

В качестве факторов, оказывающих влияние на шероховатость обрабатываемой инерционно-импульсным раскатыванием поверхности, были приняты три параметра, рассмотренные при конечно-элементном моделировании процесса, – исходная шероховатость поверхности, подача инструмента за оборот заготовки и частота вращения заготовки (шпинделя станка), обеспечивающая необходимую скорость деформирующего шара в момент нанесения удара по обрабатываемой поверхности.

На первом технологическом переходе (при предварительной обработке) заготовки с исходным диаметром отверстия $78 \pm 0,2$ мм закреплялись в трехкулачковом патроне и растачивались до формирования диаметра $79,8^{+0,1}$ мм. Далее, на втором технологическом переходе, для обеспечения постоянства баз заготовка без переустановки подвергалась окончательному растачиванию до диаметра $80_{-0,1}$ мм с режимами, позволяющими получить требуемую для заданного матрицей планирования эксперимента исходную шероховатость обработанной поверхности.

Нижнему уровню фактора исходной шероховатости соответствовали поверхности с величиной среднего арифметического отклонения профиля $Ra = 1,984$ мкм (рассеивание измеренных значений – $1,82...2,26$ мкм), а верхнему уровню – $Ra = 6,413$ мкм (рассеивание $5,83...7,24$ мкм). Для достижения указанных уровней фактора при использовании выбранного расточного резца с режущей пластиной из твердого сплава экспериментальным путем были определены следующие режимы растачивания: $n = 400$ мин⁻¹, $S_o = 0,05$ мм/об (для $Ra = 1,984$ мкм) и $n = 400$ мин⁻¹, $S_o = 0,2$ мм/об (для $Ra = 6,413$ мкм).

После чистовой токарной обработки производилась оценка полученной исходной шероховатости поверх-

ности. Для измерений использовался портативный компьютерный профилометр-профилограф модели SJ-210 фирмы Mitutoyo. С целью соблюдения принципа постоянства баз перед третьим, отделочным, переходом (инерционно-импульсным раскатыванием) такие измерения проводились без съема заготовки со станка (рис. 1) для обеспечения совпадения осей заготовки и инструмента.

Оценка шероховатости производилась на пяти различных участках обработанной поверхности. Отсутствие промахов при измерениях контролировалось на основе использования критерия Диксона. Среднее значение параметра Ra использовалось в качестве расчетного значения для построения модели.

Кроме оценки параметра шероховатости Ra , производилась запись профилограмм поверхностей.

Для реализации третьего технологического перехода – инерционно-импульсной обработки (ИИО) внутренней поверхности заготовки – для обеспечения заданной осевой подачи инструмента было изготовлено приспособление, осуществляющее жесткую связь суппорта станка и задней бабки, в пиноли которой был установлен раскатник для инерционно-импульсной обработки (рис. 2).

Таким образом, устанавливая на станке требуемую величину подачи суппорта за оборот заготовки, обеспечивали осевую подачу инструмента.

Исследования проводились по методике полного факторного эксперимента, обеспечивающей все возможные комбинации исходных параметров. При этом выполнялась обработка заготовок с комбинациями следующих режимов, соответствующих верхнему и нижнему уровням факторов:

- частота вращения заготовки $n_{\min} = 630$ мин⁻¹, $n_{\max} = 1000$ мин⁻¹;
- подача инструмента $S_o_{\min} = 0,05$ мм/об; $S_o_{\max} = 0,2$ мм/об.

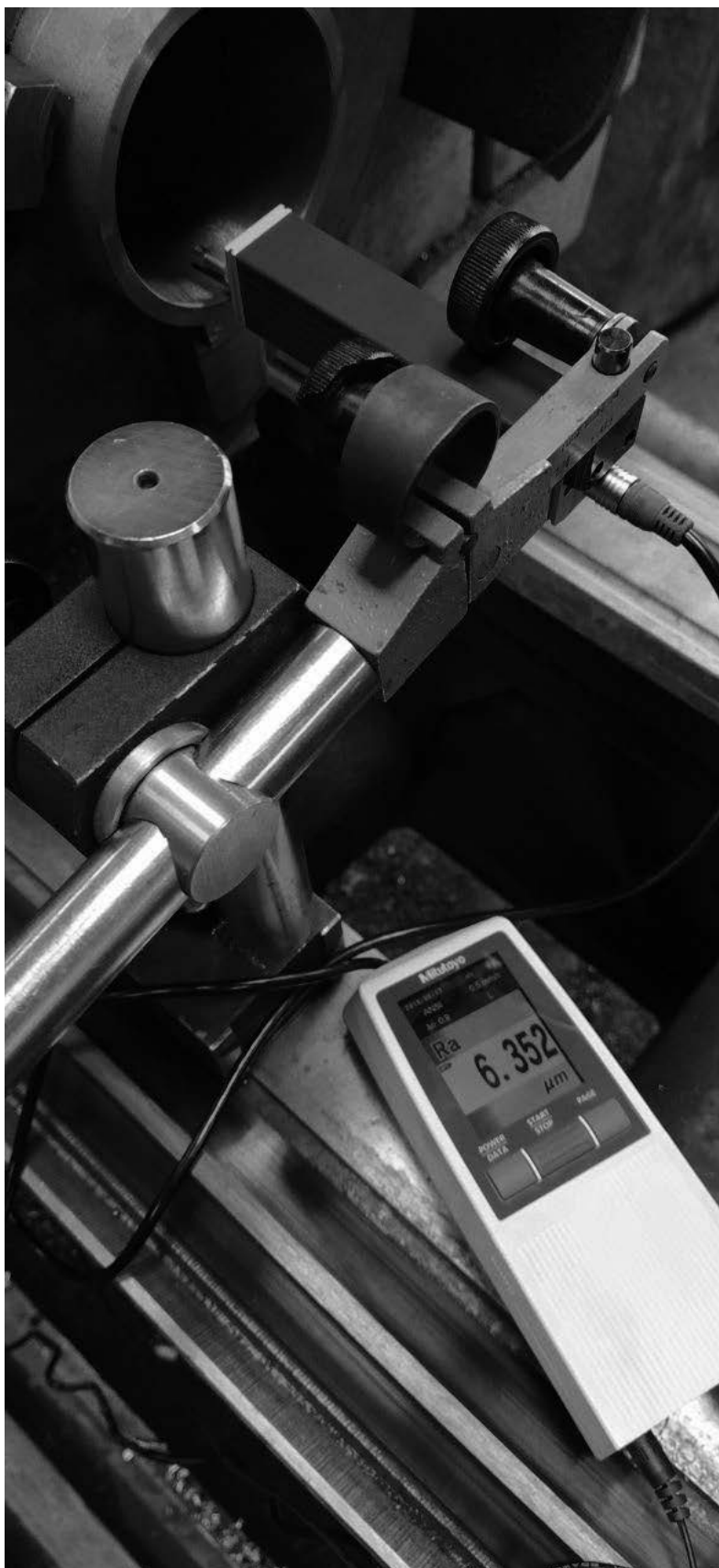


Рис. 1. Измерения исходной шероховатости перед ИИО

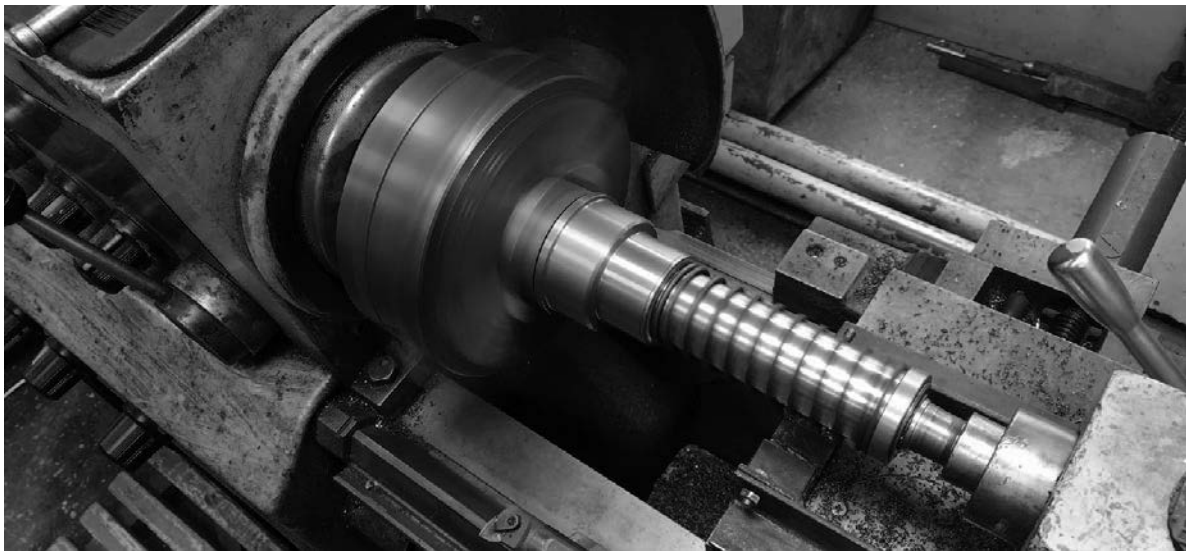
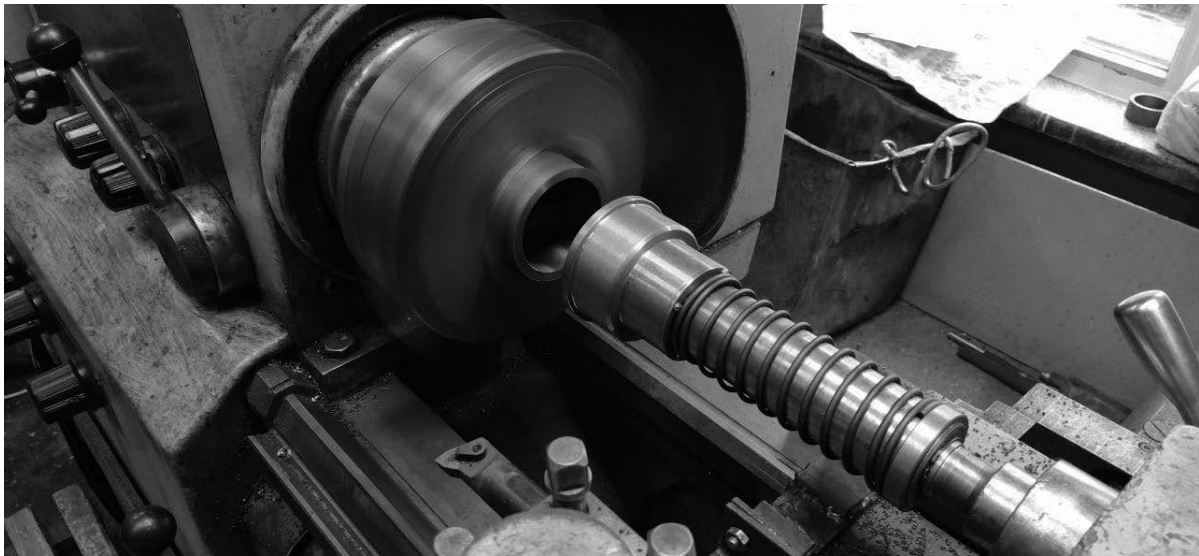


Рис. 2. ИИО заготовки на станке 16K20ПФ1

После инерционно-импульсного раскатывания заготовка снималась со станка, устанавливалась на измерительной плите профилометра-профилографа, затем проводились измерения шероховатости поверхности, сформированной ИИО. Измерения параметра Ra и запись профилограмм велись на пяти различных участках заготовки. Анализ профилограмм исходных заготовок и заготовок, прошедших ИИО, свидетельствует о возможности существенного снижения исходной шероховатости, а также позволяет сделать предварительный вывод о

возможности управления величиной параметра Ra с помощью выбранных факторов – исходной шероховатости, подачи инструмента и частоты вращения заготовки.

Так, на рис. 3 представлены совмещенные профилограммы поверхностей заготовки, полученных после растачивания и инерционно-импульсного раскатывания. Следует отметить, что регулярный профиль после растачивания заметно изменяется и приобретает частично-регулярный характер. Кроме того, существенно снижается величина

исходной шероховатости. При смятии микронеровностей в большей мере сглаживаются их вершины; следы

обработки токарным резцом могут частично сохраняться во впадинах микронеровностей.

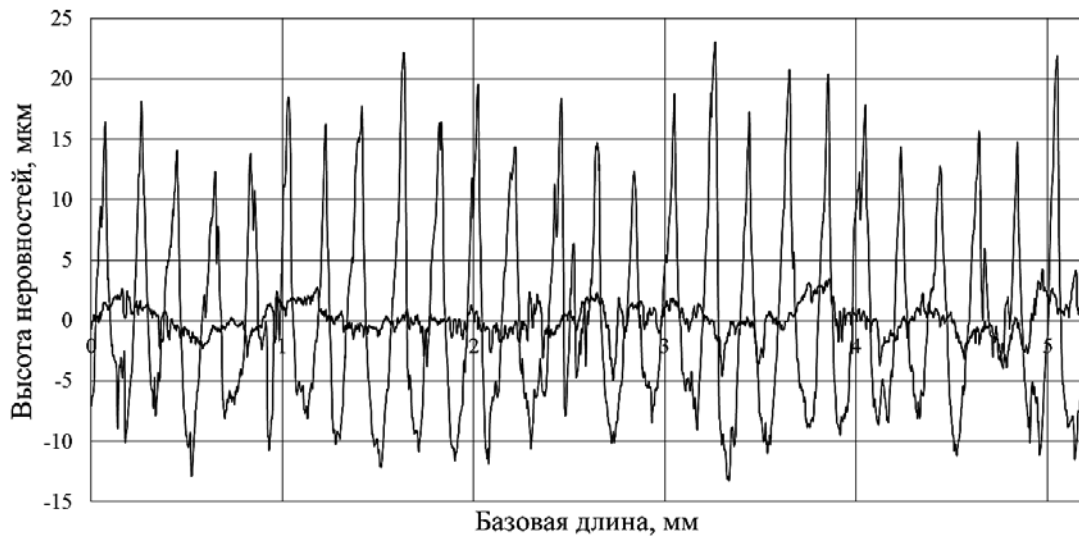


Рис. 3. Совмещенные профилограммы поверхностей заготовки, полученных после чернового точения и инерционно-импульсного раскатывания

Обработка результатов экспериментов

Структура эмпирической модели, построенной с использованием описанной выше методики, представлена на рис. 4. Как отмечалось, в ней в качестве факторов выбраны три параметра:

Ra_i – исходная шероховатость заготовки по параметру Ra , мкм; s – подача инструмента, мм/об; n – частота вращения заготовки (шпинделя станка), мин^{-1} . В качестве переменной отклика модели принята конечная шероховатость поверхности Ra_k , достигнутая в процессе ИИО.

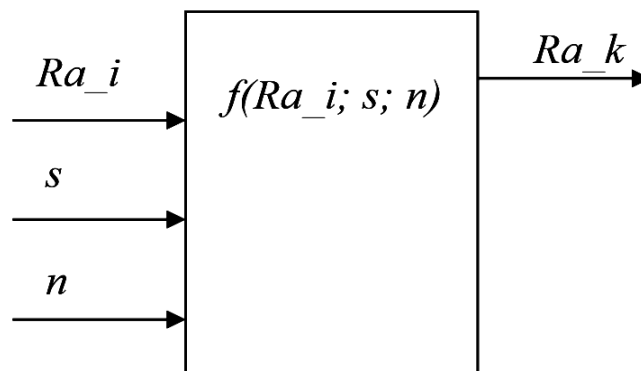


Рис. 4. Структурная схема эмпирической модели шероховатости поверхности при ИИО

В качестве интервалов варьирования факторов выбраны интервалы, совпадающие с интервалами конечно-элементного моделирования процесса ИИО (см. Исследования шероховатости при

инерционно-импульсной обработке).

Результаты полного факторного эксперимента по исследованию шероховатости поверхности после ИИО представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты полного факторного эксперимента

N	z_0	z_1	z_2	z_3	z_{12}	z_{13}	z_{23}	z_{123}	Ra_{k1}	Ra_{k2}	Ra_{k3}	Ra_{k4}	Ra_{k5}	Ra_{sr}
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1,31	1,49	1,31	1,39	1,34	1,368
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1,75	1,79	1,56	1,64	1,77	1,702
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1,62	1,39	1,45	1,5	1,53	1,498
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	4,24	3,64	3,41	3,64	4,17	3,82
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,93	0,87	0,92	0,96	0,91	0,918
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1,03	0,95	0,93	1,03	1,06	1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1,64	1,47	1,58	1,34	1,31	1,468
8	1	1	1	1	1	1	1	1	3,32	3,2	3,74	4	3,76	3,604

Переменными z_1, z_2, z_3 обозначены нормированные к единичному интервалу значения факторов Ra_i, s, n соответственно. В столбцах $Ra_{k1}...Ra_{k5}$ приведены эмпирические данные шероховатости после ИИО в пяти дублирующих экспериментах ($u = 5$). Значение Ra_{sr} – среднее для каждого из восьми уровней ($i = N = 5$).

Модель строилась в полнофакторной форме

$$Ra_k = A_0 + A_1 z_1 + A_2 z_2 + A_3 z_3 + A_{12} z_1 z_2 + A_{13} z_1 z_3 + A_{23} z_2 z_3 + A_{123} z_1 z_2 z_3. \quad (1)$$

При этом коэффициенты определялись по зависимости

$$A_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_{ki} \cdot y_i, \quad (2)$$

где y_i – экспериментальные значения шероховатости, представленные в столбцах $Ra_{k1}...Ra_{k5}$ матрицы планирования.

Расчетные значения коэффициентов:

$$A_0 = 1,92225;$$

$$A_1 = 0,60925;$$

$$A_2 = 0,67525;$$

$$A_3 = -0,17475;$$

$$A_{12} = 0,50525;$$

$$A_{13} = -0,05475;$$

$$A_{23} = 0,11325;$$

$$A_{123} = 0,00825.$$

Для оценки их статистической значимости с принятым уровнем значимости $\alpha = 0,05$ рассчитывались дисперсии случайных ошибок по уровням:

$$S_{ou_i} = \sum_1^u (y_{iu} - \bar{y}_i)^2, \quad (3)$$

где $\bar{y}_i$ – средние по уровням эксперимента (Ra_sr), $\bar{y}_i = \frac{1}{u} \sum_u y_{iu}$,

а затем общая дисперсия случайных ошибок

$$S_{ou} = \sum_i S_{ou_i} \quad (4)$$

с числом степеней свободы

$$f_{ou} = (u-1)i. \quad (5)$$

Доверительный интервал коэффициентов оценивался с применением критерия Стьюдента:

$$|A_k| > t_{\alpha; f_{ou}} \cdot S_A, \quad (6)$$

где $t_{\alpha; f_{ou}}$ – критическое значение критерия Стьюдента, найденное для заранее выбранного уровня значимости α и числа степеней свободы f_{ou} ; S_A – дисперсия коэффициентов модели,

$$S_A = \sqrt{\frac{S_{ou}}{f_{ou} \cdot N}}. \quad (7)$$

Рассчитанное значение доверительного интервала оказалось равным 0,1330. Таким образом, статистически незначимыми на уровне $\alpha = 0,05$ оказались соответствующие взаимодействия факторов коэффициенты A_{13} , A_{23} , A_{123} , а модель приняла окончательный вид

$$Ra_k = 1,92225 + 0,60925z_1 + 0,67525z_2 - 0,17475z_3 + 0,50525z_1z_2. \quad (8)$$

Для оценки тесноты связи между факторами модели и переменной откли-

ка предварительно оценивался коэффициент множественной детерминации, а далее – проводилась оценка значимости уравнения множественной регрессии. С этой целью была определена общая дисперсия данных

$$S_o = \sum_i \sum_u (y_{iu} - \bar{y})^2 \quad (9)$$

с числом степеней свободы

$$f_o = iu - 1. \quad (10)$$

Кроме того, была найдена регрессионная дисперсия S_{reg} , характеризующая детерминированную вариацию экспериментальных наблюдений:

$$S_{reg} = u \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \quad (11)$$

где $\hat{y}_i$ – вычисленные по формуле (8) модельные значения для каждого уровня экспериментов.

Генеральное среднее данных $\bar{y}$ определялось по формуле

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{1}{ui} \sum_i \sum_u y_{iu} = \\ &= \frac{1}{i} \sum_i \left[\frac{1}{u} \sum_u y_{iu} \right] = \frac{1}{i} \sum_i \bar{y}_i, \end{aligned} \quad (12)$$

а число степеней свободы f_{reg} регрессионной дисперсии равнялось числу факторов модели ($k = 3$):

$$f_{reg} = k. \quad (13)$$

Коэффициент детерминации для построенной модели (8)

$$r^2 = \frac{S_{reg}}{S_o}. \quad (14)$$

Полученные расчетные значения подтверждают тесную связь переменных модели:

$$S_o = 46,3215;$$

$$f_o = 39;$$

$$S_{рег} = 44,51853;$$

$$f_{рег} = 3;$$

$$r^2 = 0,961.$$

Для оценки статистической значимости уравнения регрессии (8) также проводилась проверка с использованием критерия Фишера на уровне $\alpha = 0,05$.

Остаточная дисперсия $S_{ост}$ и число ее степеней свободы $f_{ост}$ находились по формулам:

$$S_{ост} = S_o - S_{рег}; \quad (15)$$

$$f_{ост} = f_o - f_{рег}. \quad (16)$$

Расчетное значение критерия Фишера $F_{рег}$ сравнивалось с критическим значением квантиля распределения Фишера $F_{\alpha; f_{ост}; f_{рег}}$, зависящего от ранее определенных чисел степеней свободы $f_{рег}$ и $f_{ост}$:

$$F_{рег} = \frac{(S_{рег} / f_{рег})}{(S_{ост} / f_{ост})} > F_{\alpha; f_{ост}; f_{рег}}. \quad (17)$$

$$S_{ост} = 1,802968;$$

$$f_{ост} = 36;$$

$$F_{рег} = 296,30 > 8,60.$$

Так как условие (17) соблюдается, то уравнение множественной регрессии (8) является статистически значимым на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Для оценки адекватности модели экспериментальным данным рассчитывалась дисперсия неадекватности и

число ее степеней свободы:

$$S_{ад} = u \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2; \quad (18)$$

$$f_{ад} = i - 1 - k. \quad (19)$$

Модель считается адекватной в том случае, если вносимая ею систематическая погрешность не превышает случайной погрешности данных. Указанный критерий эквивалентен выполнению условия

$$F_{ад} = \frac{(S_{ад} / f_{ад})}{(S_{ош} / f_{ош})} < F_{\alpha; f_{ош}; f_{ад}}. \quad (20)$$

Расчетное значение критерия Фишера $F_{ад}$ сравнивалось с критическим значением квантиля распределения Фишера $F_{\alpha; f_{ош}; f_{ад}}$:

$$S_{ад} = 0,635648;$$

$$f_{ад} = 4;$$

$$F_{ад} = 4,36 < 5,74.$$

Так как условие (20) соблюдается, то модель (8) является адекватной экспериментальным данным на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Выводы и обсуждение результатов

1. Полученные при экспериментальных исследованиях данные, а также построенная модель свидетельствуют о тесной связи шероховатости поверхности после ИИО с тремя влияющими факторами – исходной шероховатостью заготовки, подачей инструмента, частотой вращения заготовки.

В качестве еще одной составляющей определено взаимодействие факторов исходной шероховатости поверхности и подачи инструмента. Вероятно, такое взаимодействие объясняется регулярными характеристиками профиля,

полученного при предварительной токарной обработке (характеристики профиля определяются подачей токарного резца).

2. Для уровня статистической надежности $\alpha = 0,05$ определена статистически значимая эмпирическая зави-

симость (коэффициент детерминации $r^2 = 0,961$), адекватная экспериментальным данным. Этот результат подтверждает возможность управления показателями ИИО на основе эмпирической модели.

Статья сдана в редакцию 29 октября 2020 года

Виктор Михайлович Пашкевич, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-293-67-10-18. E-mail: pvm@bk.ru.

Виталий Викторович Афаневич, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-297-45-38-58. E-mail: vitas-ik@tut.by.

Viktor Mikhailovich Pashkevich, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-293-67-10-18. E-mail: pvm@bk.ru.

Vitaly Viktorovich Afanovich, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-297-45-38-58. E-mail: vitas-ik@tut.by.

УДК 629.3

В. П. Тарасик, О. В. Пузанова

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
И ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ**

UDC 629.3

V. P. Tarasik, O. V. Puzanova

**PROCEDURE FOR DETERMINING MAIN PARAMETERS AND
CHARACTERISTICS OF AN ELECTRIC VEHICLE**

Аннотация

Предложена методика определения энергетических параметров электромобиля и оценки показателей его тягово-скоростных свойств. Применение методики показано на примере грузового электромобиля, предназначенного для городских перевозок. Приведены графики полученных характеристик. Показана необходимость применения автоматической многоступенчатой коробки передач в составе механической трансмиссии электромобиля.

Ключевые слова:

электромобель, тяговый электродвигатель, механическая трансмиссия, автоматическая коробка передач, характеристики электродвигателя, параметры трансмиссии, показатели тягово-скоростных свойств.

Abstract

A method is proposed to determine the energy parameters of an electric vehicle and to estimate the indicators of its traction and speed properties. The application of the methodology is exemplified by an electric freight vehicle designed for urban transportation. The graphs of the obtained characteristics are presented. The necessity to use an automatic multistage gearbox as part of the mechanical transmission of an electric vehicle is shown.

Keywords:

electric vehicle, traction motor, mechanical transmission, automatic gearbox, electric motor characteristics, transmission parameters, indicators of traction and speed properties.

Одним из эффективных направлений снижения загрязнения окружающей среды является применение в конструкциях автомобилей электропривода. Используются два варианта решения этой проблемы: *электромобили* и автомобили с *комбинированным источником энергии* (КИЭ). Автомобили с КИЭ принято называть *гибридными*. Электромобили более перспективны. Сдерживающим фактором их распространения является ограниченная емкость современных накопителей электроэнергии – аккумуляторных батарей. Поэтому

они наиболее эффективны при использовании в городских условиях. Гибридные автомобили такого ограничения не имеют.

Структурная схема электромобиля показана на рис. 1. Основные конструктивные элементы электромобиля: аккумуляторная батарея АБ (накопитель электроэнергии); тяговый электродвигатель ТЭД; механическая трансмиссия МТ; бортовое зарядное устройство БЗУ; инвертор И; преобразователь постоянного тока ППТ; электронная система управления ЭСУ; система датчиков СД.

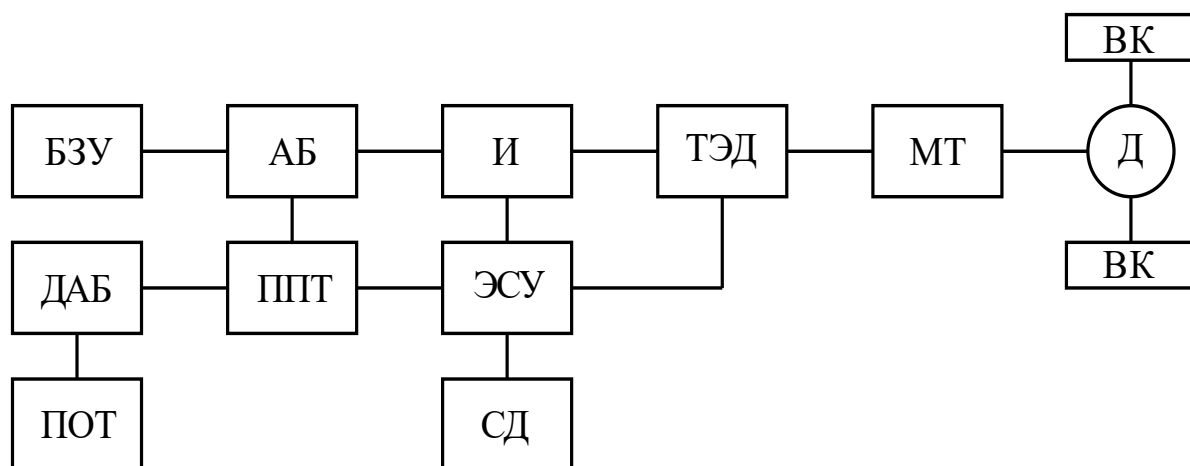


Рис. 1. Структурная схема электромобиля

Используются в основном литий-ионные аккумуляторные батареи с напряжением постоянного тока 300 В. В качестве двигателей применяют трехфазные синхронные и асинхронные электрические машины переменного тока. Инвертор преобразует высокое напряжение аккумуляторной батареи АБ в трехфазное напряжение переменного тока, необходимое для питания ТЭД. Преимущества электродвигателя: непрерывное гиперболическое изменение вращающего момента во всем диапазоне рабочих скоростей; работа в прямом и обратном направлениях без дополнительных устройств; простота конструкции; воздушное охлаждение; возможность работы в режиме генератора; КПД электродвигателя не менее 90 % (против 30 % у ДВС).

Трансмиссия электромобиля МТ представляет собой различные комбинации зубчатых редукторов в блоке с межколесным дифференциалом Д.

Преобразователь постоянного тока ППТ предназначен для зарядки дополнительного аккумулятора ДАБ напряжением 12 В и питания различных потребителей ПОТ (электроусилитель рулевого управления, отопитель салона, кондиционер, система освещения, стеклоочистители, аудиосистема).

Электронная система управления ЭСУ выполняет функции, направленные на обеспечение безопасности, энергосбережения и комфорта пассажиров (управление высоким напряжением, регулирование тяговой характеристики, обеспечение оптимального режима движения, управление плавным ускорением и рекуперативным торможением, контроль использования электроэнергии, оценка заряда батареи). Система располагает комплексом датчиков СД, доставляющих информацию о положениях педали акселератора и педали тормоза, селектора направления движения (вперед, реверс), давления в тормозной системе, степени зарядки аккумулятора. На основании сигналов датчиков блок управления обеспечивает оптимальные для конкретных условий характеристики движения электромобиля. Рекуперация возвращает до 30 % энергии от уровня затрачиваемой на тяговом режиме.

Предусмотрены два режима зарядки аккумуляторной батареи – нормальный и ускоренный. Нормальный осуществляется от бытовой электросети мощностью 3...3,5 кВт. Время полной зарядки 8 ч. Ускоренная зарядка выполняется на специальных зарядных станциях мощностью до 50 кВт. Время зарядки до 80 % емкости батареи – не более 30 мин.

Цель исследования

Разработка методики определения энергетических параметров электромобиля и оценки показателей его тягово-скоростных свойств.

Методика исследования

Мощность электродвигателя $P_{\text{эдв}}$ (Вт), необходимая для движения электромобиля с максимальной заданной скоростью v_{max} в характерных дорожных условиях, определяется по формуле

$$P_{\text{эдв}} = \frac{m_a g \psi_v + k_w A_{\text{л}} v_{\text{max}}^2}{\eta_{\text{эд}} \eta_{\text{тр}}} v_{\text{max}}, \quad (1)$$

где m_a – полная масса автомобиля, кг; k_w – коэффициент сопротивления воздуха, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; $A_{\text{л}}$ – лобовая площадь автомобиля, м^2 ; v_{max} – максимальная скорость, м/с; $\eta_{\text{эд}}$ – КПД электродвигателя на номинальном скоростном режиме; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД механической части трансмиссии; ψ_v – коэффициент суммарного дорожного сопротивления при скорости v_{max} ,

$$\psi_v = f_v + h_v, \quad (2)$$

где f_v – коэффициент сопротивления качению при v_{max} [1]; h_v – значение продольного дорожного уклона для заданных модельных условий работы автомобиля.

Для легковых автомобилей и дорожных грузовых принимают $h_v = 0$ (движение на горизонтальном участке дороги).

По величине $P_{\text{эдв}}$ из каталога выпускаемой продукции выбирается подходящий электродвигатель с номиналь-

ными значениями мощности $P_{\text{эд.ном}}$ и частоты вращения $n_{\text{эд.ном}}$. Фиксируются также значения максимального вращающего момента электродвигателя $M_{\text{эдmax}}$ и соответствующее ему значение частоты вращения $n_{\text{эдmin}}$.

На электромобилях используют высокоскоростные электродвигатели переменного тока (синхронные и асинхронные) с частотой вращения $n_{\text{эд.ном}}$ в пределах 10000...20000 об/мин [2, 3]. Рабочий диапазон частот вращения при изменении момента от $M_{\text{эдmax}}$ до номинальной величины $M_{\text{эд.ном}}$ характеризуется соотношением $n_{\text{эд.ном}}/n_{\text{эдmin}} = 3,5 \dots 4$. Диапазон изменения рабочей скорости автомобилей гораздо шире, особенно легковых автомобилей. Согласно техническим требованиям на тягово-скоростные свойства автомобиль должен обеспечивать заданную максимальную скорость движения v_{max} и максимальный динамический фактор D_{max} . Эти требования противоречивы. Выполнить их одновременно при использовании одноступенчатого редуктора трансмиссии практически невозможно. Это очевидно: для получения v_{max} передаточное число редуктора $u_{\text{тр}}$ необходимо снижать, а для D_{max} , наоборот, повышать [1].

Требуемое значение D_{max} можно получить, применив электродвигатель большей мощности, чем необходимо для обеспечения v_{max} . Но это приведет к увеличению его массы и снижению КПД на высоких скоростях движения электромобиля.

Для эффективного использования энергетических характеристик тягового электродвигателя возникает необходимость применения в составе механической части трансмиссии электромобиля

многоступенчатой автоматической коробки передач.

Передаточное число механической части трансмиссии на высшей ступени коробки передач $u_{\text{тр.в}}$ найдем из условия движения со скоростью v_{max} при $n_{\text{эд.ном}}$:

$$u_{\text{тр.в}} = \frac{\pi n_{\text{эд.ном}} r_{\text{к0}}}{30 v_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где $r_{\text{к0}}$ – радиус качения колес, м.

Передаточное число трансмиссии на низшей ступени коробки передач $u_{\text{тр.н}}$ определяется из условия преодоления максимального сопротивления движению, характеризуемого коэффициентом суммарного дорожного сопротивления $\psi_{\text{max}} = f_0 + h_{\text{max}}$, где f_0 – коэффициент сопротивления качению при малой скорости; h_{max} – максимальный преодолеваемый уклон дороги. Согласно ГОСТ Р 52280–2004 для одиночных автомобилей $\psi_{\text{max}} = 0,25$, для автопоездов $\psi_{\text{max}} = 0,18$.

Передаточное число $u_{\text{тр.н}}$ определим по формуле

$$u_{\text{тр.н}} = \frac{m_a g \psi_{\text{max}} r_{\text{к0}}}{M_{\text{эдmax}} \eta_{\text{эд}} \eta_{\text{тр}}}. \quad (4)$$

Диапазон передаточных чисел коробки передач

$$D_{\text{кп}} = u_{\text{тр.н}} / u_{\text{тр.в}}. \quad (5)$$

При равномерном распределении передаточных чисел коробки передач

$$M_{\text{эд}} = \begin{cases} M_{\text{эдmax}} & \text{при } 0 \leq n_{\text{эд}} \leq n_{\text{эдmin}}; \\ \frac{30 P_{\text{эд.ном}}}{\pi n_{\text{эд}}} & \text{при } n_{\text{эдmin}} < n_{\text{эд}} \leq n_{\text{эдmax}}; \end{cases} \quad (9)$$

количество ступеней $n_{\text{кп}}$ зависит от выбора показателя средней плотности ряда передаточных чисел $q_{\text{ср}}$. Значение $q_{\text{ср}}$ связано с $D_{\text{кп}}$ и $n_{\text{кп}}$ выражением

$$q_{\text{ср}} = n_{\text{кп}}^{-1} \sqrt[n_{\text{кп}}]{D_{\text{кп}}} = n_{\text{кп}}^{-1} \sqrt[n_{\text{кп}}]{u_{\text{тр.н}} / u_{\text{тр.в}}}. \quad (6)$$

Используя это выражение, получаем формулу для определения $n_{\text{кп}}$

$$n_{\text{кп}} = 1 + \frac{\ln D_{\text{кп}}}{\ln q_{\text{ср}}} = 1 + \frac{\ln u_{\text{тр.н}} - \ln u_{\text{тр.в}}}{\ln q_{\text{ср}}}. \quad (7)$$

Значение $n_{\text{кп}}$ округляют до целого в ту или иную сторону и затем вычисляют $q_{\text{ср}}$ по формуле (6). Используя $q_{\text{ср}}$, определяют передаточные числа трансмиссии на всех ступенях коробки передач $u_{\text{тр}i}$, $i = 1, 2, \dots, n_{\text{кп}}$, где $n_{\text{кп}}$ – номер высшей ступени коробки передач.

Передаточные числа трансмиссии связаны между собой соотношением

$$u_{\text{тр}i} = u_{\text{тр}i-1} / q_{\text{ср}}. \quad (8)$$

Например, при трехступенчатой коробке передач в трансмиссии автомобиля ее передаточные числа составят следующий ряд: $u_{\text{тр}1} = u_{\text{тр.н}}$; $u_{\text{тр}2} = u_{\text{тр}1} / q_{\text{ср}}$; $u_{\text{тр}3} = u_{\text{тр.в}}$.

Характеристики вращающего момента $M_{\text{эд}} = f(n_{\text{эд}})$ и мощности $P_{\text{эд}} = f(n_{\text{эд}})$ тягового электродвигателя вычисляются на основе выражений

$$P_{\text{эд}} = M_{\text{эд}} \pi n_{\text{эд}} / 30. \quad (10)$$

Мощность $P_{\text{эд}}$ по формуле (10) получается в ваттах.

Скорости движения электромобиля (км/ч) на высшей $v_{\text{ав}}$ и низшей $v_{\text{ан}}$ передачах определяются по формулам

$$v_{\text{ав}} = \frac{3,6 \pi n_{\text{эд}} r_{\text{к0}}}{30 u_{\text{тр.в}}}; \quad (11)$$

$$v_{\text{ан}} = \frac{3,6 \pi n_{\text{эд}} r_{\text{к0}}}{30 u_{\text{тр.н}}}. \quad (12)$$

Характеристики силы тяги $F_{\text{ТВ}} = f(v_{\text{ав}})$, развиваемой на осях ведущих колес, динамического фактора $D_{\text{в}} = f(v_{\text{ав}})$ и ускорения автомобиля $a_{\text{в}} = f(v_{\text{ав}})$ при движении электромобиля на высшей передаче определяются по формулам

$$F_{\text{ТВ}} = M_{\text{эд}} u_{\text{тр.в}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{эд}} / r_{\text{к0}}; \quad (13)$$

$$D_{\text{в}} = \frac{F_{\text{ТВ}} - k_w A_{\text{л}} v_{\text{ав}}^2}{m_a g}; \quad (14)$$

$$a_{\text{в}} = (D_{\text{в}} - \psi_v) g / \delta_{\text{п.м.в}}, \quad (15)$$

где $\delta_{\text{п.м.в}}$ – коэффициент приведенной массы на высшей ступени коробки передач, учитывающий влияние вращающихся масс механической трансмиссии на величину кинетической энергии автомобиля [1].

При движении на низшей передаче формулы для вычисления этих же характеристик аналогичны:

$$F_{\text{тн}} = M_{\text{эд}} u_{\text{тр.н}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{эд}} / r_{\text{к0}}; \quad (16)$$

$$D_{\text{н}} = \frac{F_{\text{тн}} - k_w A_{\text{л}} v_{\text{ан}}^2}{m_a g}; \quad (17)$$

$$a_{\text{н}} = (D_{\text{н}} - \psi_v) g / \delta_{\text{п.м.н}}. \quad (18)$$

В формулах (14) и (17) скорости $v_{\text{ав}}$ и $v_{\text{ан}}$, м/с.

Для оценки тягово-скоростных свойств электромобиля необходимо построить характеристики его разгона и определить показатели эффективности, предусмотренные ГОСТ 22576–90.

Движение электромобиля при разгоне описывается системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{F_{\text{т}} - m_a g f_v - k_w A_{\text{л}} v^2}{\delta_{\text{п.м}} m_a}; \\ \frac{ds}{dt} &= v; \\ \frac{dW}{dt} &= \frac{M_{\text{эд}} u_{\text{тр}} v}{r_{\text{к0}}}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где W – изменение затраты энергии электродвигателем в процессе разгона электромобиля, Дж.

Характеристика силы тяги ведущих колес электромобиля $F_{\text{т}}$ в процессе разгона изменяется в зависимости от скоростного режима тягового электродвигателя и номера ступени коробки передач трансмиссии. Режим работы электродвигателя характеризуется вращающим моментом $M_{\text{эд}}$ и частотой вращения $n_{\text{эд}}$. Интегрирование системы уравнений (19) позволяет построить характеристики разгона $v = f(t)$, $s = f(t)$ и затраты энергии электродвигателя на разгон $W = f(t)$.

Результаты исследования

Рассмотрим графики изменения $P_{\text{эд}} = f(n_{\text{эд}})$, $M_{\text{эд}} = f(n_{\text{эд}})$ и $F_{\text{т}} = f(v)$ на конкретном примере. Предположим, что исследуемый электромобиль грузовой, предназначенный для работы в городских условиях. Его параметры: пол-

ная масса $m_a = 10000$ кг; максимальная скорость 80 км/ч; радиус качения колес $r_{k0} = 0,39$ м; лобовая площадь $A_L = 5$ м²; коэффициент сопротивления воздуха $k_w = 0,4$ Н·с²/м⁴; коэффициент сопротивления качению при малой скорости $f_0 = 0,012$.

Примем следующие параметры характеристик электродвигателя и трансмиссии электромобиля: номинальная и минимальная частоты вращения электродвигателя $n_{эд.ном} = 10000$ об/мин, $n_{эдmin} = 2500$ об/мин; КПД электродвигателя и механической трансмиссии $\eta_{эд} = 0,94$ и $\eta_{тр} = 0,922$ соответственно.

По формуле (1) определим необходимую мощность электродвигателя $P_{эдv}$ для проектируемого электромобиля: $P_{эдv} = 62,463$ кВт. Округляем полученное значение и принимаем величину номинальной мощности $P_{эд.ном} = 65$ кВт. Максимальный мо-

мент электродвигателя $M_{эдmax}$ будет при $n_{эдmin}$. Его значение вычисляется по формуле

$$M_{эдmax} = \frac{30P_{эд.ном}}{\pi n_{эдmin}}. \quad (20)$$

Так как исследуемый электромобель сравнительно тихоходный, ограничимся двухступенчатой коробкой передач. Передаточные числа трансмиссии определим по формулам (3) и (4): $u_{тр.н} = 44,450$; $u_{тр.в} = 18,378$.

По формулам (9) и (10) вычисляем характеристики $M_{эд} = f(n_{эд})$ и $P_{эд} = f(n_{эд})$. При изменении частоты вращения электродвигателя в пределах $n_{эдmin} \leq n_{эд} \leq n_{эд.ном}$ его вращающий момент изменяется по гиперболе, а мощность остается постоянной, равной $P_{эд.ном}$. Графики этих характеристик представлены на рис. 2, а.

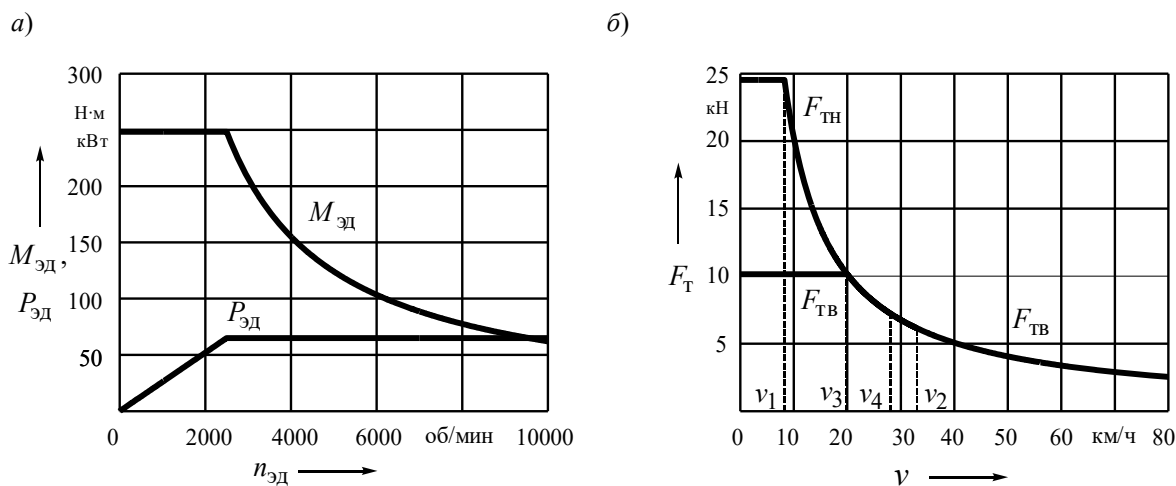


Рис. 2. Графики характеристик электродвигателя (а) и тяговая характеристика электромобиля (б)

Скорости движения на высшей $v_{ав}$ и низшей $v_{ан}$ передачах в зависимости от изменения частоты вращения электродвигателя определяются по формулам (11) и (12), а соответствую-

щие им значения силы тяги $F_{ТВ}$ и $F_{ТН}$ — по формулам (13) и (16). Полученные графики тяговых характеристик электромобиля изображены на рис. 2, б. В процессе разгона электромобиля по-

сле достижения скорости v_2 происходит автоматическое переключение на высшую передачу. При увеличении дорожного сопротивления и снижении по этой причине скорости движения до $v \leq v_4$ (например, при преодолении

подъема) автоматически включается низшая передача.

На рис. 3, а представлен график динамического фактора автомобиля $D = f(v)$, а на рис. 3, б – график ускорения $a = f(v)$.

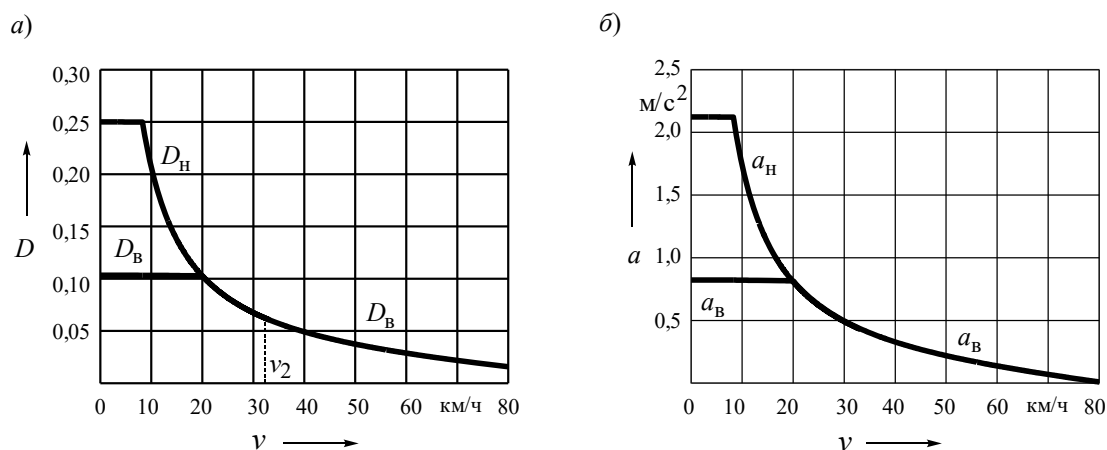


Рис. 3. Динамическая характеристика электромобиля (а) и характеристика ускорения (б)

При моделировании разгона электромобиля необходимо на каждом шаге интегрирования системы дифференциальных уравнений (19) вычислять силу тяги F_T . Но сила тяги, согласно выражениям (13) и (16), зависит от вращающего момента электродвигателя $M_{эд}$, который изменяется в зависимости от частоты вращения $n_{эд}$ в соответствии с

выражением (9). При этом функция $M_{эд} = f(n_{эд})$ неоднозначная, состоящая из двух разнородных составляющих, что требует определения координаты точки перехода между ними. В связи с изложенным алгоритм вычислений переменных $n_{эд}$, $M_{эд}$ и F_T включает следующую систему нелинейных функций:

$$n_{эд} = \begin{cases} 30u_{тр.н}v/(\pi r_{к0}) & \text{при } v \leq v_2; \\ 30u_{тр.в}v/(\pi r_{к0}) & \text{при } v > v_2; \end{cases} \quad (21)$$

$$M_{эд} = \begin{cases} M_{эдmax} & \text{при } v \leq v_1; \\ 30P_{эд.ном}/(\pi n_{эд}) & \text{при } v > v_1; \end{cases} \quad (22)$$

$$F_T = \begin{cases} M_{эд}u_{тр.н}n_{тр}n_{эд}/r_{к0} & \text{при } v \leq v_2; \\ M_{эд}u_{тр.в}n_{тр}n_{эд}/r_{к0} & \text{при } v > v_2. \end{cases} \quad (23)$$

Пороговые значения скорости v_1 и v_2 отмечены на рис. 2, б: v_1 соответствует частоте вращения электродвигателя $n_{\text{эдmin}}$ в точке перехода от $M_{\text{эдmax}}$ на гиперболическую ветвь момента на низшей передаче; v_2 – скорость электромобиля, при которой происходит переключение на высшую ступень коробки передач.

Графики характеристик разгона моделируемого электромобиля представлены на рис. 4, а и б. На них отмечены показатели его тягово-скоростных

свойств: t_{400} – время разгона на участке пути 400 м; t_{1000} – время разгона на участке 1000 м; t_v – время разгона до скорости 50 км/ч; $v_{\text{кmax}}$ – конечная скорость на мерном участке 2000 м; v_{ymax} – условная максимальная скорость, $v_{\text{ymax}} = 400/t_y$ [1].

Значения показателей тягово-скоростных свойств электромобиля приведены в табл. 1.

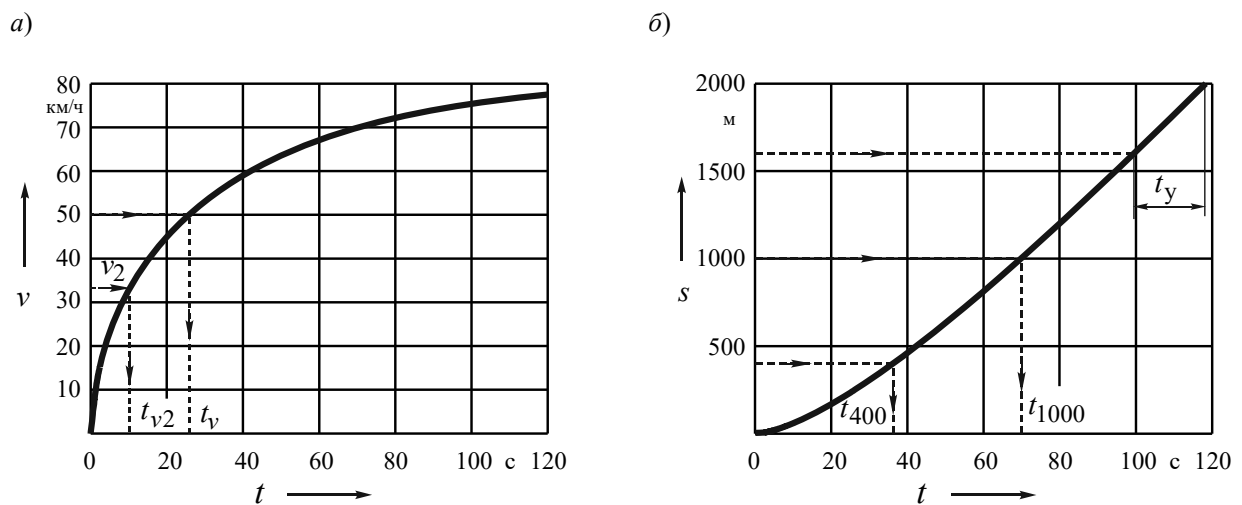


Рис. 4. Графики разгона электромобиля: а – скорость v ; б – перемещение s

Табл. 1. Показатели тягово-скоростных свойств электромобиля

$t_{400}, \text{с}$	$t_{1000}, \text{с}$	$t_v, \text{с}$	$v_{\text{кmax}}, \text{км/ч}$	$v_{\text{ymax}}, \text{км/ч}$
36,2	70,0	25,87	77,4	75,54

Для грузового автомобиля, используемого в городских условиях, значения полученных показателей вполне приемлемы.

Приведенные на рис. 2–4 графики характеристик получены при постоянном значении КПД электродвигателя $\eta_{\text{эд}} = 0,94$. Однако на самом деле КПД электродвигателя существенно зависит от нагрузки и частоты вращения элек-

тродвигателя. Представление об этих зависимостях можно составить на основе электромеханической характеристики электродвигателя автомобиля Nissan Leaf [3]. Используя данную характеристику, определим зависимость КПД электродвигателя при двух уровнях нагрузки: 100 и 50 %. Для этих условий получены уравнения регрессии пятого порядка

$$\eta_{эд} = b_0 + b_1 n_{эд}^* + b_2 (n_{эд}^*)^2 + b_3 (n_{эд}^*)^3 + b_4 (n_{эд}^*)^4 + b_5 (n_{эд}^*)^5, \quad (24)$$

где $\eta_{эд}$ – КПД электродвигателя;

$n_{эд}^*$ – относительная частота вращения

электродвигателя, $n_{эд}^* = n_{эд} / n_{эд.ном}$;

$b_0, b_1, \dots, b_5$ – коэффициенты регрессии.

При полной нагрузке $b_0 = 0,78397$; $b_1 = 0,42583$; $b_2 = 0,4430$;

$b_3 = -2,3895$; $b_4 = 2,7798$; $b_5 = -1,1038$.

При нагрузке 50 % $b_0 = 0,73565$;

$b_1 = 1,3006$; $b_2 = -2,9282$; $b_3 = 2,7782$;

$$b_4 = -0,86239; b_5 = -0,1023.$$

На рис. 5 графики КПД при нагрузке 100 % обозначены $\eta_{эд}^{100}$, а при нагрузке 50 % – $\eta_{эд}^{50}$. Сплошные линии – исходные данные, штриховые – по уравнениям регрессии (24).

Из рис. 5 следует, что снижение нагрузки электродвигателя приводит к повышению его КПД при низких значениях частоты вращения $n_{эд}$, соответствующих максимальному моменту $M_{эд\max}$, что обусловлено уменьшением тепловых потерь, но при этом снижается КПД в области высоких значений $n_{эд}$, характерных для эксплуатационных режимов движения.

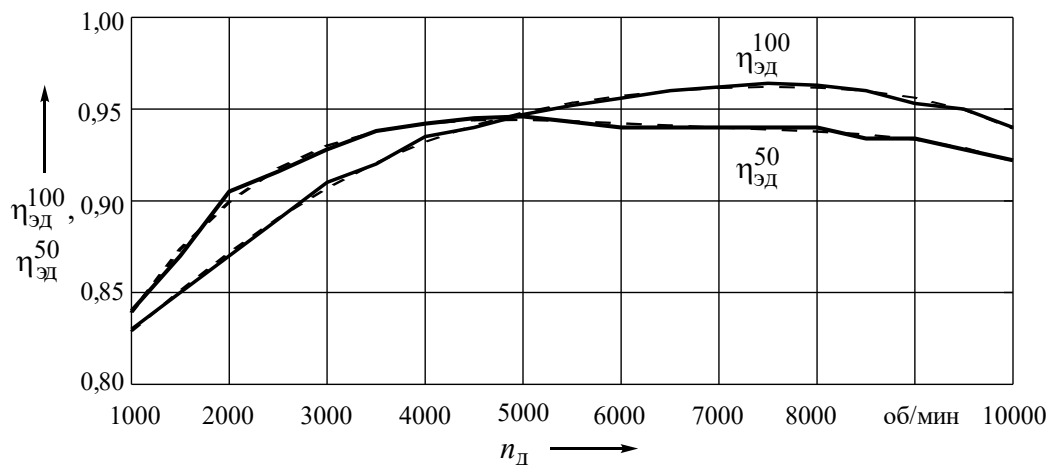


Рис. 5. Графики зависимостей КПД электродвигателя от уровня нагрузки

Приведенные графики подтверждают целесообразность и эффективность применения многоступенчатой коробки передач в составе механической трансмиссии электромобиля.

Важным положительным свойством электромобиля является рекуперативный режим торможения, позволяющий использовать накопленную кинетическую энергию разгона. Для оценки эффективности этого режима рассмот-

рим пример. Примем интервал движения между остановками $s_k = 1,5$ км. Автомобиль вначале интенсивно разгоняется до скорости $v = 60$ км/ч, затем движется с постоянной скоростью и заканчивает движение на режиме электродинамического торможения. На режиме разгона используем уравнения (19). Графики, отображающие затрату энергии за время разгона W_p , представлены на рис. 6.

При равномерном движении затрата энергии вычисляется по формуле

$$W_{p.d} = \frac{(m_a g f_v + k_w A_d v^2) s_{p.d}}{\eta_{эд} \eta_{тр}}, \quad (25)$$

где $s_{p.d}$ – длина пути равномерного движения, м.

Энергия рекуперации, поступающая в накопитель электромобиля,

$$\begin{aligned} W_{рек} &= (E_{к.н} - E_{к.к}) \eta_{эд} \eta_{тр} = \\ &= 0,5 m_a \delta_{п.м} (v_n^2 - v_k^2) \eta_{эд} \eta_{тр}, \quad (26) \end{aligned}$$

где $E_{к.н}$, $E_{к.к}$ – начальное и конечное значения кинетической энергии электромобиля; v_n , v_k – начальная и конечная скорости на режиме рекуперации, м/с.

Энергия по формулам (25) и (26) вычисляется в джоулях.

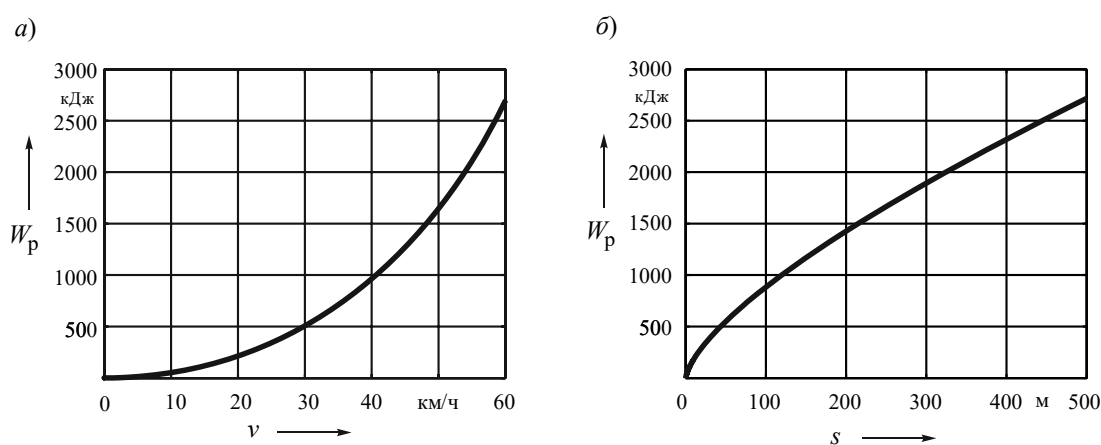


Рис. 6. Затрата энергии на режиме разгона: а – в зависимости от скорости; б – от перемещения

В рассмотренном примере затраты энергии на разгон и перемещение на участке маршрута составили $W_p + W_{p.d} = 2710 + 2175 = 4885$ кДж, а энергия рекуперации $W_{рек} = 1276$ кДж. В результате эффективность рекуперации оказалась равной 26,1 %.

Заключение

1. Разработана методика определения энергетических параметров электромобиля и оценки показателей его тягово-скоростных свойств. Предложены формулы определения необходимой

мощности электродвигателя, получения тяговой характеристики и характеристик разгона электромобиля.

2. Показано, что для выполнения технических требований на тягово-скоростные свойства электромобиля в механической части его трансмиссии необходимо использовать многоступенчатую коробку передач с автоматической системой управления.

3. На примере грузового электромобиля показана высокая эффективность его использования в городских условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасик, В. П.** Теория движения автомобиля: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
2. Применение коробок передач в силовых приводах электротранспорта / С. Н. Поддубко [и др.]. – Механика машин и материалов. – 2020. – № 3 (52). – С. 5–10.
3. **Laitinen, H.** Improving electric vehicle energy efficiency with two-speed gearbox: abstract of thesis ... for the degree of master of science in technology / H. Laitinen. – Espoo, 2017. – 59 p.

Статья сдана в редакцию 8 сентября 2020 года

Владимир Петрович Тарасик, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

Ольга Владимировна Пузанова, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-29-634-57-04.

Vladimir Petrovich Tarasik, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

Olga Vladimirovna Puzanova, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-29-634-57-04.

УДК 621.833

С. Н. Хатетовский, Л. Г. Доконов, Д. С. Галюжин

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗВЕНЬЕВ ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ

UDC 621.833

S. N. Khatetovsky, L. G. Dokonov, D. S. Galyuzhin

ON THE ISSUE OF EVALUATING ELASTIC DEFORMATIONS OF PRECESSIONAL TRANSMISSION LINKS

Аннотация

Приведены формулы для определения длины контактной линии и проекций главного вектора и главного момента внешних сил. Рассмотрен вопрос определения прогиба входного вала планетарной прецессионной передачи типа KHV под воздействием сил зацепления методом Мора.

Ключевые слова:

прецессионная передача, передача эксцентрикового типа, точки контакта, линия контакта, силовой расчет.

Abstract

Formulas for determining length of the contact line and projections of the main vector and the main moment of external forces are given. The paper considers the issue of determining the deflection of the input shaft of planetary precessional K-H-V transmission under the action of meshing forces by using the Mohr method.

Keywords:

precessional transmission, eccentric transmission, contact points, contact line, force calculation.

Прецессионная передача относится к классу эксцентриковых передач [1]. Она характеризуется малыми радиальными габаритами и обеспечивает относительно большие передаточные отношения. Поэтому при ее синтезе конструктору приходится решать ряд проблем.

Первая проблема — обеспечение высокой жесткости звеньев: при малых габаритах неизбежны их значительные упругие деформации, которые приводят к нарушению правильности зубчатого зацепления.

Вторая проблема — обеспечение кинематической точности: даже при относительно небольших значениях погрешностей сборки и упругих деформациях звеньев, которые нарушают правильность зацепления, большое переда-

точное отношение масштабирует кинематическую погрешность.

Расчет сил, действующих в зацеплении колес прецессионной передачи, и, соответственно, упругих деформаций звеньев до настоящего времени осуществлялся по приближенной методике [2]. Это приводило к необходимости закладывать в расчеты большие коэффициенты запаса и, как следствие, к частичной потере преимуществ по малогабаритности.

В работе рассматривается теоретически точная методика расчета сил, действующих в зацеплении колес прецессионной передачи, и предлагается методика оценки упругих деформаций входного вала.

Указанные методики основаны на

уравнении контакта зубьев колес прецессионной передачи [3]:

$$r_{1z_1} = -\frac{R_C \cdot (\cos \theta - u_{12}) \cdot \sin \varphi}{\sin \theta \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)} = 0, \quad (1)$$

где r_{1z_1} – аппликата точки контакта на цилиндрической поверхности ролика (зуба центрального колеса), которая определяется в системе координат $x_1y_1z_1$, жестко связанной с центральным колесом; R_C – радиус центров роликов; θ – угол нутации; u_{12} – передаточное отношение при остановленном входном вале; φ – полярный угол точки контакта на поверхности ролика; φ_1 – угол поворота центрального колеса.

Две другие координаты точки контакта в системе $x_1y_1z_1$ [3]:

$$r_{1x_1} = \rho \cdot \sin \varphi; \quad (2)$$

$$r_{1y_1} = R_C - \rho \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

где ρ – радиус ролика.

Линию контакта можно развернуть на плоскость и представить в виде функции $z = f(x)$ [3]. При этом длина линии контакта может быть найдена следующим образом:

$$s = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} dx. \quad (4)$$

В этой формуле производная

$$k = \frac{dz}{dx} = \frac{r_C \cdot (\cos \theta - u_{12}) \cdot \cos \frac{x}{\rho}}{\rho \cdot \sin\left(\varphi_1 + \frac{x}{\rho}\right) \cdot \sin \theta} - \frac{r_C \cdot (\cos \theta - u_{12}) \cdot \sin \frac{x}{\rho} \cdot \cos\left(\varphi_1 + \frac{x}{\rho}\right)}{\rho \cdot \sin^2\left(\varphi_1 + \frac{x}{\rho}\right) \cdot \sin \theta}, \quad (5)$$

а пределы интегрирования

$$x_{\min} = \rho \cdot \varphi_{\min}; \quad (6)$$

$$x_{\max} = \rho \cdot \varphi_{\max}. \quad (7)$$

Методика определения $\varphi_{\min}$ и $\varphi_{\max}$ с учетом многопарности зацепления рассмотрена в [3].

Согласно методике, изложенной в [4], интенсивность распределенной по длине линии контакта нагрузки может быть найдена по следующей формуле:

$$q = \frac{M_1}{\sum s_i} \cdot \frac{1}{r_{1x_1} \cdot n_{1y_1} - r_{1y_1} \cdot n_{1x_1}}, \quad (8)$$

где M_1 – крутящий момент, приложенный к центральному колесу прецессионной передачи; s_i – длина линии контакта i -й контактирующей пары зубьев при многопарном зацеплении; n_{1x_1} – абсцисса единичной нормали к поверхности ролика, восстановленная в точке контакта; n_{1y_1} – ордината единичной нормали к поверхности ролика, восстановленная в точке контакта.

В системе $x_1y_1z_1$ координаты указанной нормали $\vec{n}_1$ определяются следующим образом:

$$n_{1x_1} = \sin \varphi; \quad (9)$$

$$n_{1y_1} = \cos \varphi; \quad (10)$$

$$n_{1z_1} = 0. \quad (11)$$

Рассмотрим входной вал прецессионной передачи типа KHV (рис. 1) в неподвижной системе координат xuz , начало отсчета которой совмещено с центром прецессии O .

Со стороны сателлита на него действуют главный вектор и главный момент активных сил (рис. 2).

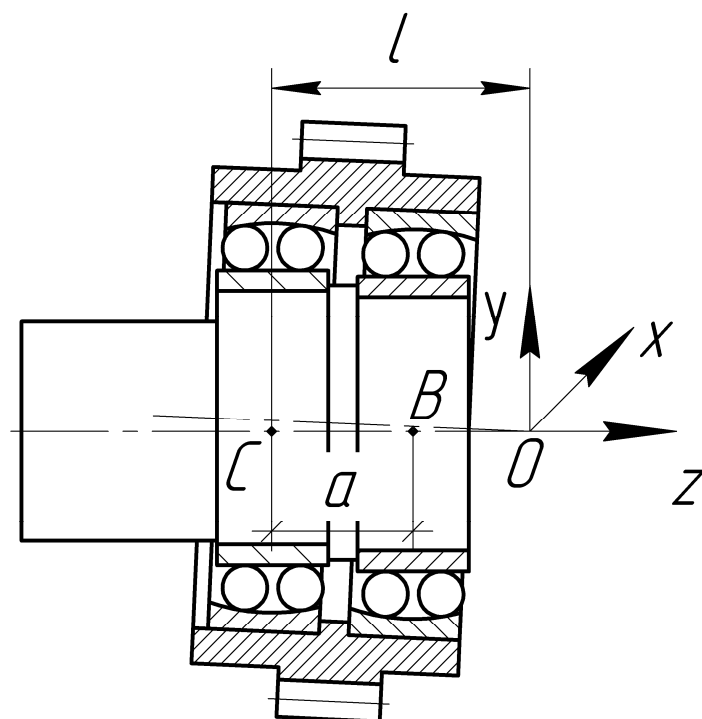


Рис. 1. Схема входного вала прецессионной передачи

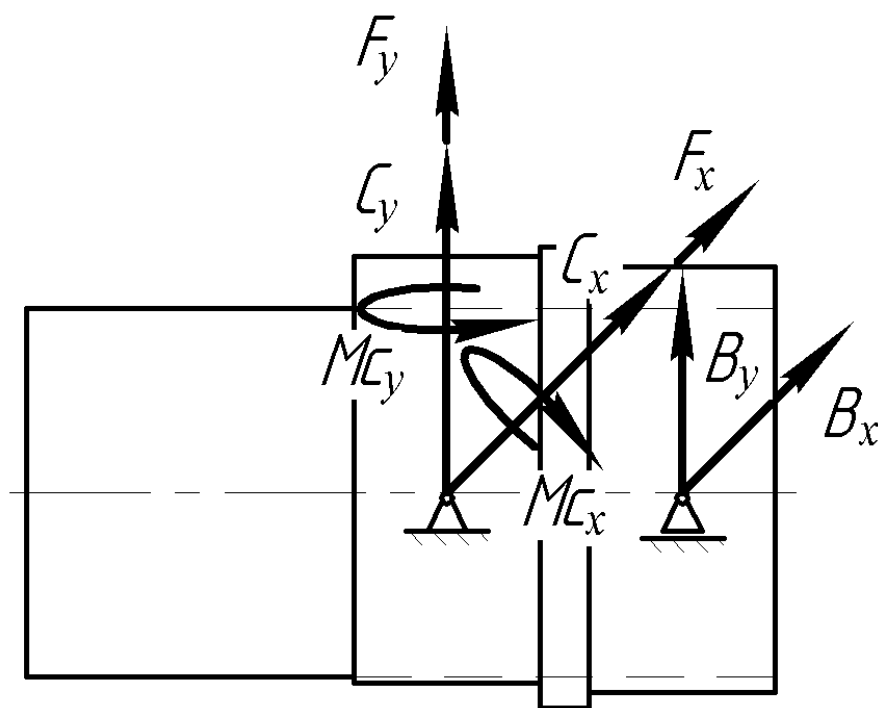


Рис. 2. Схема входного вала с наложенными связями относительно сателлита

Для упрощения расчетов принимаем для входного вала один диаметр, равный наименьшему диаметру его ше-

ек. Таким образом, получаем расчетную схему, показанную на рис. 3.

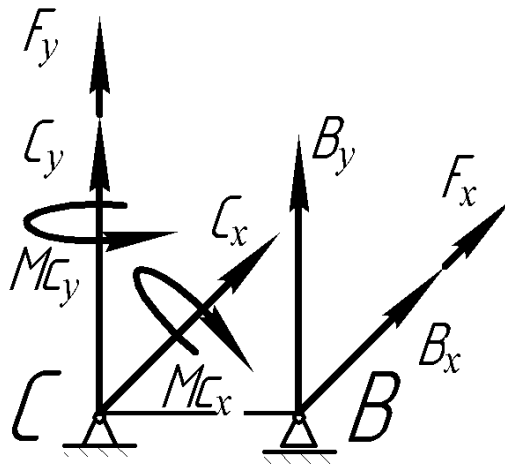


Рис. 3. Расчетная схема входного вала с наложенными связями относительно сателлита

Проекции главного вектора и главного момента активных сил в си-

стеме координат x_{yz} найдем следующим образом:

$$F_x = \frac{\rho \cdot M_1}{\sum s_i} \cdot \sum \int_{\varphi_{\min i}}^{\varphi_{\max i}} \frac{n_{1x} \cdot \sqrt{1+k^2}}{r_{1x} \cdot n_{1y} - r_{1y} \cdot n_{1x}} d\varphi; \quad (12)$$

$$F_y = \frac{\rho \cdot M_1}{\sum s_i} \cdot \sum \int_{\varphi_{\min i}}^{\varphi_{\max i}} \frac{n_{1y} \cdot \sqrt{1+k^2}}{r_{1x} \cdot n_{1y} - r_{1y} \cdot n_{1x}} d\varphi; \quad (13)$$

$$F_z = \frac{\rho \cdot M_1}{\sum s_i} \cdot \sum \int_{\varphi_{\min i}}^{\varphi_{\max i}} \frac{n_{1z} \cdot \sqrt{1+k^2}}{r_{1x} \cdot n_{1y} - r_{1y} \cdot n_{1x}} d\varphi; \quad (14)$$

$$M_{Cx} = \frac{\rho \cdot M_1}{\sum s_i} \cdot \sum \int_{\varphi_{\min i}}^{\varphi_{\max i}} \frac{(n_{1z} \cdot r_{1y} - n_{1y} \cdot (r_{1z} - l)) \cdot \sqrt{1+k^2}}{r_{1x} \cdot n_{1y} - r_{1y} \cdot n_{1x}} d\varphi; \quad (15)$$

$$M_{Cy} = \frac{\rho \cdot M_1}{\sum s_i} \cdot \sum \int_{\varphi_{\min i}}^{\varphi_{\max i}} \frac{(n_{1x} \cdot (r_{1z} - l) - n_{1z} \cdot r_{1x}) \cdot \sqrt{1+k^2}}{r_{1x} \cdot n_{1y} - r_{1y} \cdot n_{1x}} d\varphi; \quad (16)$$

$$M_{Cz} = \frac{\rho \cdot M_1}{\sum s_i} \cdot \sum \int_{\varphi_{\min i}}^{\varphi_{\max i}} \frac{(n_{1y} \cdot r_{1x} - n_{1x} \cdot r_{1y}) \cdot \sqrt{1+k^2}}{r_{1x} \cdot n_{1y} - r_{1y} \cdot n_{1x}} d\varphi, \quad (17)$$

где r_{1x} , r_{1y} , r_{1z} – координаты точки контакта в системе $x_1y_1z_1$; n_{1x} , n_{1y} , n_{1z} – координаты единичной нормали в системе $x_1y_1z_1$.

Чтобы выразить n_{1x} , n_{1y} , n_{1z} , r_{1x} , r_{1y} , r_{1z} через параметры φ и r_{1z_1} , следует осуществить переход от системы координат $x_1y_1z_1$ к системе x_1y_1z (рис. 4). Этот переход осуществляется при помощи матричного преобразования, если координаты точки контакта и координаты нормали представить в виде вектор-столбцов:

$$R_1 = R_{11} = \begin{bmatrix} r_{1x_1} \\ r_{1y_1} \\ r_{1z_1} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (18)$$

$$N_1 = N_{11} = \begin{bmatrix} n_{1x_1} \\ n_{1y_1} \\ n_{1z_1} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

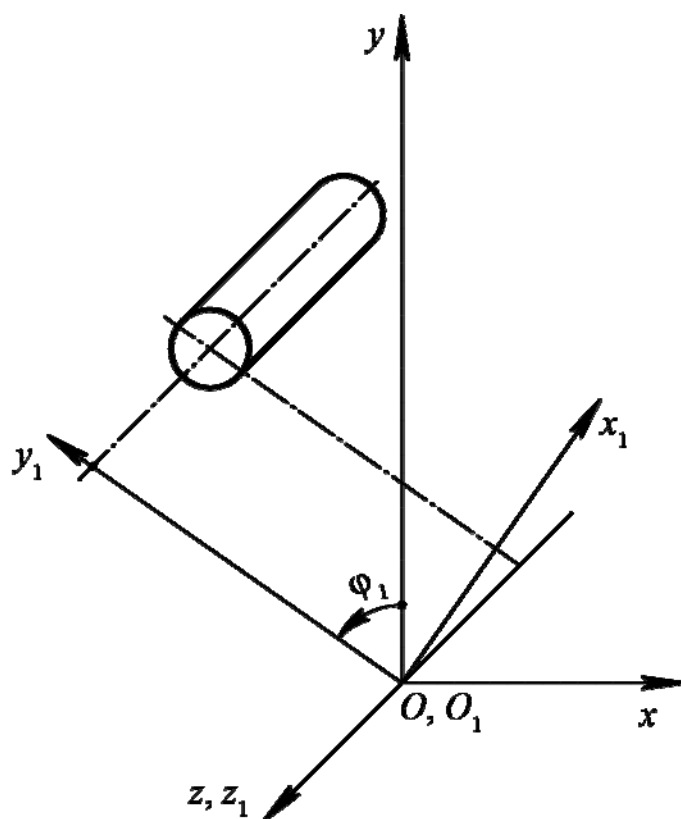


Рис. 4. Схема перехода от системы координат $x_1y_1z_1$ к системе x_1y_1z

Матрица преобразования имеет вид:

$$T_{01} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Таким образом, в системе координат x_1y_1z вектор-столбец, составленный из координат точки контакта, определится следующим образом:

$$\begin{aligned}
R_{01} = T_{01} \times R_{11} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_{1x_1} \\ r_{1y_1} \\ r_{1z_1} \\ 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \rho \cdot \sin \varphi \\ R_C - \rho \cdot \cos \varphi \\ r_{1z_1} \\ 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \rho \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi_1 - (R_C - \rho \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi_1 \\ \rho \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1 + (R_C - \rho \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \varphi_1 \\ r_{1z_1} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (21)
\end{aligned}$$

Аналогично для координат нормали:

$$\begin{aligned}
N_{01} = T_{01} \times N_{11} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_{1x_1} \\ n_{1y_1} \\ n_{1z_1} \\ 0 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi \cdot \cos \varphi_1 + \cos \varphi \cdot \sin \varphi_1 \\ \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1 - \cos \varphi \cdot \cos \varphi_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (22)
\end{aligned}$$

Таким образом,

$$n_{1y} = \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1 - \cos \varphi \cdot \cos \varphi_1; \quad (26)$$

$$r_{1x} = \rho \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi_1 - \quad n_{1z} = 0. \quad (27)$$

$$- (R_C - \rho \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi_1; \quad (23)$$

$$r_{1y} = \rho \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1 -$$

$$- (R_C - \rho \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \varphi_1; \quad (24)$$

$$n_{1x} = \sin \varphi \cdot \cos \varphi_1 + \cos \varphi \cdot \sin \varphi_1; \quad (25)$$

Из приведенных выражений видно, что проекция главного вектора на ось z будет равна нулю, т. к. $n_{1z} = 0$.

Из расчетной схемы (см. рис. 3) определим реакции опор, составив четыре уравнения равновесия:

$$\sum F_{xi} = 0; B_x + C_x + F_x = 0; \quad (28)$$

$$\sum F_{yi} = 0; B_y + C_y + F_y = 0; \quad (29)$$

$$\sum M_{Cyi} = 0; B_x \cdot a + M_{Cy} = 0; \quad (30)$$

$$\sum M_{Cxi} = 0; -B_y \cdot a + M_{Cx} = 0. \quad (31)$$

Решая данную систему уравнений, определим реакции опор:

$$B_y = \frac{M_{Cx}}{a};$$

$$C_y = -F_y - B_y = -F_y - \frac{M_{Cx}}{a};$$

$$B_x = -\frac{M_{Cy}}{a};$$

$$C_x = F_x - B_x = F_x + \frac{M_{Cy}}{a}.$$

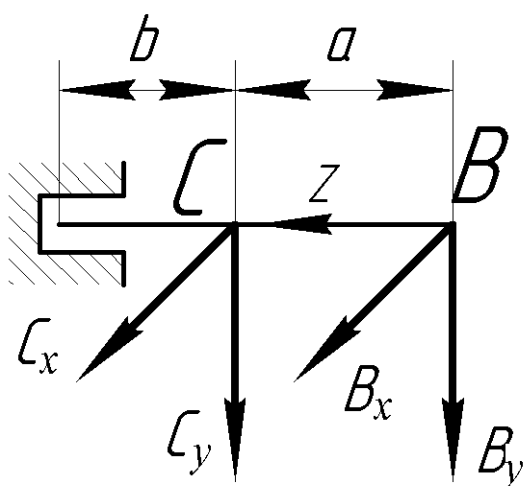


Рис. 5. Расчетная схема входного вала

Так как входной вал находится под действием сил, расположенных в двух плоскостях, то расчет прогиба также необходимо производить в двух плоскостях, находя перемещения по координатам x и y . Затем общий прогиб найдем по формуле [5]

$$\Delta = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (32)$$

где x и y – перемещение точки вала по осям x и y соответственно.

Составим расчетную схему вала (рис. 5).

Вначале рассмотрим перемещение точки C вала под действием проекций сил, расположенных в плоскости yCz . Для этого составим расчетную схему действующих в этой плоскости сил, а также покажем расчетную схему вала с приложенной в точке C единичной силой для нахождения перемещения с помощью интеграла Мора (рис. 6).

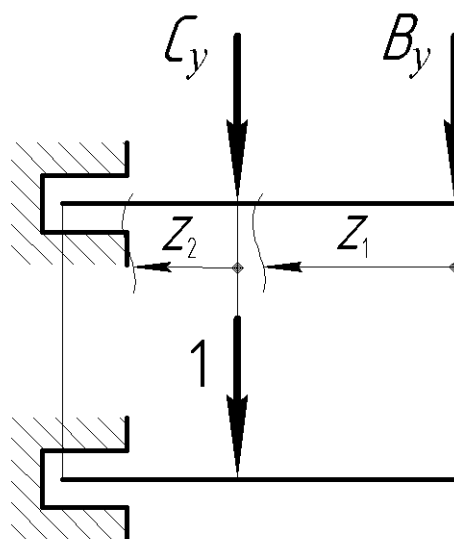


Рис. 6. Расчетная схема нагружения входного вала в плоскости yCz для определения перемещения точки C

Для представленной на рис. 6 расчетной схемы уравнение для опре-

деления перемещения точки C будет иметь вид:

$$y_C = \frac{1}{E \cdot I_x} \int_0^b \left((-C_y \cdot (a + z_2) - B_y \cdot z_2) \cdot (1 \cdot z_2) \right) dz. \quad (33)$$

Для определения перемещения точки B рассмотрим схему нагружения,

представленную на рис. 7, и составим соответствующее уравнение:

$$y_B = \frac{1}{E \cdot I_x} \left(\int_0^a \left((-C_x \cdot z_1) \cdot (-1 \cdot z_1) \right) dz + \right. \\ \left. + \int_0^b \left(-C_y \cdot ((a + z_2) + z_2) - B_y \cdot z_2 \right) \cdot (-1 \cdot (a + z_2)) dz \right). \quad (34)$$

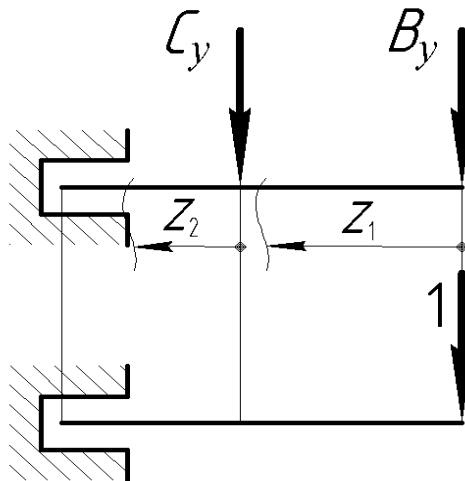


Рис. 7. Расчетная схема нагружения входного вала в плоскости yCz для определения перемещения точки B

Аналогично рассчитывается и прогиб вала в точках C и B для сил, распо-

ложенных в плоскости xCz :

$$x_C = \frac{1}{E \cdot I_y} \int_0^b \left((-C_x \cdot (a + z_2) - B_x \cdot z_2) \cdot (1 \cdot z_2) \right) dz; \quad (35)$$

$$x_B = \frac{1}{E \cdot I_y} \left(\int_0^a \left((-C_x \cdot z_1) \cdot (-1 \cdot z_1) \right) dz + \right. \\ \left. + \int_0^b \left(-C_x \cdot ((a + z_2) + z_2) - B_x \cdot z_2 \right) \cdot (-1 \cdot (a + z_2)) dz \right). \quad (36)$$

Общий прогиб вала в точках C и B

$$\Delta_C = \sqrt{x_C^2 + y_C^2};$$

$$\Delta_B = \sqrt{x_B^2 + y_B^2}.$$

Полученные выражения прогиба в точках C и B позволят на стадии проектирования учесть их влияние на кинематические показатели передачи и произвести корректировку геометрических параметров входного вала с целью увеличения жесткости. Приведенные в работе расчеты позволят в дальнейшем создать методику расчета прецессионной передачи типа КНВ при задании выходных параметров редуцирующего устройства.

матические показатели передачи и произвести корректировку геометрических параметров входного вала с целью увеличения жесткости. Приведенные в работе расчеты позволят в дальнейшем создать методику расчета прецессионной передачи типа КНВ при задании выходных параметров редуцирующего устройства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скойбеда, А. Т. Коническо-цилиндрические прецессионные редукторы (КЦПР) / А. Т. Скойбеда, П. Н. Громыко. – Минск: БГПА, 2001. – 189 с.
2. Корректировка результатов силового анализа прецессионного редуцирующего механизма с коническими роликами на основе использования методов компьютерного моделирования / П. Н. Громыко [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 73–83.
3. Определение линий контакта зубчатых колес прецессионной передачи при многопарном зацеплении / С. Н. Хатетовский [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3. – С. 104–111.
4. Заблонский, К. И. Жесткость зубчатых передач / К. И. Заблонский. – Киев: Техніка, 1967. – 259 с.
5. Федосьев, В. И. Сопротивление материалов: учебник / В. И. Федосьев. – 10-е изд., перераб. и доп. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 592 с.

Статья сдана в редакцию 9 ноября 2020 года

Станислав Николаевич Хатетовский, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: mechlab@yandex.ru.

Леонид Геннадьевич Доконов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: leon25@tut.by.

Даниил Сергеевич Галужин, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Stanislav Nikolayevich Khatetovsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: mechlab@yandex.ru.

Leonid Gennadyevich Dokonov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: leon25@tut.by.

Daniil Sergeyevich Galyuzhin, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

УДК 621.787

Д. Г. Шатуров, С. А. Сухоцкий

МЕТОДИКА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛ РЕЗАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИЗМАТИЧЕСКОГО РЕЗЦА

UDC 621.787

D. G. Shaturov, S. A. Sukhotsky

TECHNIQUE FOR DETERMINING CUTTING FORCES AND FRICTION COEFFICIENTS ON WORKING SURFACES OF A PRISMATIC CUTTER

Аннотация

Приведена методика по определению сил резания и коэффициентов трения на передней и задней рабочих поверхностях призматического резца с пластинами из твердого сплава при точении. Определены зависимости сил резания и коэффициентов трения от режимов обработки и профиля передней поверхности режущей пластины инструмента.

Ключевые слова:

сила резания, коэффициент трения, точение, скорость резания, подача, глубина резания.

Abstract

The article provides a technique for determining cutting forces and friction coefficients on the front and rear working surfaces of a prismatic carbide-tipped cutter in turning. The dependence of the cutting forces and friction coefficients on the machining conditions and the profile of the front surface of a cutting tool insert has been determined.

Keywords:

cutting force, coefficient of friction, turning, cutting speed, feed, depth of cut.

Введение

Обработка деталей сопровождается большими контактными усилиями на передней и задней поверхностях режущих пластин инструмента. Для уменьшения сил резания и среднего коэффициента трения при обработке заготовок предлагается использовать пластины из твердого сплава с предварительно нанесенным на их переднюю поверхность рельефом в виде канавки, расположенной параллельно главному режущему лезвию и отстоящей от него на величину, соизмеримую с толщиной срезаемого слоя. В поперечном сечении канавка имеет радиусный профиль.

Были определены оптимальные

режимы резания при токарной обработке. Использовались пластины из твердого сплава с рельефом на передней поверхности и без него.

Определение сил при токарной обработке на задней и передней поверхностях резца

Составляющие силы резания на передней и задней поверхностях призматического резца с твердосплавными пластинами определяли экспериментальным путем согласно авторскому свидетельству [1].

Способ включает измерение составляющих сил резания при уменьшении толщины срезаемого слоя и

определение этих составляющих при нулевой толщине среза. С целью повышения точности и сокращения времени определения сил при обработке отключают подачу и измеряют составляющие силы резания в течение времени одного оборота детали с момента отключения подачи, при этом силы на задней поверхности резца определяют в точке перегиба построенного графика зависимости составляющих силы резания от времени оборота детали.

На рис. 1 изображена схема обработки, на рис. 2 – параметры процесса резания призматическим резцом после отключения подачи: развертка на плоскости траектории вершины резца и изменение текущей подачи за один оборот детали после ее отключения (*а*); толщины сечения среза и силы резания (*б*); силы, действующие на задней поверхности резца (*в*).

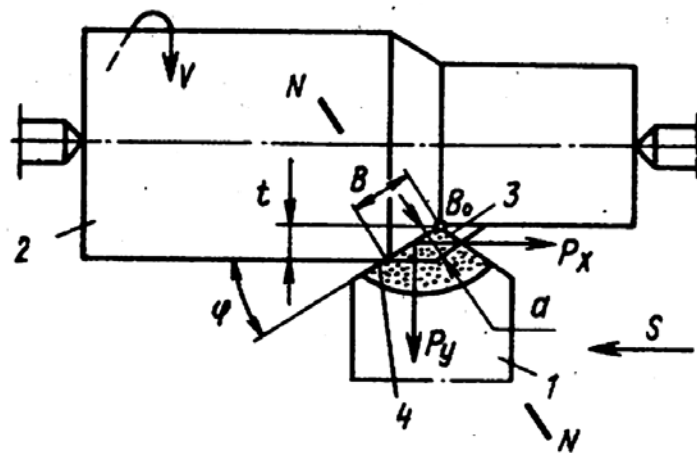


Рис. 1. Схема обработки: 1 – резец; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – сечение среза; 4 – главное режущее лезвие резца

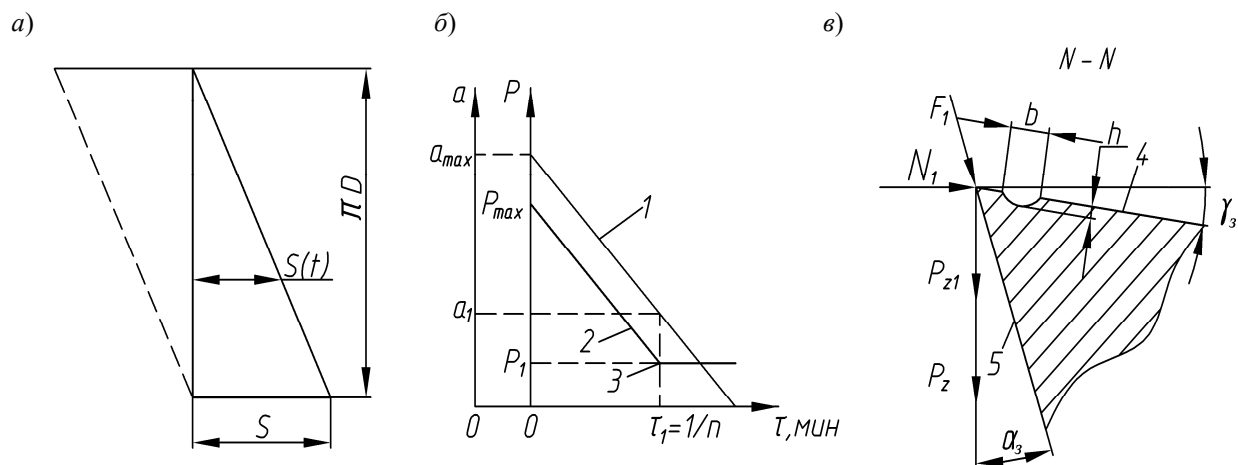


Рис. 2. Параметры процесса резания призматическим резцом после отключения подачи: 1 – $a = f(t)$; 2 – $P(P_x, P_y, P_z) = f(t)$; 3 – точка перегиба силы P ; 4, 5 – передняя и задняя поверхности резца соответственно; $P_1(P_{x1}, P_{y1}, P_{z1})$ – сила на задней поверхности резца; P_{max} – общая сила резания; a_1 – величина упругой деформации обрабатываемого материала

Способ определения сил на задней и передней поверхностях резца осуществляют следующим образом.

Резцом 1 обрабатывают деталь 2, снимая припуск глубиной t . Деталь 2 имеет скорость вращения V , а резец пе-

ремещается с подачей, равной S . Параметры сечения 3 среза для резца (см. рис. 1)

$$a = S \sin \varphi; \quad (1)$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \quad (2)$$

где a – толщина среза, мм; S – подача, мм/об; b – ширина среза, мм; t – глубина резания, мм; φ – главный угол в плане резца.

Силы, действующие на задней поверхности резца, определяли в момент отсутствия стружкообразования на передней поверхности 4 резца (см. рис. 2). Отсутствие стружкообразования имеет место при толщине среза, равной вели-

чине a_1 упругой деформации материала, вызванной его обработкой резцом. Для установления момента отсутствия стружкообразования на передней поверхности резца фиксировали трехкомпонентным динамометром М30-3-6к изменение составляющих силы резания после выключения подачи S станка в течение одного оборота детали. На рис. 3 представлена схема измерения составляющих сил резания, а на рис. 4 – установка для проведения эксперимента.

С помощью программного обеспечения ПРОФИ-6К (рис. 5) определяли составляющие силы резания на передней и задней поверхностях режущей пластины во время обработки и через время t_1 одного оборота детали после выключения рабочей подачи (см. рис. 2, б).

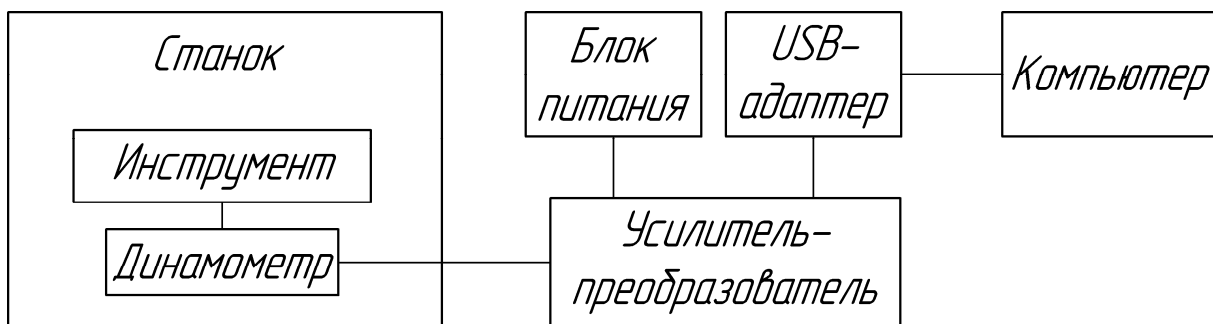


Рис. 3. Схема измерения составляющих сил резания при точении

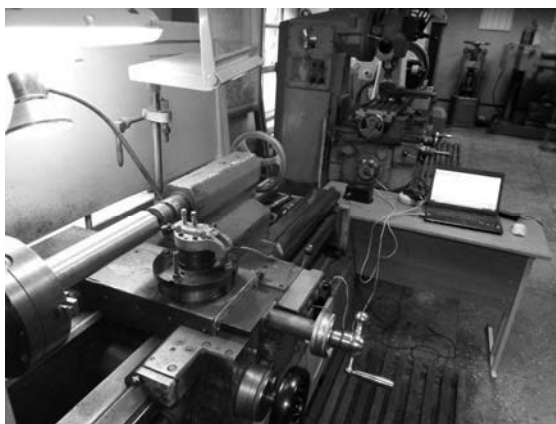


Рис. 4. Процесс проведения эксперимента

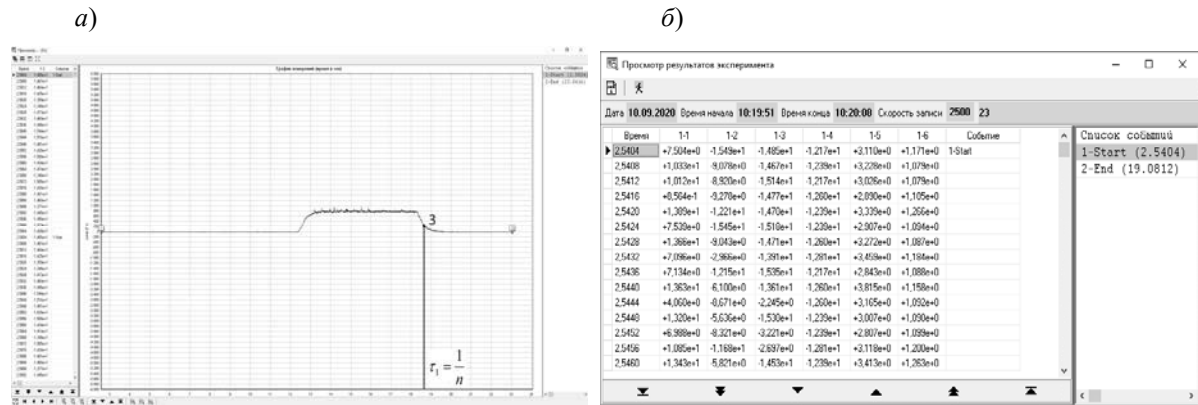


Рис. 5. Окна программы просмотра результатов эксперимента: а – график изменения силы резания от времени; б – таблица измерений сил резания

Измерение составляющих силы резания осуществлялось для резца с пластиной без канавки и с пластиной с канавкой (рельефом) на передней поверхности инструмента. Ширина канавки b составляла 2 мм, глубина h – 1 мм, расстояние от края канавки до лезвия – 0,2 мм. В поперечном сечении канавка имела радиусный профиль.

При $\tau_1 \approx 1/n$ в точке 3 (см. рис. 2, б) осуществлялось измерение составляющих силы резания P_{x1} , P_{y1} , P_{z1} , действующих на задней поверхности резца.

Из общих составляющих силы резания путем вычитания сил на задней поверхности находились составляющие силы P_{x2} , P_{y2} , P_{z2} , действующие на передней поверхности резца.

$$P_z = P_{z1} + P_{z2};$$

$$P_y = P_{y1} + P_{y2};$$

$$P_x = P_{x1} + P_{x2}. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов трения необходимо вычислить силы, приложенные к режущему лезвию и находящиеся в основной плоскости:

$$N_1 = \sqrt{P_{x1}^2 + P_{y1}^2}; \quad (4)$$

$$N_2 = \sqrt{P_{x2}^2 + P_{y2}^2}, \quad (5)$$

где N_1 и N_2 – силы на задней и передней поверхностях режущего лезвия, действующие в основной плоскости, соответственно; P_{x1} и P_{x2} – осевая составляющая силы резания на задней и передней поверхностях режущего лезвия соответственно; P_{y1} и P_{y2} – радиальная составляющая силы резания на задней и передней поверхностях режущего лезвия соответственно.

Сила трения на рабочих поверхностях резца определялась по зависимостям

$$F_z = P_{z1} \cdot \cos \alpha_z + N_1 \cdot \sin \alpha_z; \quad (6)$$

$$F_{II} = P_{z2} \cdot \sin \gamma_z + N_2 \cdot \cos \gamma_z, \quad (7)$$

где F_z и F_{II} – силы трения на задней и передней поверхностях резца соответственно; P_{z1} и P_{z2} – тангенциальная составляющая силы резания на задней и передней поверхностях режущего лезвия соответственно; α_z – задний угол заточки режущего лезвия; γ_z – передний угол заточки режущего лезвия.

Силы, действующие перпендикулярно к рабочим поверхностям резца, находили по формулам

$$N_3 = -P_{z1} \cdot \sin \alpha_3 + N_1 \cdot \cos \alpha_3; \quad (8)$$

$$N_{II} = P_{z2} \cdot \cos \gamma_3 + N_2 \cdot \sin \gamma_3, \quad (9)$$

где N_3 и N_{II} – силы, действующие нормально на заднюю и переднюю поверхности резца соответственно.

Коэффициенты трения на задней и передней поверхностях резца соответственно

$$\mu_3 = \frac{F_3}{N_3}; \quad (10)$$

$$\mu_{II} = \frac{F_{II}}{N_{II}}. \quad (11)$$

Результаты экспериментальных исследований

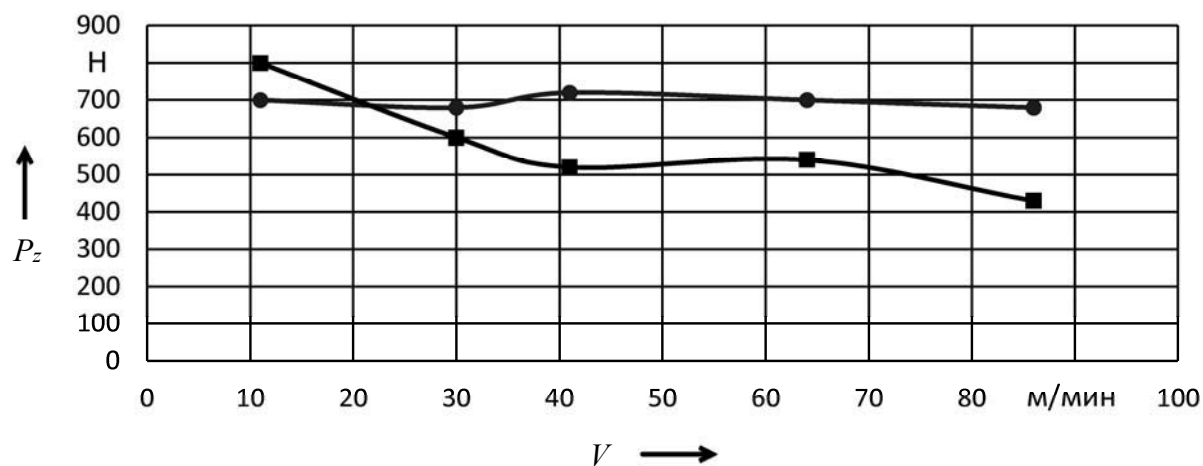
Следует отметить, что процесс резания лезвийным инструментом в зоне скоростей наростообразования имеет свои особенности, которые заключаются в том, что инструмент в главной секющей плоскости имеет геометрию, отличную от геометрии, полученной при заточке. А именно, имеет место увеличенный радиус округления режущей кромки (лезвия) за счет свешивающейся за лезвие шапки нароста, контактирующей с поверхностью резания и имеющей в 2–3 раза увеличенную твердость по отношению к твердости обрабатываемого материала. При уменьшении толщины срезаемого слоя от максимума до нуля, после отключения подачи, процесс резания за один оборот заготовки постепенно плавно полностью переходит в процесс поверхностного пластического деформирования (ППД) твердой радиусной шапкой нароста поверхности резания, что приводит к увеличению сил на задней поверхности резца. Повышение при этом температуры в зоне контакта несколько уменьшает данный процесс увеличения сил.

Другая особенность состоит в том, что сходящая стружка контактирует не с передней поверхностью резца, а с промежуточным более или менее неподвижным слоем в виде подошвы нароста. После отключения подачи, из-за кратковременности процесса уменьшения толщины среза до нуля, увеличенные силы адгезии отрыва подошвы нароста с передней поверхности резца фиксируются при максимальном фактическом переднем угле.

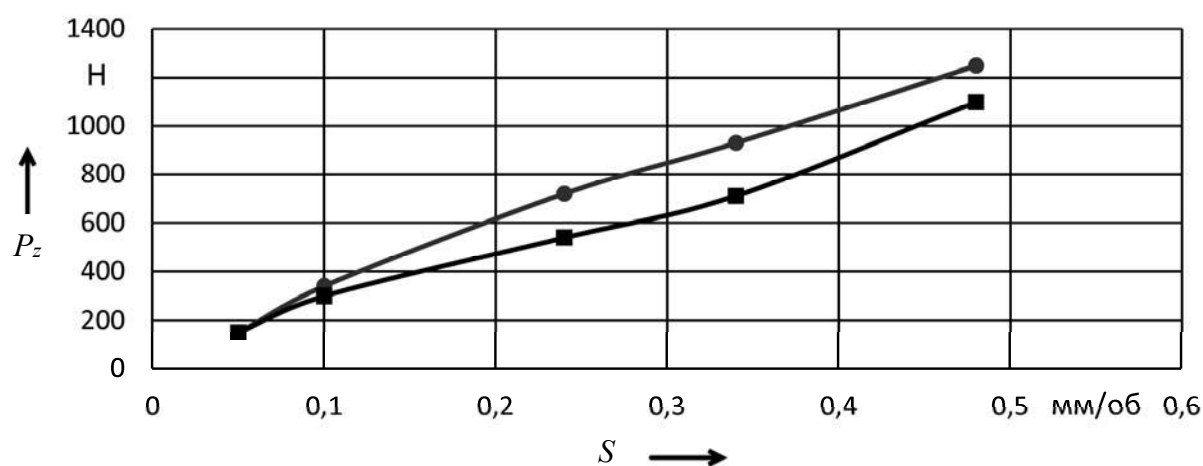
В результате экспериментальных исследований при точении стали 45 резцами с пластинами из твердого сплава Т15К6 ($\gamma_3 = 10^\circ$, $\alpha_3 = 9^\circ$, $\varphi = 60^\circ$, $\varphi_1 = 12^\circ$) установлено, что с увеличением глубины резания t и подачи S имеем увеличение всех составляющих сил (рис. 6), а возрастание скорости резания V приводит к незначительному их изменению (табл. 1–3).

При этом составляющие силы резания для резцов с рельефом значительно меньше таких же сил для резцов без рельефа. Так, при режимах резания $V = 41$ м/мин, $S = 0,24$ мм/об и $t = 1,0$ мм имеем уменьшение сил P_z на 28 %, а сил P_x и P_y примерно на 50 %. На передней поверхности для резца микрорельефа при скорости резания $V = 41$ м/мин имеет место экстремальное (максимальное) значение коэффициента трения $\mu_{II} = 1,44$, а для резца с рельефом при этой же скорости резания имеем экстремальное (минимальное) значение коэффициента трения $\mu_{II} = 0,64$ и экстремальное (максимальное) значение коэффициента трения $\mu_L = 0,71$ при скорости $V = 64$ м/мин (рис. 7, табл. 2 и 3). Тогда при скорости резания $V = 41$ м/мин следует ожидать для резца без рельефа минимальный коэффициент усадки стружки, максимальный фактический передний угол резца, температуру резания 300°C и максимальную стойкость инструмента. Эти утверждения согласуются с результатами, представленными в [2, 3].

а)



б)



в)

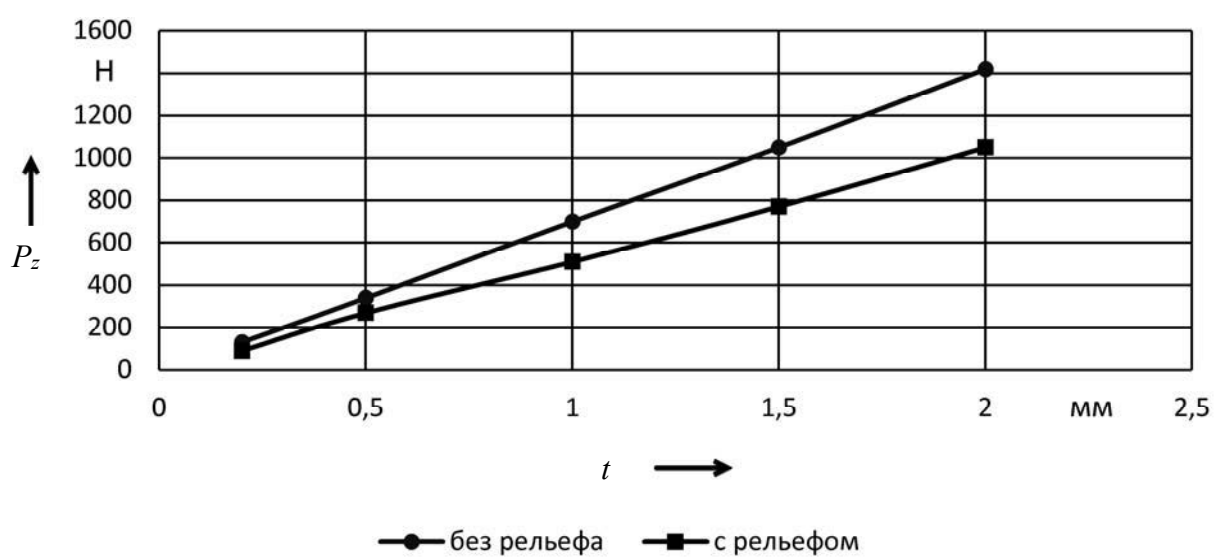


Рис. 6. Влияние режимов обработки на тангенциальную составляющую силу резания P_z :
а – от скорости V ; б – от подачи S ; в – от глубины резания t

Табл. 1. Значения составляющих сил резания (тангенциальной P_z , осевой P_x и радиальной P_y) от режимов обработки (скорости резания V , подачи S , глубины резания t)

Режим обработки		P_z , Н		P_x , Н		P_y , Н	
		без рельефа	с рельефом	без рельефа	с рельефом	без рельефа	с рельефом
V , м/мин	11	700	800	300	400	360	400
	30	680	600	360	260	400	280
	41	720	520	440	220	480	250
	64	700	540	420	250	430	280
	86	680	430	380	230	420	260
S , мм/об	0,05	150	150	80	70	65	70
	0,1	340	300	150	150	170	160
	0,24	720	540	420	250	480	250
	0,34	930	710	510	320	610	400
	0,48	1250	1100	600	500	790	600
t , мм	0,2	130	90	25	15	80	70
	0,5	340	270	160	160	260	120
	1	700	510	440	220	455	250
	1,5	1050	770	670	325	650	350
	2	1420	1050	950	500	850	450

Табл. 2. Значения составляющих сил резания, касательных F_z , F_n , нормальных N_z , N_n и коэффициентов трения μ_z и μ_n на задней (1) и передней (2) рабочих поверхностях резца (с пластиной из твердого сплава без рельефа на передней поверхности) соответственно от режимов обработки

Номер п/п	V , м/мин	S , мм/об	t , мм	P_z , Н		P_x , Н		P_y , Н		N_1 , Н	F_z , Н	N_z , Н	μ_z	N_2 , Н	F_n , Н	N_n , Н	μ_n
				1	2	1	2	1	2								
1	11	0,24	1	240	460	110	190	120	240	163	263	123	2,13	306	381	400	0,95
2	30			300	380	120	240	150	250	192	326	143	2,29	347	407	314	1,30
3	41			320	400	150	290	200	280	250	355	197	1,80	403	466	324	1,44
4	64			230	470	140	280	180	250	228	263	189	1,39	375	451	398	1,13
5	86			180	500	130	250	140	280	191	208	161	1,29	375	456	427	1,07
6	41	0,05	1	58	92	30	50	25	40	39	63	29	2,15	64	79	79	0,99
7		0,1		170	170	80	70	80	90	113	186	85	2,18	114	142	148	0,96
8		0,24		360	360	170	250	220	260	278	399	218	1,83	361	418	292	1,43
9		0,34		380	550	200	310	250	360	320	425	257	1,66	475	563	459	1,23
10		0,48		380	870	200	400	260	530	328	427	265	1,61	664	805	741	1,09
11	41	0,24	0,2	35	95	10	15	35	45	36	40	30	1,32	47	63	85	0,74
12			0,5	160	180	80	80	100	160	128	178	101	1,76	179	207	146	1,42
13			1	350	350	180	260	210	245	277	389	218	1,78	357	413	283	1,46
14			1,5	450	600	240	430	210	440	319	494	245	2,02	615	710	484	1,47
15			2	600	820	300	650	300	550	424	659	325	2,03	851	981	660	1,49

Табл. 3. Значения составляющих сил резания, касательных F_z , F_n , нормальных N_z , N_n и коэффициентов трения μ_z и μ_n на задней (1) и передней (2) рабочих поверхностях резца (с пластиной из твердого сплава с рельефом на передней поверхности) соответственно от режимов обработки

Номер п/п	V , м/мин	S , мм/об	t , мм	P_z , Н		P_x , Н		P_y , Н		N_1 , Н	F_z , Н	N_z , Н	μ_z	N_2 , Н	F_n , Н	N_n , Н	μ_n
				1	2	1	2	1	2								
16	11	0,24	1	250	550	130	270	150	250	198	275	162	1,70	368	419	512	0,82
17	30			120	480	60	200	100	180	117	135	99	1,37	269	314	452	0,69
18	41			160	360	90	130	120	130	150	179	126	1,42	184	218	341	0,64
19	64			160	380	90	160	130	150	158	180	134	1,34	219	255	357	0,71
20	86			130	300	120	110	140	120	184	154	165	0,94	163	191	283	0,67
21	41	0,05	1	40	110	20	50	30	40	36	45	30	1,48	64	74	103	0,72
22		0,1		150	150	80	70	80	80	113	164	91	1,80	106	120	139	0,86
23		0,24		150	390	90	160	100	150	135	167	112	1,49	219	256	367	0,70
24		0,34		260	450	140	180	150	250	205	286	167	1,71	308	350	418	0,84
25		0,48		380	720	200	300	220	380	297	418	242	1,73	484	551	670	0,82
26	41	0,24	0,2	20	70	5	10	30	40	30	24	27	0,88	41	48	66	0,73
27			0,5	100	170	80	80	55	65	97	113	82	1,37	103	119	159	0,75
28			1	160	350	90	130	120	130	150	179	126	1,42	184	217	331	0,65
29			1,5	190	580	100	225	125	225	160	210	132	1,59	318	372	547	0,68
30			2	350	700	200	300	200	250	283	386	231	1,67	391	456	659	0,69

Заключение

1. Приведена методика определения сил и коэффициентов трения на рабочих поверхностях резца с использованием оригинального метода с остановкой подачи резца в процессе резания.

2. Установлено, что коэффициент трения на задней рабочей поверхности резца без рельефа примерно на 25 % больше, чем на передней: $\mu_z / \mu_n = 1,8 / 1,44 = 1,25$ ($V = 41$ м/мин, $S = 0,24$ мм/об, $t = 1,0$ мм). Этим можно объяснить превалирующий износ задней поверхности резца.

3. Установлено, что коэффициент трения μ_n на передней поверхности резца без рельефа имеет экстремум (максимальное его значение) при скорости

резания $V = 41$ м/мин.

4. Установлено, что наличие рельефа на передней поверхности приводит к уменьшению коэффициента трения на рабочих поверхностях: на задней μ_z – в 1,27 (1,8/1,42), а на передней μ_n – в 2,25 (1,44/0,64) раза.

5. Определено, что коэффициент трения μ_n на передней поверхности резца для резца с рельефом имеет два экстремума: один с минимальным значением $\mu_n = 0,64$ при скорости резания $V = 40$ м/мин, другой с максимальным значением $\mu_n = 0,71$ при скорости резания $V = 64$ м/мин. При этом уменьшение коэффициента трения μ_n , по сравнению с резцом без рельефа, составляет 1,59 (1,13/0,71) раза.

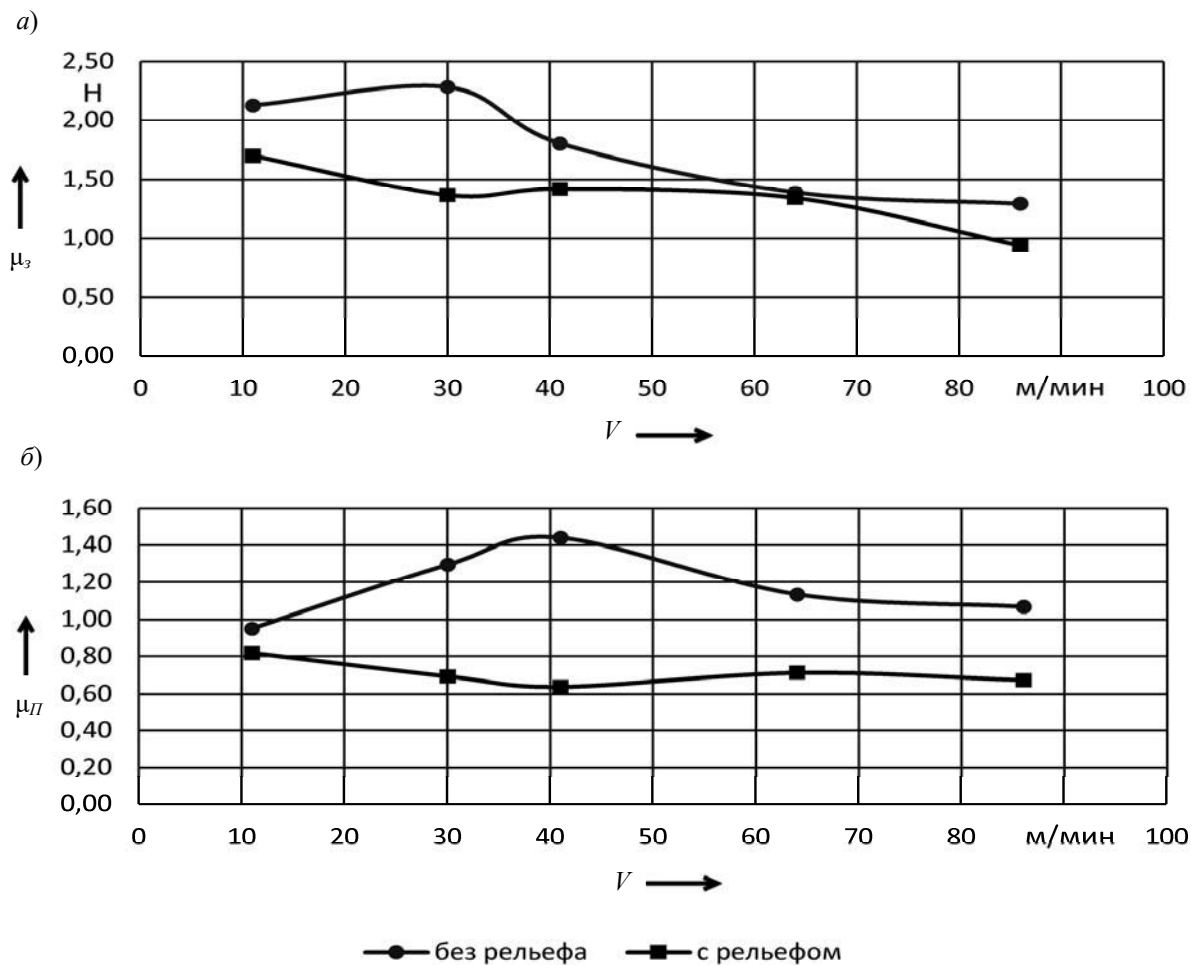


Рис. 7. Влияние скорости резания на коэффициент трения на задней μ_z (а) и передней μ_l (б) рабочих поверхностях резца

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ определения сил на задней поверхности резца и упругой деформации материала при его обработке: а. с. SU 1207632 / Г. Ф. Шатуров, В. Н. Подураев. – Оpubл. 30.01.1986.
2. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Кожевников, Д. В. Резание металлов: учебник / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов; под общ. ред. С. В. Кирсанова. – Москва: Машиностроение, 2007. – 304 с.

Статья сдана в редакцию 13 октября 2020 года

Денис Геннадьевич Шатуров, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-46-19-67.

Сергей Александрович Сухоцкий, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Denis Gennadyevich Shaturov, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-46-19-67.

Sergey Aleksandrovich Sukhotsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

УДК 621.9

Д. Г. Шатуров, В. К. Шелег

ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ НАРОСТА НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

UDC 621.9

D. G. Shaturov, V. K. Sheleg

PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL BASICS OF THE PROCESS OF BUILDUP FORMATION ON THE FRONT SURFACE OF A CARBIDE-TIPPED TOOL

Аннотация

В работе рассмотрены периоды роста, стабилизации, уменьшения и схода нароста с передней поверхности твердосплавного лезвийного инструмента.

Показано, что чередование этих периодов связано с теплофизическими характеристиками компонентов состава твердого сплава инструмента, изменяющимися от температуры при увеличении скорости резания. Установлены границы периодов изменения состояния нароста по скорости резания, температуре и стойкости инструмента. Предложена конструкция инструмента с микрорельефом на его передней поверхности, обеспечивающая сокращение диапазона скоростей резания с минимальной стойкостью инструмента, повышение периода стойкости и производительности на 60 %.

Ключевые слова:

резец, скорость резания, стойкость инструмента, нарост, микрорельеф, температура.

Abstract

The paper considers the periods of growth, stabilization, reduction and disappearance of the buildup from the front surface of a carbide-tipped tool.

The interchange of these periods is shown to be associated with thermophysical characteristics of components of the carbide material composition, which change due to temperature when the cutting speed increases. The boundaries of periods of build-up changing have been established in regard to cutting speed, temperature and tool durability. The design of a tool is proposed, which has a microrelief on its front surface providing a reduction in the range of cutting speeds with a minimum tool life, and a 60 % increase in the tool life and productivity.

Keywords:

cutter, cutting speed, tool life, buildup, microrelief, temperature.

В теории резания износу твердосплавного инструмента посвящено много работ [1–3], в которых в основном рассматриваются вопросы их изнашивания при повышенных скоростях резания [4, 5]. Однако работ, посвященных износу твердосплавного инструмента при малых и средних скоростях резания, недостаточно мало [5, 6]. Это сдерживает оптимизацию режимов резания при работе на этих скоростях резания при

точении, растачивании, зенкерования, фрезеровании и т. д. Задачей данной работы является устранить этот пробел.

Износ твердосплавного инструмента при малых и средних скоростях резания от 10 до 80 м/мин связан с явлением наростообразования по его передней поверхности [2, 5].

Период стойкости инструмента в этом диапазоне скоростей резания изменяется по кривой, определяемой из сле-

дующего выражения (рис. 1, табл. 1) [7]:

$$T_{01} = \frac{T_{01}^{\max}}{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{V - V_{01}}{V_{n2} - V_{01}} \right)^2}}, \quad (1)$$

где V_{01} , $T_{01}^{\max}$ – скорость резания, м/мин, и соответствующий ей макси-

мальный период стойкости, мин, в точке A_1 (см. рис. 1),

$$T_{01}^{\max} = T_{n2} \sqrt{e}; \quad (2)$$

V_{n2} , T_{n2} – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, резца в точке B_2 перегиба ($n_{01} = 1,0$) кривой $T_0 = f(v)$.

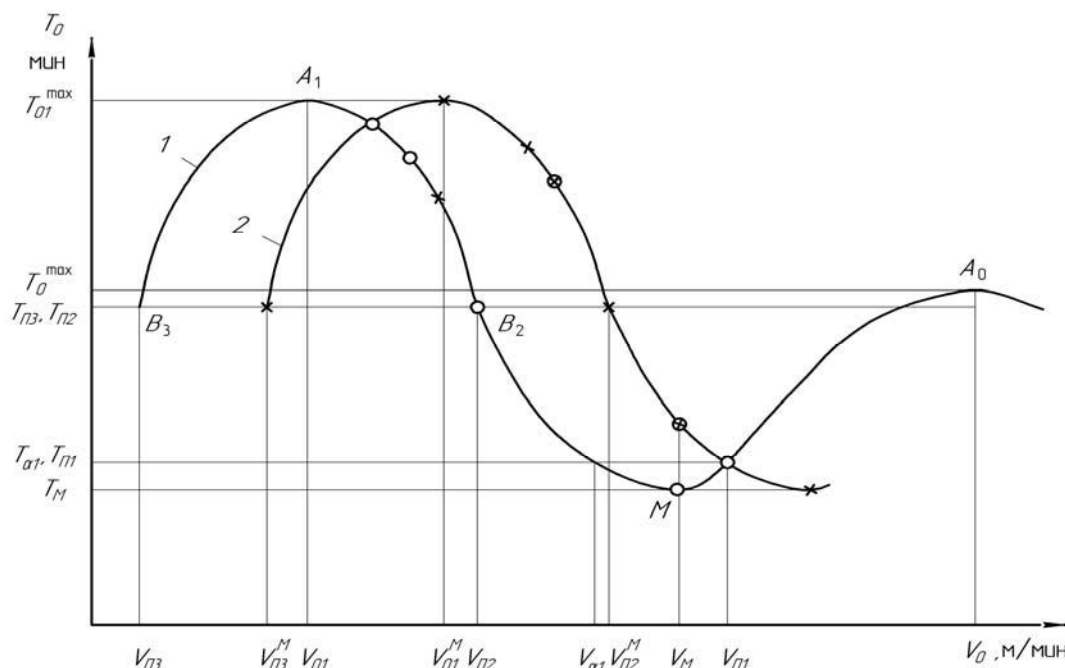


Рис. 1. Зависимость периода стойкости резца от скорости резания: 1 – без рельефа, $b = 0$ мм; 2 – с рельефом на передней поверхности, $b = 1,2$ мм

Табл. 1. Значения периодов стойкости резца от скорости резания

Параметры	V_{n3} , м/мин	V_{01} , м/мин	V_{n2} , м/мин	V_{a1} , м/мин	V_m , м/мин	V_{n1} , м/мин	V_0 , м/мин	V_n , м/мин	V_s , м/мин	Рельеф
	8	40	72	84	110	124	165	207	221	
T_{01} , мин	132	220	132	85	57					$b = 0$
T_0 , мин					57	85	140	85	57	$h = 0$
V_m , м/мин	33	65	97		110					$b = 1,2$ мм
T_{01}^M , мин	132	220	71		85					$h = 0,6$ мм
Примечание – $t = 1$ мм; $S = 0,24$ мм/об; резец Т15К6; материал – сталь 45; V_m – скорость резания; T_{01}^M – период стойкости резца с микрорельефом [8]										

Кроме указанных скоростей резания V_{n2} и V_{01} в точках $B_2 (V_{n2}, T_{n2})$ и $A_1 (V_{01}, T_{01}^{\max})$ кривой $T_{01} = f(v)$ (см. рис. 1), необходимо отметить еще две характерные точки. Это $B_2 (V_{n3}, T_{n3})$ и $M (V_m, T_m)$, в которых при скорости V_{n3} начинается, а при скорости V_m заканчивается процесс наростообразования на передней поверхности резца.

На участке скоростей резания от V_{n3} до V_m рабочие поверхности твердосплавного инструмента подвержены абразивно-адгезионному износу. И при скорости резания V_m имеет место минимальный период стойкости T_m . Из рис. 1 находим

$$V_{n3} = 2V_{01} - V_{n2}. \quad (3)$$

Положительной стороной явления наростообразования является то, что нарост защищает лезвие резца от непосредственного контакта со сходящей стружкой и его заднюю поверхность с поверхностью резания обрабатываемой заготовки. Это уменьшает износ лезвия и увеличивает стойкость инструмента. Отрицательной стороной этого явления является то, что периодический срыв нароста вызывает изменение сил резания и появление вибраций. Его твердые частицы перемещаются на заднюю поверхность резца, изнашивают ее и царапают обработанную поверхность, увеличивая ее шероховатость. При срыве нароста за счет касательных напряжений происходит удаление частиц твердого сплава, особенно кобальта.

Явление наростообразования связано в основном с температурой, возникающей в зоне резания при увеличении скорости резания. Она является основным фактором, определяющим физическое состояние контакта рабочих поверхностей резца со сходящей стружкой и поверхностью резания заготовки. Температура резания зависит от величины тепловых потоков, исходящих из зон теплообразования в стружку, заго-

товку и инструмент. Доля теплового потока, исходящего в инструмент, мала и составляет менее 5 % [5, 9]. Однако средняя температура наружной контактной передней поверхности резца значительно больше средней температуры стружки и заготовки. Из [5, 9] известны температуры в зоне резания при скоростях V_{01} до V_m , которые получены в результате экспериментальных исследований и, соответственно, равны 300 и 600 °С. Температуру резания для скорости V_{n2} можно определить как среднюю температуру от этих температур ($\Theta_{n2} = 450$ °С).

Тогда скорости резания, соответствующие этим температурам, определяются из следующих зависимостей [8]:

$$V_{01} = V_0 \left(\frac{300 - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{X_V}}; \quad (4)$$

$$V_{n2} = V_0 \left(\frac{450 - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{X_V}}; \quad (5)$$

$$V_m = V_0 \left(\frac{600 - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{X_V}}, \quad (6)$$

где V_0 – скорость резания, соответствующая максимальной стойкости инструмента, м/мин; Θ_n – температура резания в начале обработки, $\Theta_n = 20 \dots 25$ °С; Θ_0 – оптимальная температура резания, °С [10]; X_V – интенсивность нарастания температуры от скорости резания,

$$X_V = \frac{\lg \Theta_0 - \lg \Theta_n}{\lg V_0}. \quad (7)$$

Однако указанные величины температур до сих пор не обоснованы изменением теплофизических характеристик компонентов состава твердого сплава при резании.

Как ранее отмечалось, изучению процесса наростообразования посвящено много работ [3, 5]. Используя результаты этих исследований, можно дополнительно представить следующую последовательность процесса образования, стабилизации и схода нароста с передней поверхности твердосплавного режущего инструмента. Кроме таких факторов, как режимы резания, механические характеристики обрабатываемого материала и т. д., чередование периодов существования нароста зависит от изменения теплофизических характеристик компонентов состава твердого сплава инструмента при резании.

Интенсивность теплового потока, поступающего в резец, зависит от коэффициента теплопроводности λ каждого компонента твердого сплава, величина которого изменяется от температуры (рис. 2). Чем больше коэффициент теплопроводности λ , тем большее количе-

ство тепла проходит через единицу площади поверхности определенного компонента твердого сплава. На рис. 2 представлено изменение коэффициента теплопроводности λ для трех компонентов твердого сплава резца Т15К6 [11]. С увеличением скорости резания и температуры коэффициент теплопроводности вольфрама λ_W уменьшается до температуры 300 °С по степенной зависимости

$$\lambda_W = 174 - 0,552\Theta^{0,81} \quad (8)$$

при $0 \leq \Theta \leq 300$ °С, а при $\Theta \geq 300$ °С – по линейной

$$\lambda_W = 132 - 0,04714\Theta, \quad (9)$$

где λ_W – коэффициент теплопроводности вольфрама, Вт/(м·град); Θ – средняя температура резания, °С.

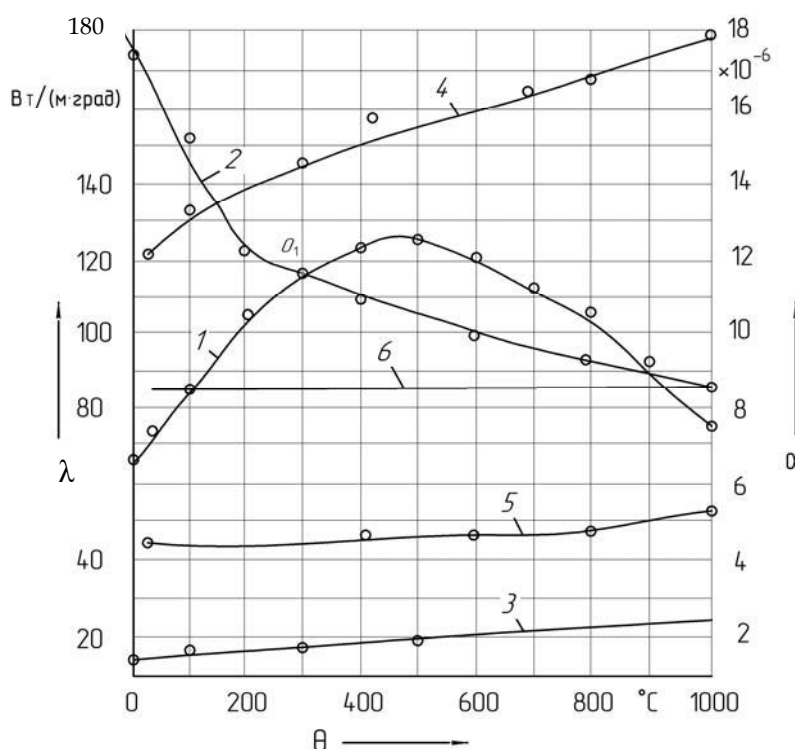


Рис. 2. Зависимость коэффициентов теплопроводности и линейного расширения компонентов твердого сплава от температуры: 1 – $\lambda = f(\Theta)$ – Co (кобальт); 2 – $\lambda = f(\Theta)$ – W (вольфрам); 3 – $\lambda = f(\Theta)$ – Ti (титан); 4 – $\alpha = f(\Theta)$ – Co; 5 – $\alpha = f(\Theta)$ – W; 6 – $\alpha = f(\Theta)$ – Ti

С увеличением температуры резания коэффициент теплопроводности кобальта изменяется по параболической зависимости

$$\lambda_{Co} = 68 + \frac{228}{900}\Theta - \frac{228}{900^2}\Theta^2. \quad (10)$$

Принимается экстремальное максимальное значение при температуре $\Theta = 450^\circ\text{C}$ с коэффициентом $\lambda_{Co} = 124,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$, что соответствует точке B_2 перегиба кривой $T_{01} = f(v)$ и скорости резания V_{n2} (см. рис. 1).

Пересечение линий коэффициентов теплопроводностей λ_w (8) и λ_{Co} (10) происходит в точке O_1 при $\Theta = 300^\circ\text{C}$ и $\lambda = \lambda_w = \lambda_{Co} = 118 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$, что соответствует скорости V_{01} и первому экстремуму зависимости стойкости от скорости резания $T_{01} = f(v)$ (см. рис. 1).

Далее проследим процесс образования нароста на передней поверхности резца при увеличении скорости резания от V_{n3} (см. рис. 1) и температуры $\Theta \geq 108^\circ\text{C}$ [8]. Вначале отметим, что нарост можно разделить на две части: подошву, адгезионно приваренную

(приклеенную) к передней поверхности резца, и шапку, изменяющуюся во времени по высоте [5].

При увеличении температуры размеры зерен карбида вольфрама, заключенные в оболочку кобальта, почти не претерпевают никаких изменений, поскольку коэффициент линейного расширения вольфрама остается практически постоянным (см. рис. 2). Зерна кобальта, напротив, при увеличении температуры увеличиваются в размерах вследствие увеличения коэффициента линейного удлинения λ_{Co} (см. рис. 2). Они удлиняются, выступая над передней поверхностью, препятствуют перемещению стружки, претерпевают от нее упругие и пластические деформации на изгиб, тем самым увеличивается площадь передней поверхности, занятая кобальтом. Это приводит к увеличению толщины подошвы, высоты шапки нароста, переднего действительного угла и к уменьшению деформации стружки и к минимальному значению ее усадки (рис. 3).

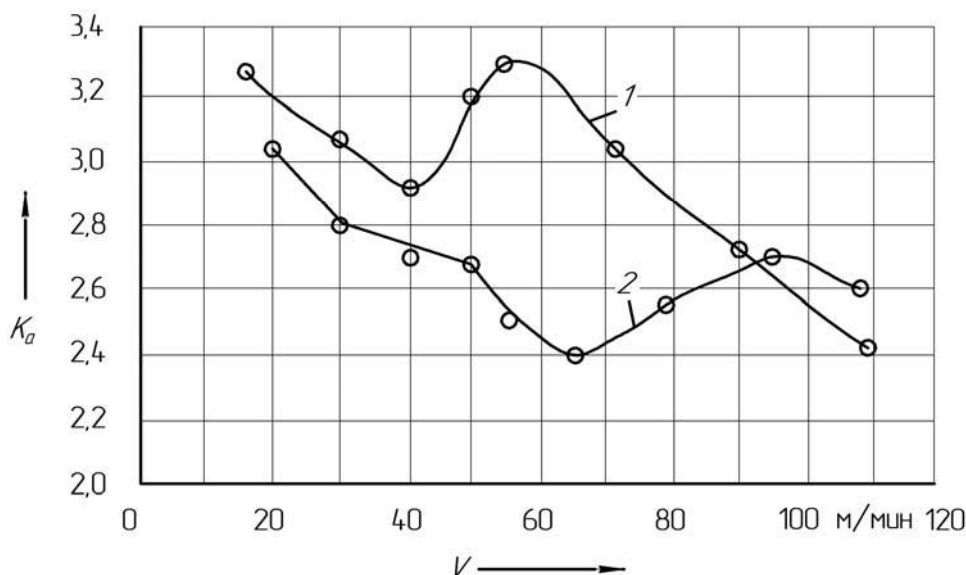


Рис. 3. Изменение коэффициента усадки стружки от скорости резания: $t = 1,0 \text{ мм}$; $S = 0,24 \text{ мм/об}$; 1 – $b = 0$; 2 – $b = 1,2 \text{ мм}$; $h = 0,6 \text{ мм}$

Этот процесс происходит до равенства удельных коэффициентов теплопроводности $\lambda_w = \lambda_{Co}$, что соответствует температуре 300 °С (см. рис. 2). В этом случае каждая единица площади поверхностей компонентов твердого сплава карбида вольфрама и кобальта пропускает через себя одинаковой величины поток тепла. Подошва в этот момент более или менее неподвижна, что говорит о некоторой стабилизации процесса резания, обеспечивая при скорости резания $V_{01} = 40$ м/мин максимальный период стойкости инструмента (см. рис. 1).

При увеличении температуры в зоне резания больше 300 °С коэффициент теплопроводности кобальта λ_{Co} увеличивается, а вольфрама λ_w уменьшается. При этом значения коэффициентов поменялись местами, теперь $\lambda_{Co} > \lambda_w$. При тех же условиях коэффициент линейного расширения кобальта α_{Co} увеличивается и становится значительно больше коэффициента линейного расширения вольфрама α_w . С увеличением температуры кобальт, поднимаясь вследствие линейного расширения над передней поверхностью, производит местную поперечную деформацию подошвы и части шапки нароста. Разновысотное положение одной части нароста относительно другой приводит к тому, что менее прочная часть шапки нароста

уносится стружкой, увеличивая площадь контакта задней поверхности резца с быстроперемещающейся поверхностью резания заготовки и ее износ. Период стойкости инструмента умеренно уменьшается до температуры $\Theta = 450$ °С, где имеет место максимальное значение коэффициента λ_{Co} , а скорость резания соответствует значению скорости V_{n2} перегиба кривой $T_{01} = f(v)$ (см. рис. 1). Дополнительно отметим, что повышение температуры в зоне резания больше 300 °С приводит к уменьшению коэффициента трения между подошвой и передней поверхностью резца и к более заметному перемещению подошвы по направлению схода стружки.

При увеличении скорости резания $V > V_{n2}$ увеличивается температура в зоне резания и на передней поверхности резца более 450 °С. Это приводит к интенсификации абразивно-адгезионного износа инструмента, выражающегося в местном срыве нароста, а его передняя поверхность принимает ячеистый вид [9]. Увеличение температуры сверх температуры $\Theta > (0,25...0,3) \Theta_{пл}$, а для чистых металлов $\Theta = 0,4 \Theta_{пл}$ (где $\Theta_{пл}$ – температура плавления сплава), ведет для деформированного металла к возникновению процесса рекристаллизации (табл. 2) [12].

Табл. 2. Температура начала $\Theta_{нк}$ и окончания $\Theta_{ок}$ процесса рекристаллизации

Материал	$\Theta_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\Theta_{нк}, ^\circ\text{C}$	$\Theta_{ок}, ^\circ\text{C}$
Кобальт Со	1490	447	596
Сталь 45	1530	459	612
Примечание – $\Theta_{пл}$ – температура плавления сплава; $\Theta_{нк} = 0,3\Theta_{пл}$; $\Theta_{ок} = 0,4\Theta_{пл}$			

Как видно из таблицы, начало и окончание процесса рекристаллизации вкладывается в предел температур 450...600 °С.

Процесс рекристаллизации заключается в появлении зародышей, возник-

новении и росте новых недеформированных зерен взамен деформированных, в нашем случае зерен кобальта и стали подошвы.

В результате процесса рекристаллизации происходит разупрочняющий

процесс: уменьшение твердости шапки нароста и его подошвы, которая становится по твердости меньше твердости сходящей стружки. Улучшаются свойства металла, главным образом повышается его пластичность. Свеживающаяся за лезвие шапка нароста покидает вместе с кобальтом и зернами карбида вольфрама переднюю поверхность резца первой, перемещаясь под заднюю поверхность инструмента, царапая и изнашивая ее. Нарост перестает играть блокирующую роль и постепенно «мягкая» подошва нароста, менее подвижная, чем стружка, вырождается в тонкий слой и удаляется (сходит) с передней поверхности резца твердой стружкой и исчезает вовсе при температуре 600 °C в конце процесса рекристаллизации.

Таким образом, можно выделить по скорости резания три участка, в пределах которых нарост набирает силу, стабилизируется, уменьшается и исчезает вовсе. Это участки $V_{n3} \leq V \leq V_{01}$, $V_{01} \leq V \leq V_{n2}$ и $V_{n2} \leq V \leq V_m$, соответствующие следующему диапазону температур: 100...300, 300...450 и 450...600 °C.

Значительное падение стойкости резца в диапазоне температур от 450 до 600 °C или скоростей резания от V_{n2} до V_m можно уменьшить созданием на его передней поверхности микрорельефа, имеющего форму, например, цилиндрического желоба (канавки) с выходом его на вспомогательное лезвие и отстоящую от главного лезвия на величину, соизмеримую с толщиной срезаемого слоя металла (рис. 4). Перемещающаяся разупрочненная подошва нароста встречает на своем пути препятствие в виде цилиндрического желоба (канавки), входит и выходит из него с меньшей скоростью в результате тормозящего действия силы трения канавки. Стружка, перемещающаяся с большей скоростью по поверхности подошвы и адгезионно связанная с ней, тоже притормаживается, уменьшая скорость своего перемещения. В результате тормозного

действия сил трения все происходит аналогично, как и при увеличении толщины срезаемого слоя металла: увеличивается толщина подошвы, высота шапки нароста, действительный передний угол, уменьшается усадка стружки и происходит частичный уход из зоны скоростей рекристаллизации (см. рис. 1). Зона скоростей резания рекристаллизации для резца без микрорельефа начинается со скорости резания $V_{n2} = 72,0$ м/мин и оканчивается при скорости резания $V_m = 110$ м/мин (см. рис. 1). Протяженность зоны скоростей рекристаллизации составляет 38 м/мин. Для резца с микрорельефом она начинается со скорости $V_{n2} = 97$ м/мин и оканчивается при скорости резания $V_m = 110$ м/мин (см. рис. 1). Протяженность этой зоны составляет 13 м/мин. Таким образом, имеем сокращение интервала скоростей резания зоны рекристаллизации на 25 м/мин, что обеспечивает увеличение периода стойкости инструмента при $V = 110$ м/мин в 1,49 (85/57) раза (рис. 5). Величины износа задней поверхности резца могут быть установлены по следующим экспериментальным зависимостям (см. рис. 5) [8]:

$$h_z = 68\tau^{0,494}; \quad (11)$$

$$h_{zm} = 56\tau^{0,494}, \quad (12)$$

где h_z и h_{zm} – величины износа задней поверхности резца без и с микрорельефом соответственно, мкм.

Оптимальная область эксплуатации инструмента по стойкости смещается в сторону увеличения скоростей резания. Так, для резца без микрорельефа $V_{01} = 40$ м/мин, а с микрорельефом $V_{m01} = 65$ м/мин (см. рис. 1). Получим увеличение ресурса работы инструмента [14] и производительность в 1,6 (65/40) раза.

Теперь определим размеры микрорельефа канавки, которые обеспечили бы такое повышение силы трения (сцепления) подошвы при перемещении

ее по радиусу цилиндрического желоба. Увеличение силы трения определим по приведенному коэффициенту трения, используя методику [13],

$$f_0 = f \frac{\alpha}{\sin \alpha}, \quad (13)$$

где f, f_0 – коэффициент трения и приведенный коэффициент трения соответ-

ственно; α – угол между вертикальной осью канавки и радиусом, проведенным из центра канавки в любую ее точку (см. рис. 4).

Максимальный приведенный коэффициент трения f_0 получаем при $\alpha = \pi/2$. Тогда

$$f_0 = 1,57 f. \quad (14)$$

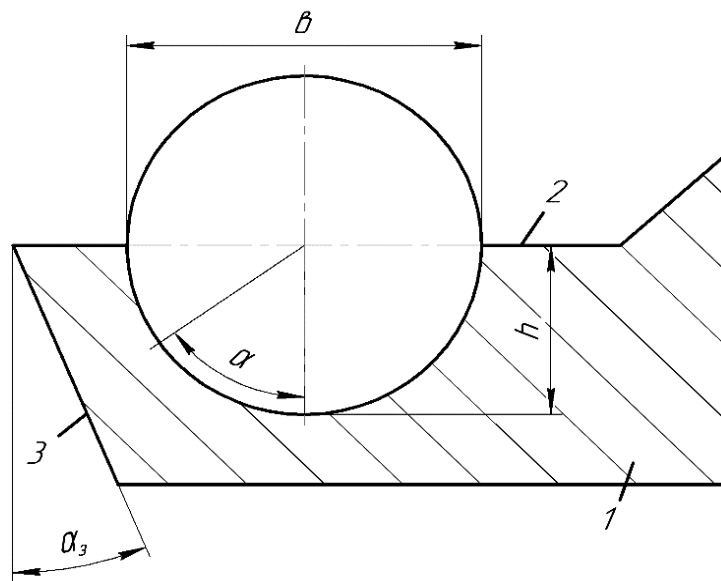


Рис. 4. Профиль канавки на передней поверхности резца: 1 – резец; 2 – передняя поверхность; 3 – задняя поверхность; b – ширина канавки; h – глубина канавки; α – угол заточки задней поверхности резца

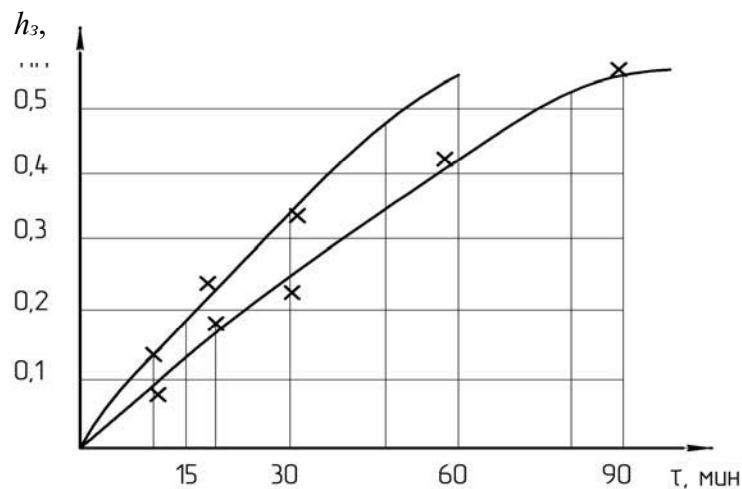


Рис. 5. Зависимость износа призматического резца от времени резания: $t = 1,0$ мм; $S = 0,24$ мм/об; $V = 110$ м/мин; -- расчет; x – эксперимент

Отсюда можно сделать вывод, что оптимальный микрорельеф канавки цилиндрического желоба должен быть таким, чтобы глубина канавки была равна половине ее ширины. Тогда она обеспечит увеличение силы трения на 57 %.

Выводы

1. Установлены периоды жизни нароста от возникновения, роста, стабилизации, уменьшения и схода с передней поверхности твердосплавного инструмента от изменения теплофизических характеристик компонентов твердого сплава при резании и их величины по скорости резания, интервала температур и стойкости инструмента.

2. Установлено, что для данного сочетания материала деталей и твердосплавного инструмента при различных комбинациях глубины резания и подачи:

– оптимальная скорость резания, обеспечивающая максимальный период стойкости твердосплавного инструмента в зоне наростообразования, соответствует моменту равенства коэффициентов теплопроводностей кобальта и вольфрама, изменяющихся от скорости резания и температуры, и температуре в зоне резания, равной 300 °С;

– скорость резания V_{n2} в точке перегиба кривой $T_{01} = f(v)$ соответствует максимальному (экстремальному) значению коэффициента теплопроводности кобальта и температуре в зоне резания, равной 450 °С начала процесса рекристаллизации;

– скорость резания V_m соответствует концу процесса рекристаллизации кобальта и материала нароста детали и минимальному значению периода стойкости инструмента при переходе от абразивно-адгезионного к абразивно-окислительному его износу и температуре резания, равной 600 °С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даниелян, А. М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов / А. М. Даниелян. – Москва: Машиностроение, 1954. – 276 с.
2. Лоладзе, Т. Н. Износ режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – Москва: Машиностроение, 1958. – 357 с.
3. Зорев, Н. Н. О процессе износа твердосплавного инструмента / Н. Н. Зорев, Д. Н. Клауч, В. А. Батырев // Вестн. машиностроения. – 1971. – № 11. – С. 70–73.
4. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва: Высшая школа, 1985. – 304 с.
5. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1958. – 357 с.
6. Грановский, Г. И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов / Г. И. Грановский. – Москва: Машиностроение, 1982. – 112 с.
7. Шатуров, Д. Г. Состояние и пути повышения износостойкости лезвийного инструмента в широком диапазоне изменения скорости резания / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, М. В. Панков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1. – С. 100–109.
8. Шатуров, Д. Г. Исследование влияния скорости резания на триботехнические характеристики процесса точения твердосплавным инструментом в широком диапазоне изменения скорости резания / Д. Г. Шатуров, В. К. Шелег // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 2. – С. 88–96.
9. Кожевников, Д. В. Резание металлов: учебник для вузов / Д. В. Кожевников. – 2-е изд., доп. – Москва: Машиностроение, 2012. – 304 с.
10. Шатуров, Д. Г. Исследование режущей способности твердосплавного лезвийного инструмента при средних скоростях резания / Д. Г. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3. – С. 112–120.
11. Чиркин, В. С. Теплопроводность промышленных материалов / В. С. Чиркин. – Москва: Машгиз, 1962. – 340 с.

12. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – Москва: Металлургия, 1985. – 542 с.
13. Машков, А. А. Теория механизмов и машин / А. А. Машков. – Минск: Высшая школа, 1971. – 471 с.
14. Шатуров, Д. Г. Ресурс работы лезвийного инструмента при обработке / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 90–98.

Статья сдана в редакцию 12 октября 2020 года

Денис Геннадьевич Шатуров, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-46-19-67.

Валерий Константинович Шелег, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет. E-mail: ShelehV@tut.by.

Denis Gennadyevich Shaturov, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-46-19-67.

Valery Konstantinovich Sheleg, DSc (Engineering), Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University. E-mail: ShelehV@tut.by.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83:621

А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА СЕПЕРКОНДЕНСАТОРА НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА БАЗЕ ДВУХУРОВНЕГО ПОВЫШАЮЩЕ-ПОНИЖАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ DC/DC ДЛЯ ПРИВОДА ЛИФТА

UDC 62-83:621

A. S. Koval, A. G. Kondratenko

ON CALCULATING A SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE DEVICE BASED ON THE TWO-LEVEL BUCK-BOOST DC/DC CONVERTER FOR ELEVATOR DRIVES

Аннотация

Представлена методика расчета емкости суперконденсатора накопителя на базе преобразователя ДС/ДС, необходимой для накопления и использования рекуперированной энергии в безредукторных приводах лифтов. Используемая методика расчета позволяет также определить промежуточное рабочее значение напряжения конденсатора или величину емкости конденсатора, позволяющих сохранить работоспособность электропривода при кратковременных нарушениях питания.

Ключевые слова:

преобразователь (buck-boost) DC/DC, емкостной накопитель, рекуперативный режим работы, частотно-регулируемый безредукторный электропривод лифта, энергосбережение, суперконденсатор.

Abstract

The paper presents a method for calculating the capacity of a supercapacitor energy storage device on the basis of a buck-boost DC-DC converter needed to accumulate and use recuperative energy in gearless elevator drives. The calculation method used also makes it possible to determine an intermediate operating value of the capacitor voltage or a value of the capacitor capacitance, enabling the drive to remain operational in case of short-term power failures.

Keywords:

buck-boost DC-DC converter, capacitive energy storage device, recuperative mode of operation, variable frequency gearless electric elevator drive, energy saving, supercapacitor.

Частотно-регулируемые электроприводы переменного тока имеют широкое коммерческое использование. Для ряда механизмов они позволяют существенно повысить их энергоэффективность, что достигается, в том числе, за счет исключения механических редукторных устройств при применении низкочастотных электродвигателей и ис-

пользования энергии возможных генераторных режимов работы двигателя при меньших потерях в силовом канале собственно электропривода. Например, к таким механизмам можно отнести лифты. Особенностью приводов лифтов является работа с меняющейся нагрузкой, что обеспечивает работу привода как в двигательных режимах, так и в ге-

нераторных (рекуперативное торможение) [1]. При применении лифтовых безредукторных лебедок возможно накопление рекуперированной энергии в конденсаторных накопителях энергии на суперконденсаторах и использование её для повышения энергоэффективности электрооборудования всего лифта. Так как загрузка кабины и этажность перемещения кабины лифта – это случайные величины, то возможный режим работы лифта, при котором рекуперированная энергия максимальна и на который может рассчитываться максимальная ёмкость накопителя, – это перемещение пустой кабины с первого этажа на последний либо спуск кабины при максимальной загрузке с последнего этажа на первый. При возможном последовательном чередовании этих режимов для обеспечения работоспособности накопителя в схеме такого привода сохраняется тормозной резистор. Энергия, ак-

кумулируемая в конденсаторном накопителе, может использоваться в дальнейшем и для сглаживания кратковременных перерывов по напряжению в питании инвертора (микроотключения питания длительностью от долей секунды до единиц секунд) или падений напряжения питающей сети. Таким образом, целесообразен расчет емкости емкостного накопителя для лифтов, обеспечивающий не только накопление максимально возможной за поездку рекуперированной энергии с последующим использованием её приводом лифта, но и позволяющей сохранить работоспособность привода лифта при микроотключениях или падениях напряжения питающей сети. Блок-схема частотно-регулируемого электропривода лифта с емкостным накопителем энергии (на базе суперконденсатора) с использованием преобразователя постоянного тока ДС/ДС представлена на рис. 1 [2].

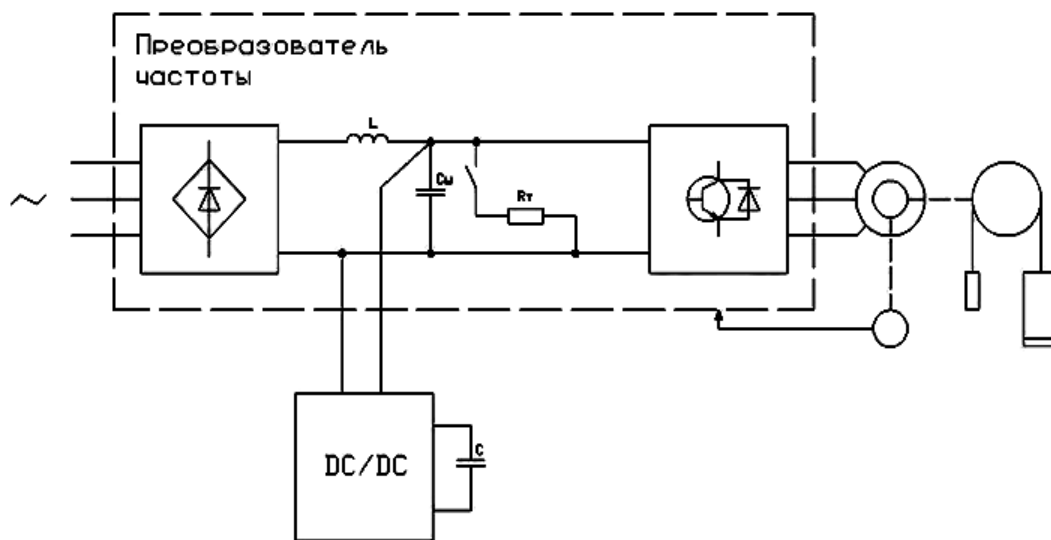


Рис. 1. Блок-схема электропривода лифта с преобразователем DC/DC и емкостным накопителем

Возможные графики изменения напряжения на шине постоянного тока звена постоянного тока преобразователя частоты, а также напряжения на конденсаторе и тока заряда-разряда кон-

денсатора накопителя на базе преобразователя постоянного тока ДС/ДС при энергообмене между сетью, двигателем и конденсатором накопителя показаны на рис. 2.

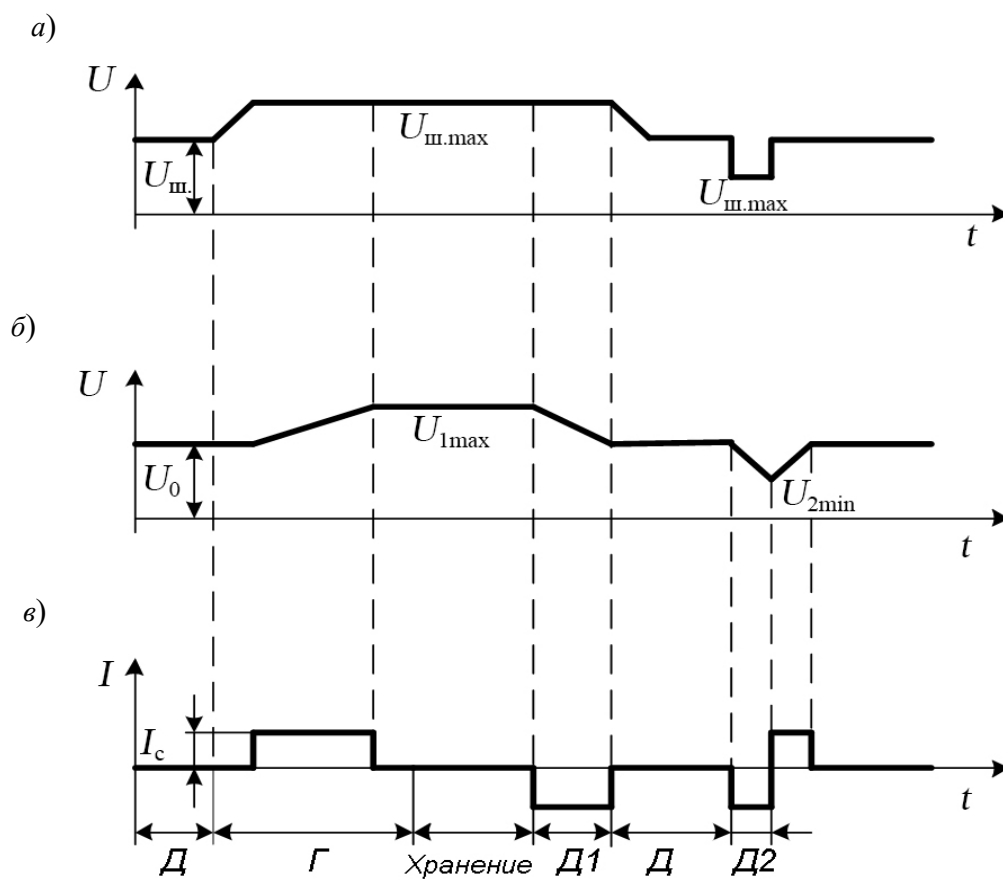


Рис. 2. Графики изменения: а – напряжения на шине постоянного тока преобразователя частоты; б – напряжения на конденсаторе накопителя; в – тока заряда-разряда конденсатора накопителя

Работа накопителя на базе ДС/ДС преобразователя осуществляется схемой управления [2] на основе анализа напряжений на шине постоянного тока преобразователя частоты и тока суперконденсатора накопителя. При переходе от двигательного режима работы двигателя привода лифта в генераторный (участок Д, рис. 2) напряжение на шине постоянного тока определяется значением $U_{ш}$, а напряжение на конденсаторе – U_0 . В рекуперативном режиме работы (участок Г, см. рис. 2) напряжение на шине увеличивается до значения $U_{ш.мах}$. Режим накопления рекуперированной энергии начинается при достижении напряжением на шине значения $U_{ш.мах}$. Происходит заряд конденсатора до напряжения на конденсаторе $U_{1мах}$ (окончание режима рекуперации),

и конденсатор сохраняет это напряжение (режим «хранение» на рис. 2) до возникновения следующего двигательного режима работы (участок Д1, см. рис. 2), при котором энергия конденсатора используется двигателем привода. Если напряжение конденсатора накопителя достигло значения $U_{1мах}$, а режим рекуперации не закончился, то система управления преобразователя частоты обеспечивает дальнейший сброс энергии рекуперации на тормозной резистор. В двигательном режиме (участок Д1, см. рис. 2), следующем за рекуперативным, напряжение конденсатора при его разряде опять принимает значение U_0 , и накопитель готов к следующему рекуперативному режиму. При возникновении кратковременного падения напряжения питания (участок Д2,

см. рис. 2) за счет энергии конденсатора (разряд от напряжения U_0 до напряжения $U_{2\min}$) обеспечивается сохранение работы привода. При этом конденсатор C разряжается до минимально возможного напряжения $U_{2\min}$ при работе накопителя. С восстановлением питания конденсатор накопителя заряжается опять до напряжения U_0 и готов к следующему возможному режиму рекуперативного торможения. Таким образом, напряжение на конденсаторе накопителя имеет значение U_0 при работе в двигательном режиме и уменьшается до $U_{2\min}$ (режим кратковременного падения напряжения питания) либо растет до $U_{1\max}$ (режим рекуперативного торможения).

При выборе емкости суперконденсатора емкостного накопителя необходимо определить номинальное напряжение конденсаторного модуля $U_{ном}$ и номинальную емкость модуля C . Конденсор накопителя начинает заряжаться, когда напряжение на шине постоянного тока в режиме рекуперации достигает максимума $U_{ш.макс}$. Соответственно, номинальное напряжение конденсаторного модуля $U_{ном}$:

$$U_{ш.макс} \leq U_{ном}.$$

Так как накопитель, предполагается, должен обеспечивать работу привода при микроотключениях или кратковременных падениях сетевого напряжения питания длительностью t_0 (доли секунд и секунды), то, при использовании энергии рекуперации в последующем двигательном режиме, он должен разряжаться не до $U_{2\min}$, а до напряжения U_0 , большего $U_{2\min}$, сохраняя часть энергии, необходимую для питания двигателя в течение этого времени t_0 . Чем больше напряжение U_0 , тем обеспечивается большее время, при котором сохраняется работоспособность привода. Энергия E_1 , накапливаемая в накопителе (суперконденсатор – линейный элемент) в режиме рекуперации и используемая в

последующем двигательном режиме, может быть определена [3]:

$$E_1 = \eta \int_{t_1}^{t_2} P_0 dt = \frac{C_0}{2} (U_{1\max}^2 - U_0^2), \quad (1)$$

где P_0 – мощность в цепи постоянного тока преобразователя частоты при работе двигателя привода лифта в рекуперативном режиме (определяется механической работой на валу двигателя совершаемой кабиной с грузом в режиме рекуперативного торможения с учетом общего КПД при передаче энергии в цепь постоянного тока преобразователя частоты); U_0 – начальное значение напряжения конденсатора; $U_{1\max}$ – максимальное значение напряжения при заряде суперконденсатора; C_0 – емкость суперконденсатора; t_1 , t_2 – время начала режима торможения и его окончания соответственно.

Для определения напряжения U_0 , обеспечивающего энергию конденсатора E_2 необходимую для сохранения непрерывной работы привода при микроотключении или падении сетевого напряжения питания, необходимо выполнение следующего условия:

$$E_2 = \frac{1}{\eta_1} \int_{t_3}^{t_4} P_1 dt = \frac{C}{2} (U_0^2 - U_{2\min}^2). \quad (2)$$

где E_2 – энергия в цепи постоянного тока преобразователя частоты, необходимая для обеспечения работы двигателя в течение времени микроотключения или падения сетевого напряжения; P_1 – мощность, отдаваемая конденсатором C в цепь постоянного тока в промежутке времени t_3 , t_4 (определяют длительность нарушения питания); η_1 – КПД преобразователя постоянного тока ДС/ДС.

Используя выражения (1) и (2), можно определить напряжение U_0 :

$$U_0 = \sqrt{\frac{E_1 \cdot U_{1\max}^2 + E_2 \cdot U_{2\min}^2}{E_1 + E_2}}.$$

Это напряжение определяет максимальное время нарушения питания, при котором обеспечивается работа двигателя от накопителя при заданной емкости C . Соответственно, выражение (2) можно переписать для этого случая в следующем виде:

$$P_1 \cdot t_{\max} = \frac{1}{2} C \cdot (U_0^2 - U_{2\min}^2) \cdot \eta_l.$$

Откуда имеем

$$t_{\max} = \frac{C \cdot (U_0^2 - U_{2\min}^2) \cdot \eta_l}{2 \cdot P_1}.$$

Таким образом, можно рассчитать емкость накопителя, чтобы он обеспе-

чивал движение кабины до ближайшего этажа при микроотключении или падении сетевого напряжения. В цепи постоянного тока преобразователя частоты присутствует также емкость фильтра. Величина этой емкости и, как следствие, энергия, запасаемая в ней, мало влияют на время работы двигателя при нарушении питания.

Рассмотрим пример расчета емкости накопителя. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. Для расчета значения энергий E_1 и E_2 в цепи постоянного тока преобразователя частоты определены экспериментально для безредукторного привода лифта грузоподъемностью 630 кг и скоростью движения 1 м/с при перемещении пустой кабины с первого этажа на девятый (номинальная мощность двигателя 5954 Вт).

Табл. 1. Исходные данные для расчета

$U_{1\max}$, В	$U_{2\min}$, В	E_1 , Дж	E_2 , Дж	η
750	600	2384	5678	0,9

Напряжение

$$U_0 = \sqrt{\frac{2384 \cdot 750^2 + 5678 \cdot 600^2}{2384 + 5678}} = 648 \text{ В}.$$

Емкость конденсатора

$$C = \frac{2 \cdot 2384}{750^2 - 600^2} = 0,033418 \text{ Ф}.$$

Энергия, запасаемая в режиме рекуперативного торможения (1),

$$E_1 = \frac{0,033418}{2} \cdot (750^2 - 648^2) = 2383,9 \text{ Дж}.$$

Энергия, отдаваемая накопителем в двигательном режиме при микроотключении (2),

$$E_2 = \frac{0,033418}{2} \cdot (648^2 - 600^2) = 999,6 \text{ Дж}.$$

Полная энергия, запасаемая в накопителе,

$$E = \frac{0,033418}{2} \cdot (750^2 - 600^2) = 3383,5 \text{ Дж}.$$

Возможное время нарушения питания, обеспечиваемое энергией накопителя при расчетных параметрах,

$$t = \frac{0,033418 \cdot (648^2 - 600^2)}{2 \cdot 5111} \cdot 0,9 = 0,176 \text{ с.}$$

Работа ДС/ДС преобразователя в рассматриваемых режимах с рассчитанной емкостью суперконденсатора может быть смоделирована в соответствии с моделью [1]. При расчетных параметрах модель имеет вид (рис. 3).

В модели в качестве энергетического эквивалента двигателя привода

лифта использована емкость фильтра шины постоянного тока преобразователя частоты. Величина этой емкости равна емкости накопителя, обеспечивая обмен энергией (при не учете потерь в преобразователе ДС/ДС) на уровне, соответствующем потребляемой и рекуперированной мощности, используемой при расчетах. Графики работы накопителя, полученные в результате моделирования, представлены на рис. 4–6.

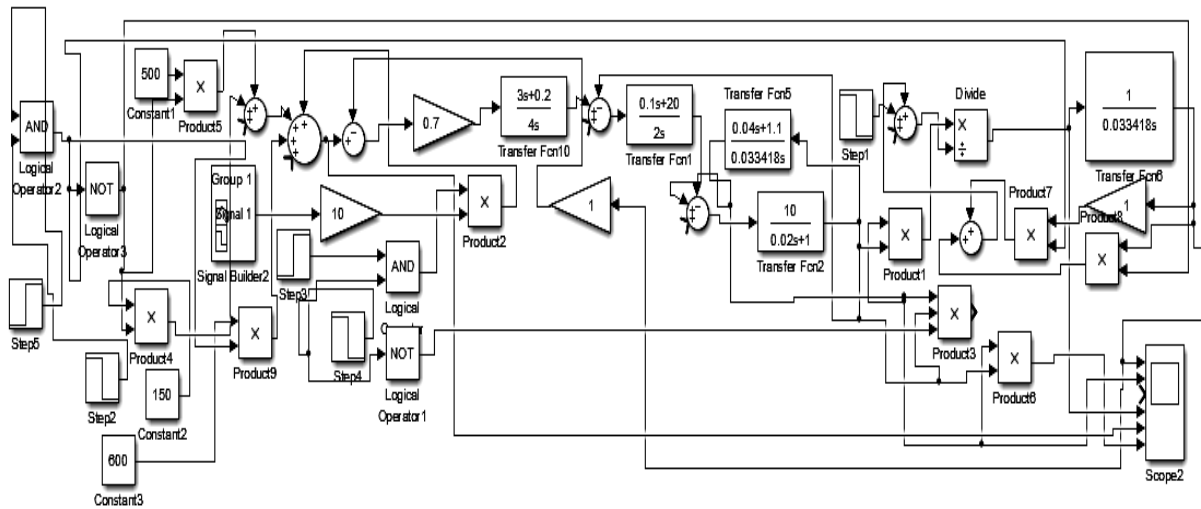


Рис. 3. Модель ДС/ДС преобразователя для емкостного накопителя

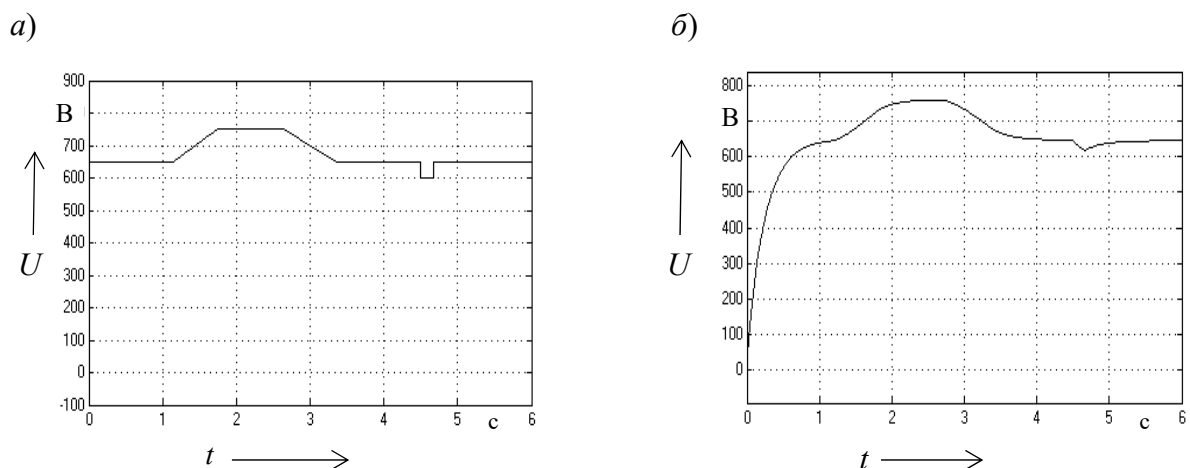


Рис. 4. Задаваемое напряжение на шине постоянного тока (а) и напряжение на конденсаторе накопителя (б)

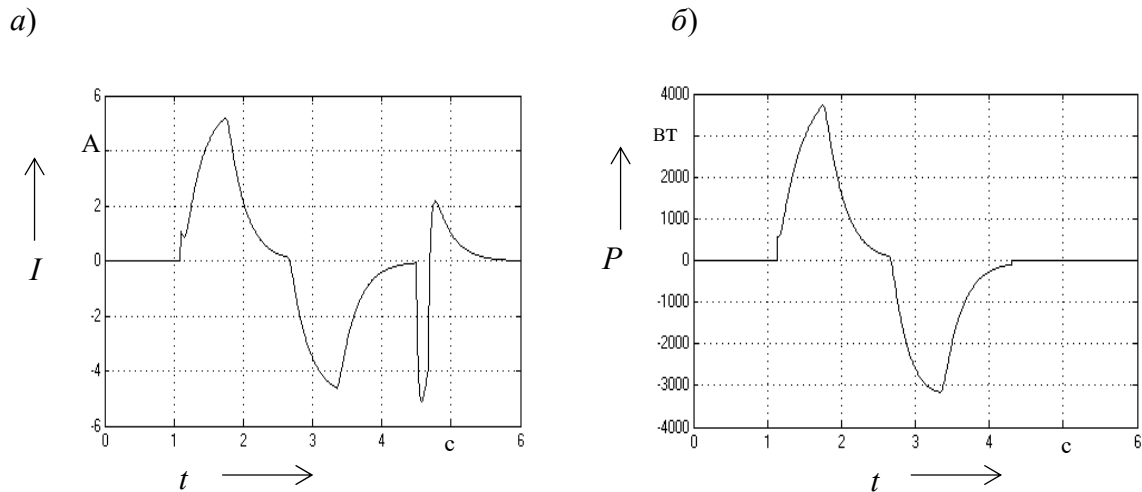


Рис. 5. Ток конденсатора накопителя (а) и мощность накопителя в рекуперативном и двигательном режимах работы (б)

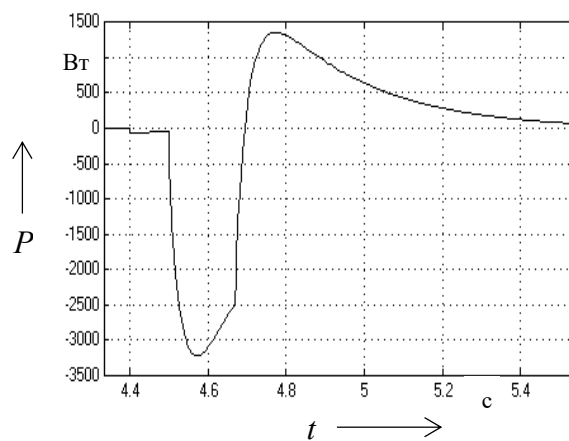


Рис. 6. Мощность, отдаваемая накопителем в режиме микроотключения

Используя графики на рис. 5 и 6, можно определить значения энергии, накапливаемой и отдаваемой накопителем. Энергия, накапливаемая в рекуперативном режиме и отдаваемая в следующем двигательном режиме, равна 2484,8 Дж. Энергия, используемая в режиме нарушения питания (при диапазоне изменения напряжения конденсатора накопителя от 646 до 619 В), равна 418 Дж.

Таким образом, используемая методика расчета емкости накопителя на базе преобразователя ДС/ДС позволяет определить емкость суперконденсатора,

необходимую для накопления и последующего использования рекуперированной энергии в безредукторных приводах лифтов в режимах работы, в которых двигатель работает генератором. Максимальное значение этой энергии в общем случае соответствует максимальному времени работы двигателя при номинальной мощности в рекуперативном режиме. Это поездка с первого на максимальный этаж пустой кабины или, наоборот, спуск грузовой кабины с максимального этажа на первый.

Используемая методика расчета позволяет также определить промежу-

точное значение напряжения конденсатора и величину емкости конденсатора, позволяющих сохранить работоспособность электропривода при кратковременных нарушениях питания и микроотключениях питающей сети, и может быть использована в расчетах для обеспечения в этом случае движения кабины лифта в пределах межэтажного расстояния до ближайшего этажа.

Выводы

Используемая методика расчета емкости суперконденсатора накопителя на базе повышающе-понижающего пре-

образователя постоянного тока ДС/ДС позволяет определить емкость суперконденсатора, необходимую для накопления и последующего использования рекуперированной энергии в безредукторных приводах лифтов. Возможно также определение промежуточного значения напряжения конденсатора или величины его емкости, позволяющих сохранить работоспособность электропривода при микроотключениях или кратковременных нарушениях питающей сети и, в последнем случае, для обеспечения движения кабины лифта в пределах межэтажного расстояния до ближайшего этажа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль, А. С. Моделирование двигательных и генераторных режимов работы безредукторного электропривода пассажирского лифта на базе СДПМ / А. С. Коваль, В. А. Яшин, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 1. – С. 86–93.
2. Коваль, А. С. Модель в среде МАТЛАБ накопителя энергии на базе суперконденсатора и двухуровневого повышающе-понижающего преобразователя ДС/ДС / А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 2. – С. 106–113.
3. Поливанов, К. М. Теоретические основы электротехники / К. М. Поливанов. – Москва: Энергия, 1972. – Т. 1. – 240 с.

Статья сдана в редакцию 12 октября 2020 года

Александр Сергеевич Коваль, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Алексей Григорьевич Кондратенко, аспирант, Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Sergeyevich Koval, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Aleksey Grigoryevich Kondratenko, PhD student, Belarusian-Russian University.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 628.984

Т. Н. Савкова

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

UDC 628.984

T. N. Savkova

AUTOMATED CALCULATION OF THE RESIDUAL LIFE OF LED LIGHTING UNITS

Аннотация

Рассмотрено решение задачи расчета остаточного ресурса светодиодных осветительных установок. На основании представленной структурной схемы тепловых процессов составлена система дифференциальных уравнений тепловых процессов в светодиодной осветительной установке. Разработаны тепловые схемы замещения для стационарного и нестационарного режимов работы. На основании решения системы дифференциальных уравнений для стационарного теплового режима методом эквивалентных преобразований получено выражение для суммарного теплового сопротивления осветительной установки и температуры $p-n$ -перехода светодиода. Получена формула для расчёта остаточного ресурса светодиодной осветительной установки. Для двух режимов работы осветительной установки представлен расчёт остаточного ресурса.

Ключевые слова:

светодиод, светодиодная осветительная установка, остаточный ресурс, тепловое сопротивление, температура $p-n$ -перехода.

Abstract

The solution to the problem of calculating the residual life of LED lighting units is considered. Based on the presented block diagram of thermal processes, a system of differential equations of thermal processes in a LED lighting unit has been obtained. Thermal equivalent circuits for stationary and non-stationary operating modes have been developed. The solution of the system of differential equations for the stationary thermal mode by using the method of equivalent transformations allows deriving an expression for the total thermal resistance of the lighting unit and the temperature of $p-n$ -junction in the LED. The formula has been obtained to calculate the residual life of the LED lighting unit. The calculation of the residual life for two operating modes of the lighting unit is presented.

Keywords:

light-emitting diode, light-emitting diode lighting unit, residual life, thermal resistance, temperature of $p-n$ -junction.

Современные автоматические системы управления освещением выполняют следующие функции [1–3]:

– обеспечение коммуникаций, надежной связи между отдельными

устройствами, объединенными в единую систему;

– плавное адресное регулирование интенсивности света и, как следствие, уровня освещенности;

- реагирование на присутствие людей в помещении, где осветительные приборы подключены к автоматической системе управления освещением;

- поддержание заданного уровня освещенности;

- учет интенсивности естественного освещения;

- возможность управлять отдельными группами осветительных приборов, в зависимости от параметров предварительно установленного светового сценария;

- включение, выключение, корректировка интенсивности света по расписанию, в зависимости от дня недели и времени суток;

- возможность интеграции с системой «умный» дом или город.

Срок службы светодиодных осветительных установок не является статической величиной, зависимой от условий эксплуатации, и определяется температурным режимом p - n -перехода кристалла светодиодов (СД). Температура p - n -перехода кристалла является основным фактором, определяющим скорость

выхода из строя светодиодных осветительных установок. При оценке срока службы светодиодов момент выхода из строя определяется как снижение светового потока или яркости ниже определенного порога (25, 30 или 50 % – в зависимости от того, что понимает под окончанием срока службы каждый конкретный производитель) [4–6].

Методики определения срока службы светодиодов изложены в стандартах: ОСТ11-336.938–83 *Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность* – российском, LM-80, TM-21 – зарубежных (США) [7].

Согласно методике [8] ускоренные испытания для определения срока службы светодиодов предусматривают форсирование, приводящее к интенсификации физико-химических процессов качественного изменения СД без изменения основных механизмов отказов. Коэффициент форсирования ускоренных операций K_y определяется энергией активации отказов по выражению [8]

$$K_y = \exp \left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{p-n} + 273} \right) - \left(\frac{1}{T_{p-ny} + 273} \right) \right],$$

где E_a – энергия активации отказов, эВ; k – постоянная Больцмана; T_{p-n} – температура p - n -перехода в нормальных условиях эксплуатации (в рабочем режиме), °С; T_{p-ny} – температура p - n -перехода в ускоренном режиме испытаний, °С.

Номинальное время наработки $T_{ном}$ (срок службы СД) определяют по выражению

$$T_{ном} = t_y \cdot K_y,$$

где t_y – время испытаний в ускоренном режиме.

Значение времени наработки в ускоренном режиме не должно быть меньше 1000 ч.

В известных источниках нет никакой конкретной информации об автоматизации расчета остаточного ресурса светодиодных осветительных установок, применяющихся для наружного или внутреннего стационарного освещения.

В данной статье предлагается разработанная математическая модель тепловых процессов в светодиодной осветительной установке для оценки остаточного ресурса светодиодных осветительных установок.

Расчет теплового сопротивления светодиода. Расчет срока службы СД в осветительном устройстве выполним в соответствии с законом Аррениуса:

$$E(t)_i = A \cdot e^{-B \cdot T_{ji}}, \quad (1)$$

где A и B – коэффициенты, характеризующие скорость теплового износа светодиода; T_{ji} – температура p – n –перехода СД для i -го режима расчета.

Эта формула будет использована ниже в алгоритме расчета остаточного ресурса СД, где главным параметром, влияющим на остаточный срок службы СД, является температура p – n –перехода T_j .

Расчет температуры p – n –перехода наиболее нагретой точки СД. Для того чтобы определить величину T_j , необходимо знать три основных параметра:

1) суммарные потери активной мощности в светодиоде P_Σ , Вт;

2) полное тепловое сопротивление светодиодной установки R_Σ , °C/Вт;

3) температура окружающей среды T_a , °C.

Основная сложность заключается в определении теплового сопротивления светодиодной осветительной установки R_Σ . Для его расчета разработана тепловая схема замещения светодиодной осветительной установки по аналогии с методом однородных тел, рассмотренным в [9, 10], когда изучаемый объект разбивается на относительно небольшое количество элементов с заданными тепловыми характеристиками. Структурная схема тепловых процессов светодиодной осветительной установки представлена на рис. 1.

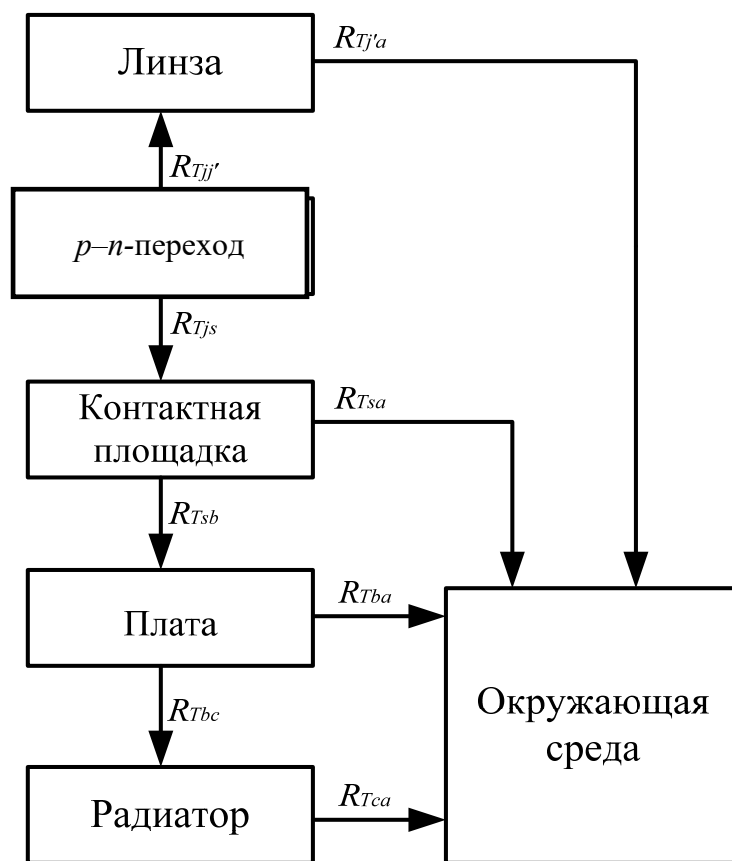


Рис. 1. Структурная схема тепловых процессов светодиодной осветительной установки

В приведенной на рис. 1 схеме каждый структурный элемент светодиодной осветительной установки представлен как тепловое однородное тело: линза, p - n -переход СД, контактная площадка, плата, радиатор, окружающая среда. Обозначим сопротивления между ними: $R_{Tjj'}$ – тепловое сопротивление «линза – p - n -переход»; $R_{Tj'a}$ – тепловое сопротивление «линза – окружающая среда»; R_{Tjs} – тепловое сопротивление « p - n -переход – контактная площадка»; R_{Tsa} – тепловое сопротивление «контактная площадка – окружающая среда»; R_{Tsb} – тепловое сопротивление «контактная площадка – плата»; R_{Tba} – тепловое сопротивление «плата – окружающая среда»; R_{Tbc} – тепловое сопротивление «плата – радиатор»; R_{Tca} – тепловое сопротивление «радиатор – окружающая среда».

На основании предложенной структурной схемы составлена система дифференциальных уравнений тепловых процессов для светодиодной осветительной установки:

$$\begin{cases} C_j \frac{dT_j}{dt} + \frac{T_j - T_s}{R_{Tjs}} + \frac{T_j - T_{j'}}{R_{Tjj'} + R_{Tj'a}} = P_{\Sigma}; \\ C_s \frac{dT_s}{dt} + \frac{T_j - T_s}{R_{Tjs}} + \frac{T_s - T_a}{R_{Tsa}} + \frac{T_s - T_b}{R_{Tsb}} = 0; \\ C_b \frac{dT_b}{dt} + \frac{T_s - T_b}{R_{Tsb}} + \frac{T_b - T_c}{R_{Tbc}} + \frac{T_b - T_a}{R_{Tba}} = 0; \\ C_c \frac{dT_c}{dt} + \frac{T_b - T_c}{R_{Tbc}} + \frac{T_c - T_a}{R_{Tca}} = 0; \\ C_{j'} \frac{dT_{j'}}{dt} + \frac{T_j - T_{j'}}{R_{Tjj'}} + \frac{T_{j'} - T_a}{R_{Tj'a}} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $C_j \dots C_{j'}$ – теплоёмкости соответствующих однородных тел: линзы, p - n -перехода СД, контактной площадки, платы, радиатора, окружающей среды соответственно, Вт·с/°С; $T_j \dots T_c$ – температуры соответствующих однородных тел, °С; $R_{Tjj'} \dots R_{Tca}$ – тепловые сопротивления соответствующих однородных

тел, °С/Вт; P_{Σ} – суммарные потери активной мощности в СД, Вт.

Температура внешней окружающей среды T_a определяется в результате измерений.

На основе системы дифференциальных уравнений составлена тепловая схема замещения светодиодной осветительной установки, переходные процессы в которой полностью идентичны нестационарным тепловым процессам.

Тепловая схема замещения светодиодной осветительной установки позволяет вести расчеты методами, применяемыми в электротехнике (рис. 2).

Основными частями светодиодной осветительной установки являются: корпус; радиатор, с закреплённым на нём СД; блок управления, соединённый с СД и датчиками температуры, установленными на корпусе установки, радиаторе, на излучающей поверхности, печатной плате и на корпусе СД [8].

В приведенной на рис. 2, а схеме потери мощности в первом однородном теле представлены в виде источника тока, а температура окружающей среды – в виде источника ЭДС.

Будем рассматривать стационарные тепловые режимы светодиодной осветительной установки (см. рис. 2, б). В этом случае все производные в системе уравнений (2) будут равны нулю. После ее преобразований получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{T_j - T_s}{R_{Tjs}} + \frac{T_j - T_{j'}}{R_{Tjj'} + R_{Tj'a}} = P_{\Sigma}; \\ \frac{T_j - T_s}{R_{Tjs}} + \frac{T_s - T_a}{R_{Tsa}} + \frac{T_s - T_b}{R_{Tsb}} = 0; \\ \frac{T_s - T_b}{R_{Tsb}} + \frac{T_b - T_c}{R_{Tbc}} + \frac{T_b - T_a}{R_{Tba}} = 0; \\ \frac{T_b - T_c}{R_{Tbc}} + \frac{T_c - T_a}{R_{Tca}} = 0; \\ \frac{T_j - T_{j'}}{R_{Tjj'}} + \frac{T_{j'} - T_a}{R_{Tj'a}} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

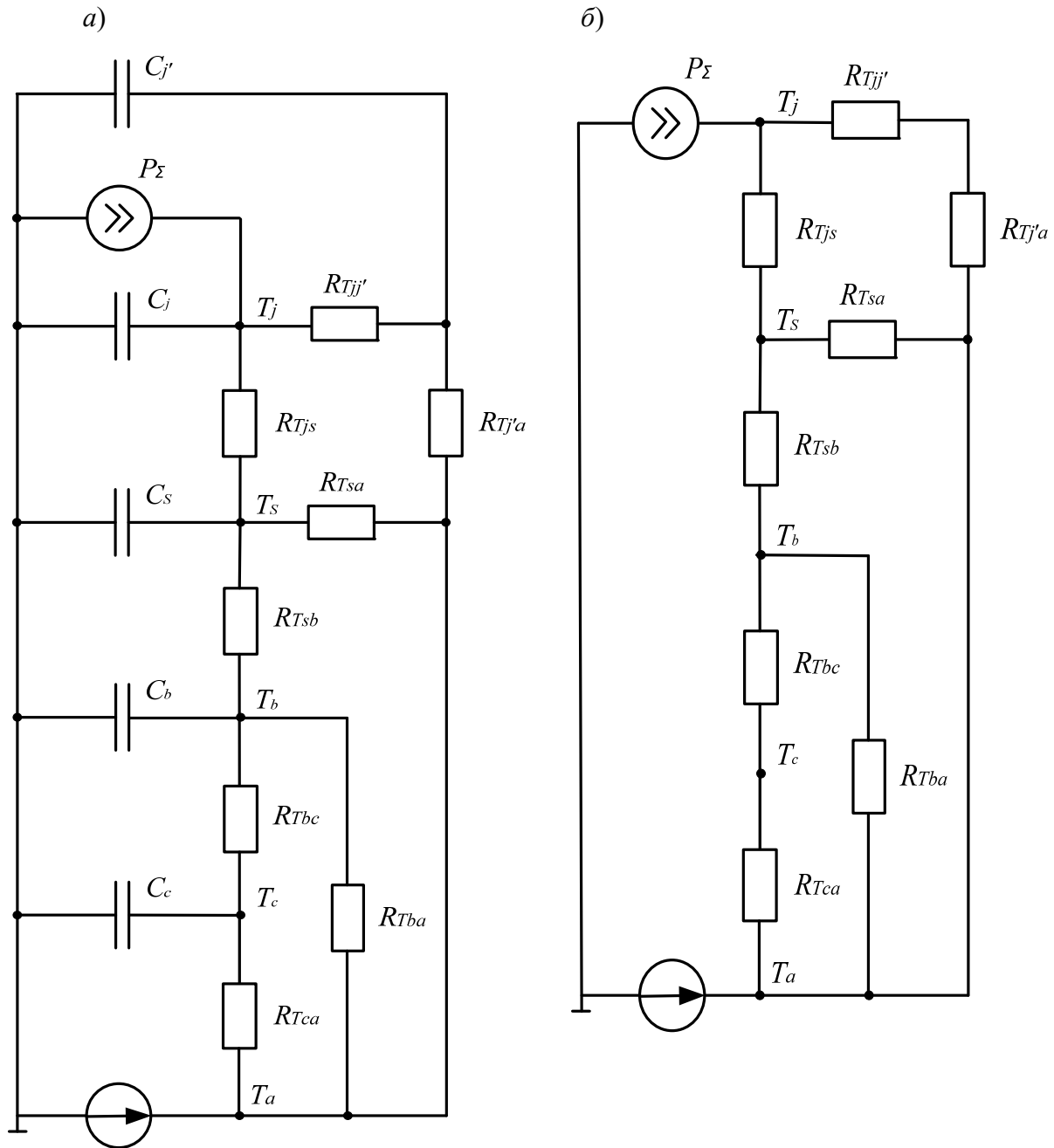


Рис. 2. Тепловая схема замещения светодиодной осветительной установки: а – схема для нестационарных тепловых режимов; б – схема для стационарных тепловых режимов

Воспользовавшись методом эквивалентных преобразований, запишем выражение для определения суммарного теплового сопротивления R_{Σ} :

$$R_{\Sigma} = \frac{A \cdot R_{Tba} + B \cdot R_{Tsb} \cdot R_{Tsa} + B \cdot D \cdot K \cdot R_{Tjs}}{A \cdot R_{Tba} + B \cdot R_{Tsb} \cdot R_{Tsa} + A \cdot D \cdot G}, \quad (4)$$

где для упрощения записи были введены следующие замены:

$$A = R_{Tca} + R_{Tbc};$$

$$B = R_{Tca} + R_{Tbc} + R_{Tba};$$

$$K = R_{Tjj'} + R_{Tj'a};$$

$$G = R_{Tca} + R_{Tbc} + R_{Tba} + R_{Tsb} + R_{Tsa};$$

$$D = R_{Tca} + R_{Tbc} + R_{Tba} + R_{Tsb} + R_{Tsa}.$$

Тогда температура p - n -перехода светодиодной осветительной установки определим по выражению

$$T_j = P_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} + T_a. \quad (5)$$

Расчет остаточного ресурса. Для того чтобы спрогнозировать остаточный ресурс светодиодной осветительной установки, используем коэффициент оптического и теплового износа f_i , который находится по выражению

$$f_i = \frac{E(t)}{E_{\text{норм}}}, \quad (6)$$

где $E_{\text{норм}}$ – нормированное значение срока службы светодиода.

Тогда время выработки светодиодной осветительной установки за период дискретизации Δt равно

$$E_{\text{выпр}} = \frac{\Delta t}{f_i}. \quad (7)$$

Остаточный ресурс определяем по выражению

$$E_{\text{ост}i} = \Delta t - E_{\text{выпр}i}. \quad (8)$$

Тогда формула для расчета остаточного ресурса светодиодной осветительной установки будет иметь окончательное выражение:

$$\begin{aligned} E_{\text{ост}} &= E_{\text{норм}} - \sum_i E_{\text{ост}i} = \\ &= E_{\text{норм}} - \sum_i (\Delta t - E_{\text{выпр}i}). \end{aligned} \quad (9)$$

Пример расчета. Для определения остаточного ресурса светодиодной осветительной установки из системы уравнений

$$\begin{cases} E_1 = A \cdot e^{-B \cdot T_1}; \\ E_2 = A \cdot e^{-B \cdot T_2} \end{cases}$$

находим коэффициенты A и B , характеризующие скорость теплового износа. Для значений $E_1 = 250\,000$ ч и $E_2 = 75\,000$ ч – срока службы СД по уровню снижения светового потока на 50 % при температурах p - n -перехода кристалла СД $T_1 = 61$ °C и $T_2 = 84$ °C [6] получим $A = 2777733,09$ ч и $B = 0,0429$ 1/°C.

Воспользовавшись расчётами мощности тепловых потерь – 0,67 и 1,65 Вт, температуры p - n -перехода кристалла СД – 85 и 149 °C и теплового сопротивления p - n -переход кристалла – окружающая среда (84 и 73 °C/Вт) для токов $I_1 = 0,35$ А и $I_2 = 0,7$ А для СД ARPL-3W6000 [11], определяем значения остаточного ресурса светодиодной осветительной установки (табл. 1). Из таблицы видно, что рассчитанные режимы работы светодиодного осветительного устройства подтверждают гарантированный срок службы, равный 50000 ч.

Для автоматизации определения остаточного ресурса в светодиодном осветительном устройстве устанавливается датчик температуры окружающей среды и микроконтроллер для контроля тока и напряжения.

Для передачи данных в компьютер микроконтроллер можно оснастить беспроводным интерфейсом связи, например, Wi-Fi.

Табл. 1. Результаты расчета остаточного ресурса светодиодной осветительной установки

Время t , ч	Остаточный ресурс, ч	
	$E_{ост1}$ при $I_1 = 0,35$ А и $T_{j1} = 85$ °С	$E_{ост2}$ при $I_2 = 0,7$ А и $T_{j2} = 149$ °С
5000	45002,33	45000,15
10000	40004,66	40000,3
15000	35006,98	35000,45
20000	30009,31	30000,59
25000	25011,64	25000,74
30000	20013,97	20000,89
35000	15016,29	15001,04
40000	10018,62	10001,19
45000	5020,95	5001,33
50000	23,27	1,48

Заключение

1. Разработана модель теплового режима работы светодиодной осветительной установки по аналогии с методом однородных тел.

2. Получены выражения для определения теплового сопротивления и

температуры p – n -перехода СД.

3. Проведен расчет остаточного ресурса светодиодной осветительной установки на основе СД ARPL-3W6000 для двух режимов работы с учетом коэффициента оптического и теплового износа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гужов, С. В.** Перспективы использования светодиодных светильников [Электронный ресурс] / С. В. Гужов // Энергосбережение. – 2013. – № 1. – Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5444. – Дата доступа: 29.06.2020.
2. **Писарук, Т. В.** Системы автоматического управления освещением зданий [Электронный ресурс] / Т. В. Писарук, В. Б. Козловская // Актуальные проблемы энергетики: материалы СНТК 70. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/13712/>. – Дата доступа: 29.06.2020.
3. **Игнатов, С.** Автоматизация систем освещения: тенденции и прогнозы [Электронный ресурс] / С. Игнатов. – Режим доступа: <https://marketelectro.ru/content/avtomatizaciya-sistem-osveshcheniya-tendencii-i-prognozy>. – Дата доступа: 29.06.2020.
4. **ГОСТ Р 54814–2018.** Светодиоды и светодиодные модули для общего освещения и связанное с ними оборудование. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Москва: Стандартинформ, 2018. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200160560>. – Дата доступа: 29.06.2020.
5. **ГОСТ Р 54815–2011/IEC/PAS 62612:2009.** Лампы светодиодные со встроенным устройством управления для общего освещения на напряжения свыше 50 В [Электронный ресурс]. – Москва: Стандартинформ, 2012. – Режим доступа: 1200095085.pdf. – Дата доступа: 29.06.2020.
6. Факторы срока службы светодиодов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vdmais.ua/news/factory-sroka-sluzhby-svetodiodov/>. – Дата доступа: 30.06.2020.
7. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов [Электронный ресурс] / В. С. Солдаткин [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 (37). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sroka-sluzhby-svetodiodnyh-izluchayuschih-elementov>. – Дата доступа: 30.06.2020.
8. **ОСТ 11-336.938–83.** Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lbm.ru/techdocs/kgs/ost/1065/info/23239/>. – Дата доступа: 30.06.2020.

9. **Зализный, Д. И.** Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. – № 5.

10. **Широков, О. Г.** Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств [Электронный ресурс] / О. Г. Широков, Д. И. Зализный // Наукоемкие технологии. – 2008. – № 2. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/13202>. – Дата доступа: 29.06.2020.

11. Калориметрический способ определения температуры активной области мощных светодиодов / Т. Н. Савкова [и др.] // Датский научный журнал. – 2018. – № 18. – С. 32–36.

Статья сдана в редакцию 23 сентября 2020 года

Татьяна Николаевна Савкова, магистр техн. наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: +375-447-03-90-47.

Tatiana Nikolayevna Savkova, MSc (Engineering), Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: +375-447-03-90-47.

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 691.32

С. Д. Семенюк, И. И. Мельянцова

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ УСАДКИ КОНСТРУКЦИОННОГО КЕРАМЗИТОЖЕЛЕЗОБЕТОНА

UDC 691.32

S. D. Semeniuk, I. I. Melyantsova

RESEARCH INTO SHRINKAGE DEFORMATIONS OF STRUCTURAL EXPANDED CLAY CONCRETE

Аннотация

В статье исследованы основные механизмы возникновения объемных деформаций усадки в бетонах, а также факторы, оказывающие влияние на усадочные деформации. Показаны эмпирические зависимости для описания процесса усадки во времени. Предложены варианты подготовки экспериментальных образцов для исследования усадочных деформаций в конструкционном керамзитожелезобетоне.

Ключевые слова:

керамзитобетон, усадка, набухание, объемные деформации.

Abstract

The article examines the main mechanisms of bulk shrinkage deformations in concrete, as well as factors that influence shrinkage deformations. Empirical relationships for describing the shrinkage process over time are shown. Options for preparing experimental samples to study shrinkage deformations in structural expanded clay-reinforced concrete are proposed.

Keywords:

expanded clay concrete, shrinkage, bulking, volume deformations.

Введение

Проведенные многочисленными авторами исследования деформаций усадки тяжелого бетона показали, что от данных деформаций в элементах зданий и сооружений могут возникать значительные сжимающие напряжения. Учет этих дополнительных напряжений, возникающих в конструкциях, позволил бы уточнить методики расчета конструкций, в частности из керамзитожеле-

зобетона. Можно сказать, что явление усадки в легких бетонах на сегодняшний день исследованы недостаточно полно как теоретически, так и экспериментально.

При проектировании бетонных конструкций обычная проблема усадки заключается в том, чтобы не допустить чрезмерного ее увеличения. Избыточная усадка может привести к образованию трещин достаточной величины, чтобы разрушить внешний вид бетона или допу-

стит попадание воды в конструкцию, что может привести к коррозии арматуры.

Усадочные деформации являются важными показателями для железобетона, т. к. они влияют на сцепление бетона с арматурой.

Целью данных исследований является разработка новых представлений о процессах деформирования легких бетонов, а также определить, обеспечивает ли усадка достаточное напряжение сжатия в стали для обоснования снижения требований к растяжению. Результаты, полученные в ходе исследования, необходимы при прогнозировании работы керамзитожелезобетонных конструкций.

Анализ опубликованных работ по исследованию деформаций усадки в Республике Беларусь и за рубежом

А. Е. Шейкиным предложена структурная теория усадки. По его мнению, усадочные деформации цементного камня выражены тем слабее, чем меньше в его структуре гелевидных составляющих и больше кристаллического сростка (влияние химико-минералогического состава). Принято считать, что усадка цементного камня тем больше, чем выше дисперсность цемента. Однако рядом исследований было показано, что в длительные сроки твердения показатели усадки обычно выравниваются.

Значительное влияние на усадку оказывает водоцементный фактор, а именно: с увеличением последнего усадка возрастает и наблюдается более замедленный процесс затухания усадочных деформаций. Температурно-влажностные условия среды существенно влияют на значение конечной усадки цементного камня. Усадка пропаренных образцов в среднем на 30...40 % ниже усадки бетонов естественного твердения. При автоклавной обработке снижение усадки бетона может быть более существенным.

Сдерживающее влияние на усадку цементного камня оказывает заполнитель

в бетоне. Оно проявляется тем сильнее, чем выше его модуль упругости.

С. В. Александровский полагает, что удаление капиллярной и адсорбционной влаги сопровождается значительным сжатием цементного камня, а составляющие этой усадки представляют в сумме так называемую влажностную усадку.

Исходя из морфологии новообразований цементного камня, необходимо отметить, что с увеличением дисперсности частиц новообразований значительно возрастает поверхность раздела твердой и жидкой фаз в цементном камне. Это приводит к увеличению адсорбционно связанной воды поверхностью частиц, к ослаблению сил физического порядка между ними, к снижению прочности цементного камня и увеличению его ползучести.

По-видимому, для легких бетонов на пористых заполнителях, которые отличаются от обычных повышенной деформативностью, рационально создавать такие условия твердения, которые способствуют возникновению более «огрубелой» структуры цементного камня.

Ю. А. Нилендер, изучая изменение объемных деформаций бетона от контракции, назвал их «собственно усадкой». Хотя абсолютная величина «собственно усадки» или химической усадки невелика, однако в изделиях с большим расходом цемента она может привести к значительным напряжениям и деформациям цементного камня.

Самопроизвольные влажностные деформации усадки и набухания цементного камня являются одной из основных причин появления в нем «собственных» напряжений. Особенно велики напряжения от усадки, которые становятся иногда выше предела его прочности на растяжение и вызывают образование микро- и макротрещин.

На усадку цементного камня и бетона влияют многие факторы: вид цемента, состав бетона, вид заполнителя,

условия приготовления, массивность элемента, температурно-влажностные условия среды и др.

До настоящего времени пока еще нет общепринятой интерпретации влажностной усадки цементного камня.

С. В. Александровский, А. В. Белов, В. В. Михайлов, Н. А. Мощанский, Ю. А. Нилендер, З. Н. Цилосани, А. Е. Шейкин, Э. Фрейсине, Т. Пауэрс, Г. Карлушек, Р. Лермит, В. Чернин и др. по-разному объясняют физическую природу рассматриваемых деформаций усадки и набухания.

Ряд исследователей считает основной причиной усадки цементного камня капиллярные явления. Эта гипотеза предложена Э. Фрейсине.

Анализируя многочисленные работы, можно проследить достаточно четко проявляющуюся закономерность. Сущность ее заключается в том, что по мере раздвижки зерен крупного заполнителя их прочность оказывает все меньшее влияние на прочность бетона.

Логичность этой закономерности вполне очевидна, поскольку при малых расходах цемента и минимальной толщине обоймы бетон представляет собой каркас из заполнителя, пустоты которого заполнены цементным раствором. При такой структуре прочность запол-

нителя играет важную роль – она должна существенно превышать требуемую марку бетона.

По мере повышения расхода цемента и увеличения количества раствора (очень жирные, малопесочные растворы имеют свои недостатки), каркас заполнителя как таковой перестает существовать, структуру бетона можно характеризовать «плавающим» заполнителем – по терминологии И. М. Френкеля, и доминирующая роль в этом случае переходит к прочности раствора и его сцеплению с заполнителем.

К такой категории относятся конструктивные легкие бетоны и бетоны на малопрочных известняковых заполнителях. Следует полагать, что названные бетоны имеют высокую величину прочности за счет перераспределения функций между заполнителем и раствором. Именно высокопрочный раствор начинает выполнять функции каркаса (обоймы) и за счет повышенных сил сцепления с заполнителем обеспечивает монолитность конгломерата.

Усадка происходит, когда влажность окружающей среды меньше влажности бетона. Одним из негативных последствий усадки является появление трещин (рис. 1).

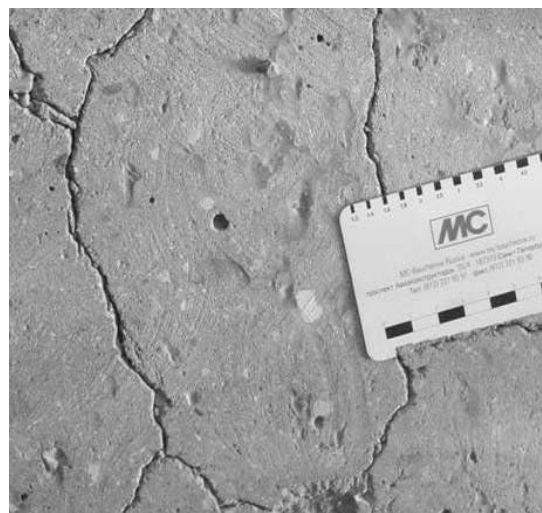
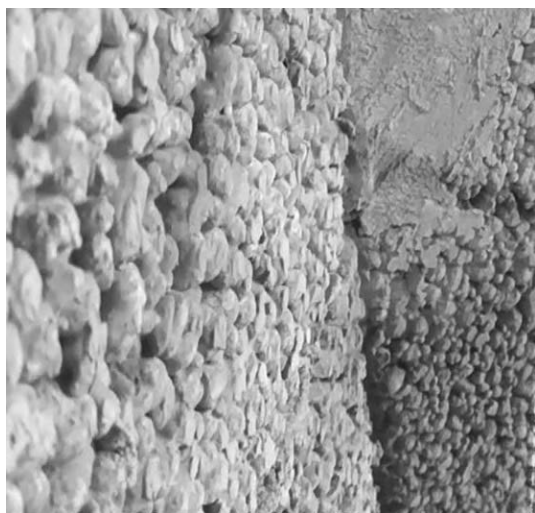


Рис. 1. Усадочные трещины

Способность заполнителя к сопротивлению деформациям может оказать существенное влияние на уменьшение усадки, т. е. чем выше их модуль упругости, тем меньшие будут деформации. Различные гидравлические добавки и ускорители твердения (хлористый кальций), как правило, увеличивают усадку.

Обычно усадка наиболее интенсивно происходит в начальный период твердения и в течение первого года, в последующем постепенно затухает. Также скорость усадки напрямую зависит от влажности окружающей среды твердения бетона – чем меньше влажность, тем больше усадочные деформации и выше скорость их роста. Усадка бетона под нагрузкой при длительном сжатии ускоряется, а при длительном растяжении, наоборот, замедляется.

В. И. Мурашев в своих исследованиях говорит о том, что в период твердения бетона усадке цементного камня препятствуют заполнители, которые выполняют роль внутренних связей и вызывают в цементном камне первоначальные растягивающие напряжения. Неравномерное высыхание бетона приводит к неравномерной его усадке, что приводит к возникновению начальных усадочных напряжений. Наружные поверхностные слои бетона высыхают быстрее и испытывают растяжение, в то время как внутренние, более влажные зоны, препятствующие усадке поверхностных слоев, оказываются сжатыми. Следствием таких растягивающих начальных напряжений являются усадочные трещины в теле бетона.

Начальные напряжения, возникающие при твердении бетона, не учитываются непосредственно в расчете прочности железобетонных конструкций, наличие их усиливается коэффициентом однородности бетона, охватывающего всю совокупность вопросов прочности, а также конструктивными мероприятиями в армировании железобетонных элементов.

Составляющие полной усадки для конструкций из керамзитожелезобетона

По сравнению с тяжелыми бетонами протекание усадки в легких бетонах имеет ряд особенностей. Изменение объема в легких бетонах проявляется более интенсивно под влиянием факторов увлажнения или высыхания. Поэтому полная усадка легких бетонов, чаще всего несколько больше (на 15...25 %) усадки равнопрочных тяжелых бетонов. В первые периоды твердения легких бетонов (3...40 ч) наблюдается увеличение объемов, вызванное тепловым расширением заземленного воздуха под влиянием экзотермической теплоты (с выделением). Вследствие этого в начальный период бетон набухает, а затем уменьшается в объеме, т. е. начинают проявляться усадочные деформации.

Контроль величины усадки может быть осуществлен путем правильного выбора материалов, дозирования и твердения. Теоретически можно устранить все усадки, но требования для этого не будут практичными. Усадка является важным показателем в случае железобетона, т. к. она влияет на сцепление бетона с арматурой, уменьшая тем самым возможность проскальзывания стержня.

Размер трещин, образующихся при усадке бетона, может быть уменьшен за счет применения арматуры. Количество используемого армирования может быть недостаточно для значительного уменьшения общей величины усадки, но приводит к образованию множества мелких трещин, а не нескольких крупных.

Стандартные железобетонные конструкции не учитывают предварительное сжатие арматуры и предполагают, что стержни начинают работать с нулевой нагрузки. Если существует предварительное сжатие определяемого и согласованного количества арматуры в бетоне, то данный способ проектиро-

вания требует избыточного количества растяжимой стали.

На основе статистического анализа опытных данных найдены формулы, позволяющие вычислить относительные деформации усадки ε_{sh} в зависимости от наиболее влияющих факторов – расхода воды и цемента.

Так, для керамзитобетона на кварцевом песке при естественном твердении при продолжительности процесса 100 сут используют формулу

$$\varepsilon_{sh}(100) = 6,7 \cdot 10^{-6} (B\sqrt{C})^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где B и C – расход воды, л, и цемента, кг, на 1 м^3 бетона.

Для описания процесса усадки во времени можно использовать формулу

$$\varepsilon_{sh}(t) = 4 \frac{t \varepsilon_{sh}(100)}{100 + 3t}, \quad (2)$$

где t – продолжительность процесса, сут.

Необходимо отметить, что в конструктивных легких бетонах модуль

упругости заполнителя обычно меньше модуля упругости цементного камня, поэтому напряжение в растворной части от усадки меньше напряжений в равнопрочном тяжелом бетоне. Одновременно усадка растворной части способна вызывать существенные напряжения в заполнителе.

В армированном элементе свободные усадка и ползучесть сдерживаются арматурой, которая играет роль внутренней связи, т. к. ее модуль упругости выше модуля упругости бетона. Вследствие этого деформации усадки и ползучести армированного бетона ниже, чем неармированного, причем, чем выше коэффициент армирования μ , тем больше его влияние.

Под влиянием разности деформаций свободной усадки бетонного элемента ε_{sl} и стесненной усадки армированного элемента $\varepsilon_{sl,s}$ (рис. 2) образуется средняя деформация бетона, порождающая в бетоне средние растягивающие напряжения.

$$\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{sl} - \varepsilon_{sl,s}. \quad (3)$$

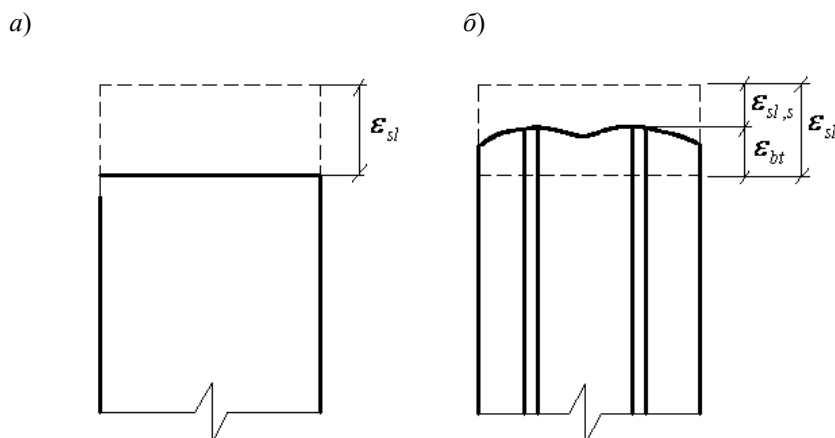


Рис. 2. Деформации усадки образцов: а – бетонного; б – железобетонного

Наибольшие значения этих напряжений находятся в зоне контакта с арматурой. Деформации $\varepsilon_{sl,s}$ являются для арматуры упругими, и в ней возникают

сжимающие напряжения.

Теоретически влияние армирования на процессе усадки получим, используя условие внутреннего равно-

весия в любой момент времени t

$$\sigma_{bt}(t) \cdot A_b = \sigma_s(t) \cdot A_s \quad (4)$$

и условие совместности деформаций

$$\varepsilon_{sl,s}(t) = \varepsilon_{sl}(t) - \varepsilon_{bt}(t), \quad (5)$$

где $\sigma_{bt}(t)$ – растягивающие напряжения в бетоне к моменту времени t ; $\sigma_s(t)$ – сжимающие напряжения в арматуре к моменту времени t ; A_b – площадь поперечного сечения бетона; $\varepsilon_{sl}(t)$ – деформации свободной усадки бетона к моменту времени t ; $\varepsilon_{sl,s}(t)$ – деформации сжатия в арматуре к моменту времени t ; $\varepsilon_{bt}(t)$ – деформации растяжения в бетоне к моменту времени t .

При расчетах применяют также эмпирические зависимости, основанные на экспериментальных данных. Так, для керамзитобетона используют формулу

$$\bar{\varepsilon}_{sl}(t) = 4t\varepsilon_{sl}(100) \frac{e^{-20\mu}}{100 + 3t}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{sl}(100)$ – свободная усадка бетона к моменту наблюдений (100 сут).

Исследования НИИСК Госстроя СССР, в частности А. Б. Голышева, о протекании усадки представлены ниже.

От особенностей бетона проявлять деформации усадки в значительной мере зависит его плотность в различных средах, а также прочность и сопротивление трещинообразованию.

Существенное значение имеет также капиллярное давление в порах цементного камня. При контакте жидкости, находящейся в порах, со стенками капилляров силы притяжения, которые действуют между молекул цементного скелета и жидкостью, заставляют ее подниматься по стенке капилляра, что приводит к искривлению поверхности жидкости – возникновению менисков. Это создает капиллярное давление,

которое оказывает сжимающее действие на стенки, ограничивающие жидкость.

Капиллярное давление в порах имеет довольно значительную величину и возрастает с уменьшением ее размеров. Поскольку микропоры в цементном камне расположены в разных направлениях, это давление взаимно уравнивается, действует как всестороннее сжатие, под влиянием которого также происходят объемные деформации.

Эти факторы усадки зависят от интенсивности испарения, которое определяется величиной влажностного перепада между бетоном и окружающей средой. Полная усадка цементного камня, высушенного до абсолютно сухого состояния, определяется только усадкой геля, поскольку усадка, вызываемая действием капиллярных сил, может полностью восстанавливать первоначальное положение.

В начальный период твердения усадке препятствуют заполнители, которые становятся внутренними связями и вызывают в цементном камне начальные напряжения растяжения. Влияние заполнителей на уменьшение усадки тем сильнее, чем больше их способность сопротивляться деформированию, т. е. чем больше их модуль упругости. По мере твердения геля кристаллические сростки, образующиеся в нем, становятся такого же рода связями.

Необходимо отметить, что эти взаимодействия происходят в грубо неоднородной среде при разной величине зерен заполнителя, разных упругих свойствах цементного камня и заполнителей при наличии в цементном камне пор, а в бетоне – полостей, вызванных дефектами уплотнения. Поэтому величина и направление начальных напряжений усадки имеют случайный характер и подчиняются только статистическим закономерностям. В любом случае начальные напряжения могут быть причиной микроразрушений в бетоне, при этом микротрещины образуются преимущественно на поверхностях сцепле-

ния заполнителей с цементным камнем. Ко всему вышесказанному следует добавить неравномерное высыхание бетона по объему, которое приводит к возникновению начальных усадочных напряжений. Открытые поверхностные слои бетона, которые быстро высыхают, подвержены растяжению, тогда как внутренние, более влажные зоны, препятствующие усадке поверхностных слоев, подвержены сжатию. Последствием таких напряжений растяжения в еще непрочном бетоне являются поверхностные трещины.

Усадка бетона зависит от ряда факторов, основные из них: количество и вид цемента, количество воды, крупность и вид заполнителя.

Усадка наиболее интенсивно проявляется в начальный период твердения бетона и в течение первого года. По мере высыхания бетона уменьшается влажностный градиент, растущие кристаллические сростки создают в дальнейшем большее сопротивление внутреннему давлению, деформации усадки постепенно исчезают.

Для аналитического выражения усадки бетона удобно пользоваться эмпирической формулой

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh,lim} (1 - e^{-\lambda_{sh} \cdot t}), \quad (7)$$

где $\varepsilon_{sh,lim}$ – граничные деформации усадки (при $t = \infty$); λ_{sh} – опытный параметр, характеризующий скорость усадки, сут⁻¹; t – время, сут.

Определяют граничные значения относительных деформаций усадки по зависимости

$$\varepsilon_{sh,lim} = \varepsilon_{shm} \xi_1 \xi_2 \xi_3, \quad (8)$$

где ε_{shm} – среднестатистическое значение $\varepsilon_{sh,lim}$ для условий, принятых за среднее для сечения образца 10×10 см (относительная влажность воздуха –

70 %, возраст, с которого начинается учет усадки, – 7 сут); ξ_1, ξ_2, ξ_3 – коэффициенты, учитывающие влияние отклонения реальных условий работы бетона от принятых средних: возраст бетона на начало высыхания, размеры образца, относительная влажность среды.

При наличии данных о дозировке составляющих

$$\varepsilon_{shm} = 0,14 \cdot 10^{-6} (w + a)^{\frac{3}{2}}, \quad (9)$$

где w и a – количество воды в замесе по объему и вместимость привлеченного воздуха в бетонной смеси, л/м³.

Наращение усадки, как и нарастание прочности бетона, происходит примерно пропорционально логарифму времени. При этом усадка распространяется от поверхности вглубь бетона, а не протекает равномерно по объему; у поверхности она наибольшая.

Наиболее удовлетворительное объяснение усадки дают две теории, сущность которых заключается в следующем.

По первой теории (структурной) явление усадки ставится в зависимость от физико-химических процессов, сопровождающихся схватыванием цементного теста и твердением цементного камня. При этом одной из главных причин служит то, что цементное тесто, представляющее собой вначале студнеобразную массу (гель), в результате испарения избыточной воды, а отчасти и поглощения воды зернами цемента, вступающими в реакцию, постепенно обезвоживается и уплотняется. К этому присоединяется еще и влияние процесса кристаллообразования; кристаллы пронизывают массу геля и, срастаясь между собой, создают твердый скелет (сросток) цементного камня. Совместное влияние этих процессов и вызывает в цементном камне объемные изменения, называемые усадкой.

По второй теории (Фрейсине) исходят из свойств капиллярности, считая,

что поверхностное натяжение менисков, образующихся в смоченных водой порах, приводит к стягиванию стенок пор, что в результате и вызывает сжатие цементного камня. Так как микропоры распределены по всей массе бетона более или менее равномерно в различных направлениях, то создаваемые капиллярными натяжениями давления взаимно уравниваются и производят как бы всестороннее сжатие бетона. В результате бетон получает объемную деформацию – усадку.

Следует отметить, что обе теории не исключают друг друга.

**Варианты подготовки
керамзитожелезобетонных образцов
к испытаниям для исследования
деформаций усадки**

Для исследований деформаций усадки предлагаются два варианта керамзитожелезобетонных образцов (рис. 3):

- 1) образец с переходными штуцерами;
- 2) образец с пластинами-«рыбками».

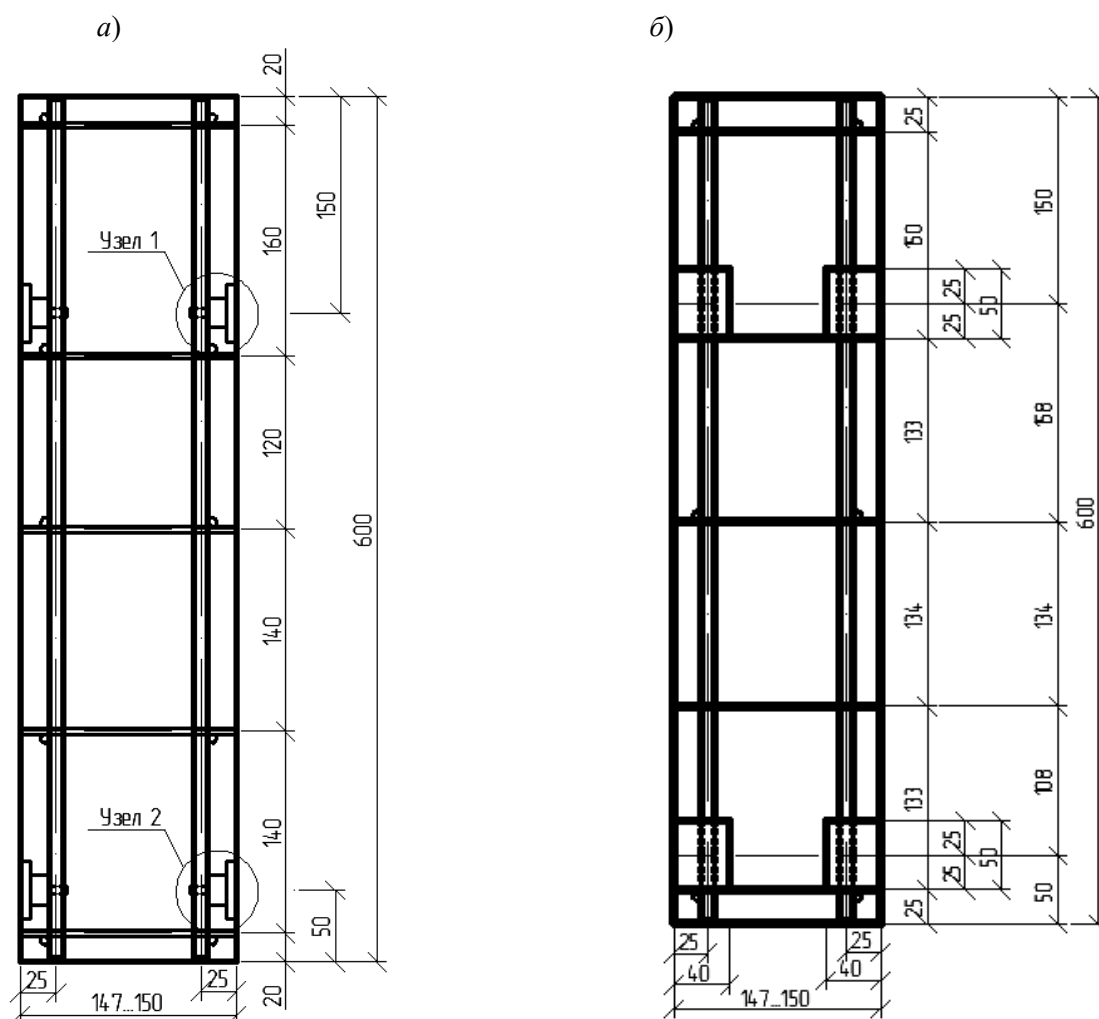


Рис. 3. Опытные образцы: а – с установленными переходными штуцерами; б – с «рыбками»

Для экспериментальных исследований усадочных деформаций армированного керамзитобетона используются

призмы размерами $150 \times 150 \times 600$ мм и индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 400 мм. В рабо-

чей арматуре выполняют отверстие диаметром 5 мм, в которое на клей вставляется штуцер. Для дополнительной надежности с внутренней стороны рабочая арматура и штуцер свариваются между собой.

Образец с «рыбками» выполняется размерами $150 \times 150 \times 600$ мм. Сначала, как и в первом случае, выполняется каркас из продольной и поперечной арматуры. Затем устанавливаются пластины-«рыбки» и привариваются к готовому каркасу. Полученный каркас заливается в форме.

Заключение

Деформации усадки являются важнейшей характеристикой любого вида бетона, учет ее особенно необходим при массовом производстве изделий и конструкций из него. Известно,

что у тяжелых бетонов усадка протекает лишь в цементной составляющей бетонной смеси. При этом крупный и мелкий заполнитель усадочных деформаций не претерпевает, лишь только препятствует проявлению усадочных явлений в цементном камне. В бетонах же на пористых заполнителях, в частности в керамзитобетонах, усадка может протекать не только в цементном камне, но и в гранулах заполнителя. Поэтому в таких бетонах процесс развития усадочных деформаций оказывается более сложным, чем в тяжелых бетонах.

Исследования объемных деформаций усадки позволяют провести анализ основных характеристик длительных свойств конструкционного керамзитожелезобетона, необходимых для учета в преднапряженных конструкциях зданий и сооружений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейкин, А. Е. К вопросу прочности, упругости и пластичности бетона / А. Е. Шейкин // Тр. МИИТ. – 1964. – Вып. 69. – С. 21–29.
2. Александровский, С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести) / С. В. Александровский. – Москва: Стройиздат, 1966. – 354 с.
3. ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250). Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1: Общие правила и правила для зданий. – Минск: Стройтехнорм, 2009. – 312 с.
4. Ахвердов, И. Н. О научных проблемах в области легких бетонов / И. Н. Ахвердов // Аглопорит и аглопоритобетон. – Минск, 1964. – С. 12–20.
5. Симонов, М. З. Основы технологии легких бетонов / М. З. Симонов. – Москва: Стройиздат, 1973. – 584 с.
6. Бужевич, Г. А. Исследование по крупнопористому бетону на пористых заполнителях / Г. А. Бужевич. – Москва: Госстройиздат, 1962. – 142 с.
7. Чеховский, Ю. В. Изменение пористой структуры и форм связи в цементном камне в процессе его твердения / Ю. В. Чеховский, В. А. Лейрих, В. М. Казанский // Коллоидный журнал. – 1965. – Т. 27, № 1. – С. 186–192.
8. Ахвердов, И. Н. Влияние фазовых превращений в процессе твердения цементного камня на его физико-механические и деформативные свойства / И. Н. Ахвердов // Структура, прочность и деформации бетонов. – Москва, 1966. – С. 122–138.
9. Пауэрс, Т. Физические свойства цементного теста и камня / Т. Пауэрс // IV Междунар. конгресс по химии цемента. – Москва: Стройиздат, 1964. – С. 119–131.
10. Френкель, И. М. Технологические основы и расчет состава бетона / И. М. Френкель. – Москва: Госстройиздат, 1961. – 127 с.
11. Семенюк, С. Д. Стесненная деформация усадки армированного керамзитобетона и ее определение / С. Д. Семенюк, И. И. Мельянцова, А. Б. Тимофеева // Проблемы современного строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2019 г. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 121–130.
12. Семенюк, С. Д. Исследование деформаций набухания керамзитобетона / С. Д. Семенюк, В. А. Ржевущая // Проблемы современного строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2019 г. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 130–137.

13. **Bazant, Z. P.** Drying creep of concrete: constitutive model and new experiments separating its mechanisms / Z. P. Bazant, Y. Xi. – 1994. – № 27 (1). – P. 3–14.
14. **Clarke, J. L.** Structural Lightweight Aggregate Concrete / J. L. Clarke // Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 2005. – 161 p.
15. **Мурашев, В. И.** Железобетонные конструкции. Общий курс / В. И. Мурашев, Э. Е. Сигалов, В. Н. Байков. – Москва: Гос. изд-во лит. по стр-ву, архитектуре и строит. материалам, 1962. – 659 с.
16. **Бабич, Е. М.** Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях / Е. М. Бабич. – Киев: Вища школа, 1988. – 207 с.

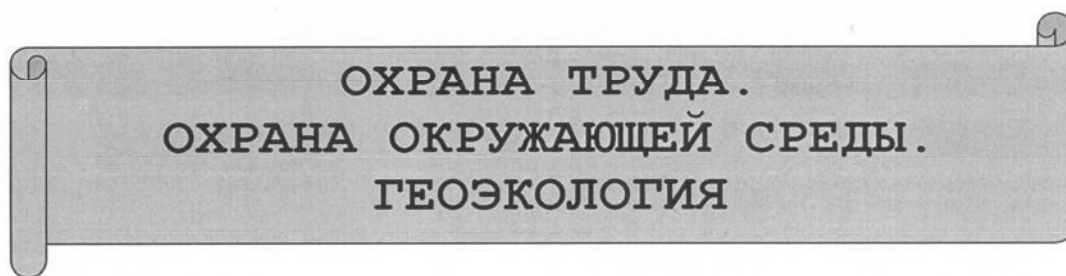
Статья сдана в редакцию 7 октября 2020 года

Славик Денисович Семенюк, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-43-38-72.

Ирина Игоревна Мельянцова, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-48-07-07.

Slavik Denisovich Semeniuk, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-43-38-72.

Iryna Igorevna Melyantsova, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-48-07-07.



УДК 331.46

Т. Н. Агеева, В. М. Пускова

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА В МОГИЛЕВСКОЙ ОБЛАСТИ

UDC 331.46

T. N. Aheyeva, V. M. Puskova

ANALYSIS OF THE DINAMICS OF INDUSTRIAL INJURIES IN THE MOGILEV REGION

Аннотация

Рассмотрена динамика производственного травматизма в Могилевской области в текущем десятилетии. Дана сравнительная оценка уровня производственного травматизма в различных сферах деятельности. Отмечена тенденция снижения числа несчастных случаев со смертельным исходом.

Ключевые слова:

производственный травматизм, предприятия, условия труда, несчастные случаи, смертельный исход, коэффициент частоты травматизма.

Abstract

The paper considers the dynamics of industrial injuries in the Mogilev region over the current decade. The comparative assessment of the level of occupational injuries in various fields of production activities is given. It is noted that there has been a positive trend in reducing the number of fatalities.

Keywords:

industrial injuries, enterprises, working conditions, accidents, fatalities, injury frequency rate.

Введение

Основополагающими правами граждан в соответствии с Конституцией Республики Беларусь являются право на труд и на здоровые и безопасные условия труда. Для реализации данных прав сформирована соответствующая законодательная база, регламентирующая

права и обязанности работодателей и работающих, а также регулирующая их трудовые отношения. В то же время еще велика численность работников, занятых на работах с вредными и опасными условиями труда. В 2018 г. она составила 774 тыс. чел., в 2019 г. – 764 тыс. чел. [1, 2]. Несмотря на применяемые меры по улучшению условий и охраны труда,

внедрение системы экономической заинтересованности нанимателей, на производстве нередки случаи производственного травматизма, в том числе и со смертельным исходом. Причинами травматизма могут быть нарушения существующих норм трудового законодательства со стороны как работодателей, так и работников.

По данным статистической отчетности, ежегодно в республике регистрируется около полутора тысяч несчастных случаев на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более и со смертельным исходом. Производственный травматизм обуславливает возникновение значительных экономических затрат и поэтому является серьезной социально-экономической проблемой, требующей к себе пристального внимания со стороны государства, работодателей и работников. Изучение производственного травматизма, выявление причин несчастных случаев, природы и характера опасных производственных процессов позволяют разрабатывать и своевременно применять меры по его предупреждению в будущем. В связи с этим анализ производственного травматизма представляет как научный, так и практический интерес.

Целью работы было выполнение анализа производственного травматизма в Могилевской области, изучение его динамики в текущем десятилетии в различных отраслях народного хозяйства.

Основная часть

Занятость населения Могилевской области в различных сферах экономической деятельности в последние годы находится на уровне 460...450 тыс. чел., из них почти половина – в сфере производства (210...200 тыс. чел.) [3, 4]. Технологическая модернизация многих предприятий, улучшения условий труда позволили несколько снизить число несчастных случаев на производстве, од-

нако производственный травматизм по-прежнему остается немалой проблемой.

Производственный травматизм – это повреждения различного характера, полученные на производстве за определенный период. Он обусловлен воздействием на человека в процессе его труда различных опасностей, природа и характер которых, а также вызываемые ими несчастные случаи во многом зависят от производственных условий. Многообразие производственных условий обуславливает множество причин производственного травматизма, которые не всегда удастся предусмотреть. Производственные травмы могут повлечь временную или постоянную потерю трудоспособности, при этом пострадавший может утратить общую или профессиональную трудоспособность. Для анализа производственного травматизма используются различные методы, одним из которых является статистический, предусматривающий накопление статистического материала и обработку полученных данных. При сравнительном анализе и оценке уровня травматизма используются относительные статистические показатели, такие как коэффициент частоты, коэффициент тяжести, коэффициент нетрудоспособности [5, 6].

Авторами рассмотрена динамика производственного травматизма в организациях Могилевской области в текущем десятилетии. При анализе использовалась статистическая информация, представленная в официальных изданиях и электронных ресурсах [1–4, 7, 8]. Как видно из показанных на рис. 1 данных, с 2011 по 2015 гг. наблюдалось снижение общей численности потерпевших при несчастных случаях на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более и со смертельным исходом (с 233 до 167 чел.). В 2015–2016 гг. она остается примерно на одинаковом уровне, а затем в последующие годы начинает расти (до 239 чел. в 2018 г. и 240 чел. в 2019 г.). Числен-

ность потерпевших при несчастных случаях на производстве в 2019 г. выросла по отношению к 2015 г. в 1,44 раза, что является довольно существенным. Данные статистической отчетности по производственному травматизму начиная с

2009 г. представляются без учета микроорганизаций. Однако немало производственных травм отмечается и на небольших частных предприятиях, и среди индивидуальных предпринимателей.

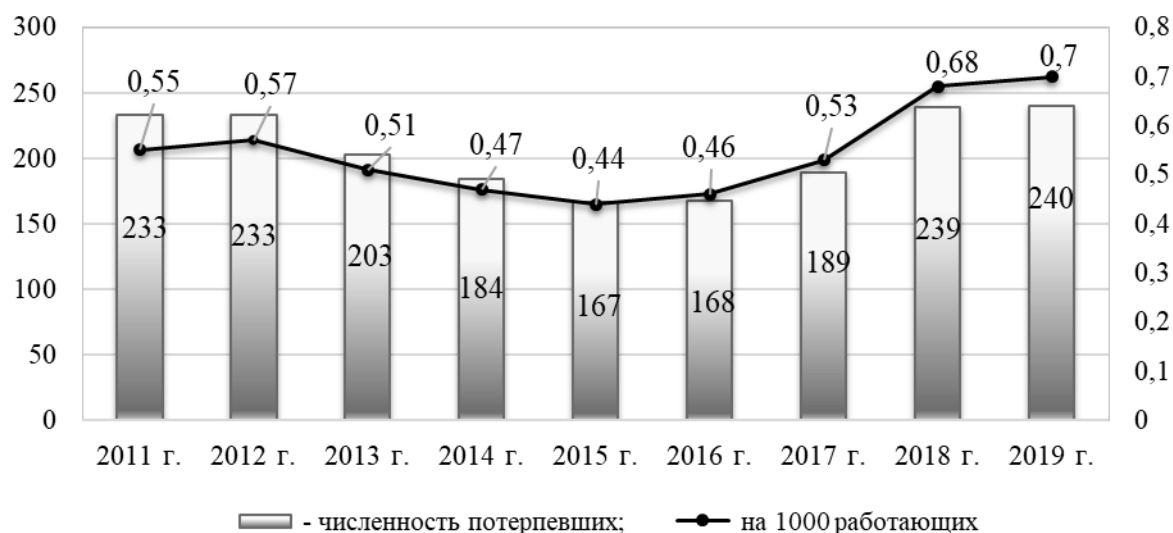


Рис. 1. Динамика производственного травматизма в Могилевской области

Коэффициент частоты производственного травматизма, определяющий количество несчастных случаев в расчете на 1000 работающих за отчетный период, был самым низким в 2015 г. (0,44), самым высоким в 2019 г. (0,70), т. е. имел тенденцию роста (см. рис. 1). Если сравнить коэффициент частоты производственного травматизма в Могилевской области с таковым в целом по Республике Беларусь, то можно отметить, что начиная с 2015 г. он превышал республиканские значения, которые колебались в этот период от 0,43 (2015 г.) до 0,54 (2019 г.). Таким образом, данный коэффициент показывает, что ситуация с производственным травматизмом в Могилевской области в текущем десятилетии, и особенно в 2019 г., была значительно хуже, чем в целом по республике.

Наибольшее число потерпевших при несчастных случаях на производстве в 2018 и 2019 гг. зарегистрировано в г. Могилеве (соответственно 77 и 65 чел.)

и г. Бобруйске (49 и 55 чел.), причем это число было значительно выше, чем в два предшествующих года. Среди районов в 2018 г. по числу потерпевших лидировали Горецкий (15 чел.), Могилевский (16 чел.), Кричевский (14 чел.) и Шкловский (14 чел.) районы, а в 2019 г. – Могилевский (17 чел.), Чаусский (16 чел.), Бельничский (15 чел.) и Осиповичский (16 чел.) районы. В остальных районах это число не превышало 10 чел. [4]. Коэффициент частоты производственного травматизма в 2018 г. самым высоким оказался в Кричевском (1,45), Шкловском (1,33) и Горецком (1,21) районах, в 2019 г. – в Бельничском (2,69) и Бобруйском (2,08). В то же время в г. Могилеве, где сосредоточена значительная часть промышленных предприятий и идет интенсивное строительство, он был ниже (0,57 и 0,5), чем в среднем по области (0,68 и 0,7).

Потери рабочего времени от несчастных случаев на производстве соста-

вили по области в 2018 г. 9,8 тыс. чел.-дн., в 2019 г. – 11,2 тыс. и были значительно выше, чем в 2017 и 2016 гг. (7,2 тыс. и 6,6 тыс. чел.-дн. соответственно). Данный показатель за 2019 г. стал самым высоким в текущем десятилетии. Последние два года отмечается также рост коэффициента тяжести производственного травматизма (или числа дней нетрудоспособности в расчете на одного потерпевшего). В 2018 г. он составил 40,8 дней, в 2019 г. – 46,6, тогда как в два предыдущих года не превышал 40,0 дней. Причем в 2019 г. он оказался выше, чем в целом по республике (44,3 дня). Максимальное значение коэффициента тяжести производственного травматизма в текущем десятилетии приходится на 2015 г. (56,3 дня).

В то же время следует отметить, что численность потерпевших при несчастных случаях на производстве со

смертельным исходом за прошедший период по области имела тенденцию к снижению (рис. 2). По сравнению с 2011 г. количество смертельных случаев в 2017 г. уменьшилось более чем в 3 раза: с 22 до 7. В 2018 г. их число вновь несколько возросло (до 10 чел.), но оно было ниже, чем в годы, предшествующие 2017 г., в 2019 г. составило 8 чел. Отмечается также снижение доли несчастных случаев со смертельным исходом. Так, в 2011–2013 гг. она составляла 9,4...11,2 % от общей численности потерпевших на производстве, а в 2018–2019 гг. – 4,2...3,3 %. Следует понимать, что потеря человеческой жизни – это не только трагедия семьи, но и государства. Поэтому значительная динамика в сторону снижения числа несчастных случаев со смертельным исходом является неплохим достижением производства.

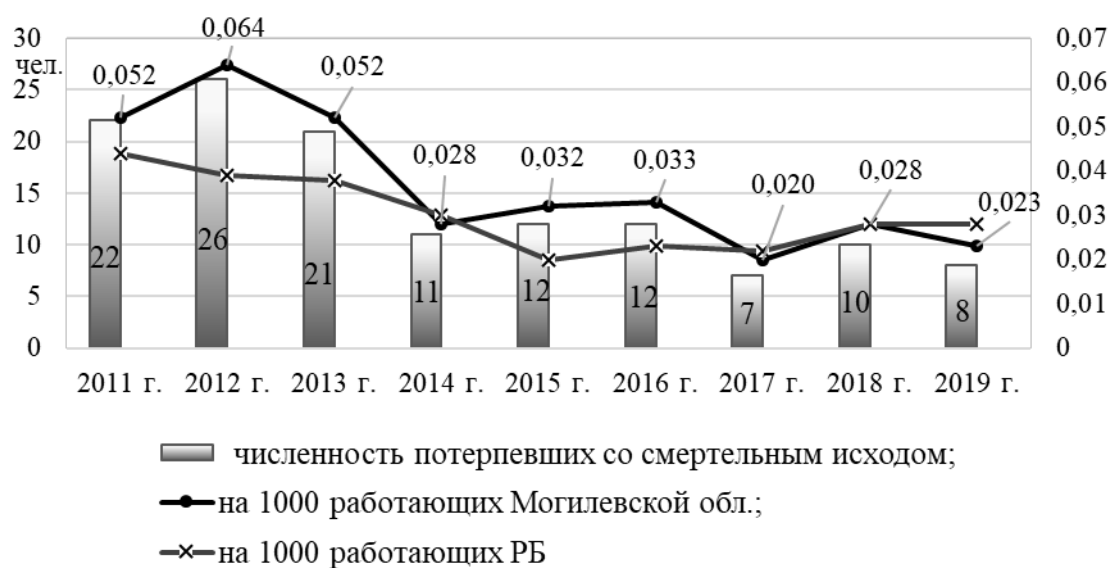


Рис. 2. Динамика несчастных случаев на производстве со смертельным исходом в Могилевской области

Коэффициент, отражающий количество несчастных случаев со смертельным исходом в расчете на 1000 работающих, уменьшился по области более чем в 2 раза и составил 0,020 в 2017 г.

и 0,023 в 2019 г. При этом в 2018 г. он оказался сопоставим с таковым по Республике Беларусь, хотя в предыдущие годы был значительно выше, а в 2019 г. стал ниже (см. рис. 2). Несчастные случаи

со смертельным исходом в 2018 г. зарегистрированы в Горецком, Костюковичском, Кричевском и Могилевском районах – по два, в г. Бобруйске и в Осиповичском районе – по одному [4], в 2019 г. в г. Бобруйске – два случая, в г. Могилеве, Бельничском, Горецком, Славгородском, Чаусском и Шкловском районах – по одному [8].

Среди общей численности работников, потерпевших при несчастных случаях на производстве, большинство – это мужчины. На их долю приходится 73...79 % от всех несчастных случаев (рис. 3). Причем доля несчастных случаев, приходящаяся на мужскую половину, ежегодно в Могилевской области на 1...4 % выше, чем в целом по республике, на женскую половину – наоборот [1, 2]. В 2015–2017 гг. все потерпевшие при несчастных случаях со смертельным исходом (100 %) были мужчины. В 2014 г. среди погибших на

производстве области было две женщины (18,2 %), в 2018 г. – одна (10 %) и в 2019 г. – две (25 %). Несчастные случаи со смертельным исходом у женщин в целом по Республике Беларусь регистрируются ежегодно и колеблются на уровне 8...10 % от их общего числа. Наиболее травмоопасный возраст среди работников – 51...70 лет. В 2018 г. на их долю приходилось 36,7 % от общего числа пострадавших от несчастных случаев с тяжелыми последствиями, в 2019 г. – 38,5 %.

Рассматривая различные сферы экономической деятельности, следует отметить, что в анализируемый период наибольшее количество потерпевших при несчастных случаях на производстве как в Могилевской области, так и в целом по республике регистрировалось в промышленности. Их удельный вес колебался на уровне 40...46 % по области и 35...40 % по республике (табл. 1, рис. 4).

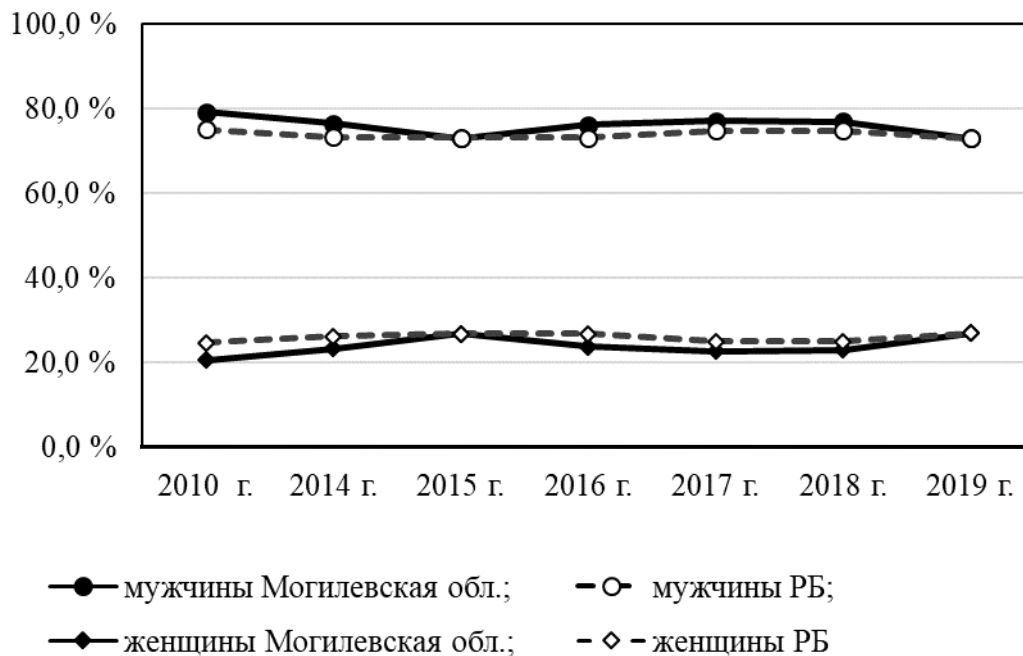
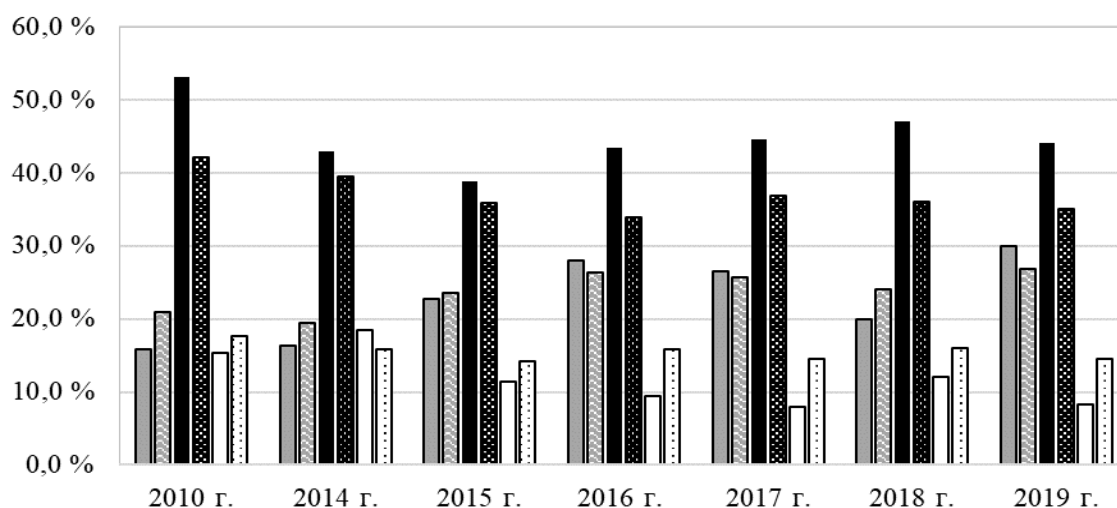


Рис. 3. Удельный вес несчастных случаев на производстве среди разных половых групп

Табл. 1. Численность потерпевших при несчастных случаях на производстве в Могилевской области по видам экономической деятельности

Вид деятельности	2015 г.		2016 г.		2017 г.		2018 г.		2019 г.	
	Число потерпевших, чел.	Из них со смертельным исходом	Число потерпевших, чел.	Из них со смертельным исходом	Число потерпевших, чел.	Из них со смертельным исходом	Число потерпевших, чел.	Из них со смертельным исходом	Число потерпевших, чел.	Из них со смертельным исходом
Сельское, лесное и рыбное хозяйство	38	4	47	3	50	3	47	1	72	4
Промышленность	65	4	73	3	84	2	111	7	103	2
Строительство	19	2	16	4	15	2	29	2	22	1
Транспорт и связь	11	2	9	1	16	–	14	–	12	–
Торговля, ремонт	7	–	4	–	3	–	11	–	10	1
Государственное управление	1	–	2	–	2	–	2	–	1	–
Образование	6	–	2	1	3	–	5	–	5	–
Здравоохранение и социальные услуги	–	–	–	–	–	–	6	–	3	–
Другие сферы деятельности	20	–	15	–	16	–	14	–	12	–
Итого	167	12	168	12	189	7	239	10	240	8



■ сельское хозяйство Могилевской обл.; ■ сельское хозяйство РБ;
 ■ промышленность Могилевской обл.; ■ промышленность РБ;
 □ строительство Могилевской обл.; □ строительство РБ

Рис. 4. Доля несчастных случаев на производстве в некоторых сферах деятельности

Основная масса несчастных случаев в промышленной сфере приходилась на обрабатывающую промышленность, в других сферах (горнодобывающая промышленность, снабжение электроэнергией, водоснабжение и др.) отмечались лишь единичные случаи. Причинами травматизма в промышленности могут быть различные обстоятельства – механические, термические, химические либо иные специфические воздействия. Вероятность возникновения конкретной производственной травмы напрямую зависит от особенностей рабочего места, характера выполняемой работы, психофизиологического состояния работника и ряда других причин.

Второе место по производственному травматизму занимало сельское, лесное и рыбное хозяйство (представлены в статистической отчетности одной строкой), на которое приходилось 15...30 и 19...27 % несчастных случаев соответственно по области и по республике. Здесь доля несчастных случаев до 2018 г. имела тенденцию роста, в 2018 г. несколько снизилась, а в 2019 г. вновь возросла. В сельском и лесном хозяйствах нередко случаи, обусловленные нарушением требований безопасности при ремонте и эксплуатации транспортных средств, машин и механизмов, а также в результате контакта с представителями фауны (в животноводстве). При этом регистрируются случаи нахождения потерпевших в состоянии алкогольного опьянения (10...13 % от общего числа).

На третьем месте по производственному травматизму оказалось строительство: от 8 до 19 % несчастных случаев по области и от 14 до 16 % в целом по республике. Однако, если в целом по республике доля несчастных случаев в строительной отрасли в анализируемый период оставалась примерно на одном уровне, то в Могилевской области вначале она постепенно снижалась (с 18,5 % в 2014 г. до 7,9 %

в 2017 г.), а в 2018 г. вновь выросла (до 12,1 %) и снизилась снова в 2019 г. (до 8 %). Основными видами происшествий на строительных площадках являются падение потерпевших с высоты, обрушение конструкций зданий и сооружений, обвал предметов, материалов, грунта и др.

Следующей по травматизму можно выделить транспортную деятельность и другие, приравненные к ней, на которые приходится 5...8 % несчастных случаев от их общего числа по области. В других сферах экономической деятельности несчастные случаи на производстве встречались гораздо реже, их доля не превышала 5 % и, по большей части, колебалась на уровне 0,5...2 %.

Рассмотрим, в каких сферах деятельности чаще регистрировались несчастные случаи со смертельным исходом. На протяжении ряда лет наибольший удельный вес несчастных случаев со смертельным исходом как по области, так и по республике в целом приходился на сельское, лесное и рыбное хозяйства (25...55 и 30...39 % от их общего числа). В промышленности и строительстве число несчастных случаев со смертельным исходом находилось примерно на одном уровне (25...33 %) с небольшими колебаниями по годам (рис. 5). Только в 2018 г. в Могилевской области наблюдался резкий рост доли несчастных случаев со смертельным исходом, приходящихся на промышленность (до 70 %), и снижение в сельском и лесном хозяйствах (до 10 %). Среди различных отраслей промышленной сферы наибольшее число несчастных случаев со смертельным исходом происходит в обрабатывающей промышленности (при производстве резиновых, пластиковых и других неметаллических изделий и в сфере производства изделий из дерева и полиграфической деятельности). Также зарегистрированы смертельные случаи в промышленной сфере, связанной с водоснабжением, сбором, обработкой и

удалением отходов. Доля несчастных случаев со смертельным исходом, приходящаяся на строительную отрасль об-

ласти, в 2018 г. составила 20 %, в 2019 г. – 12,5 % и была ниже, чем в предыдущие годы.

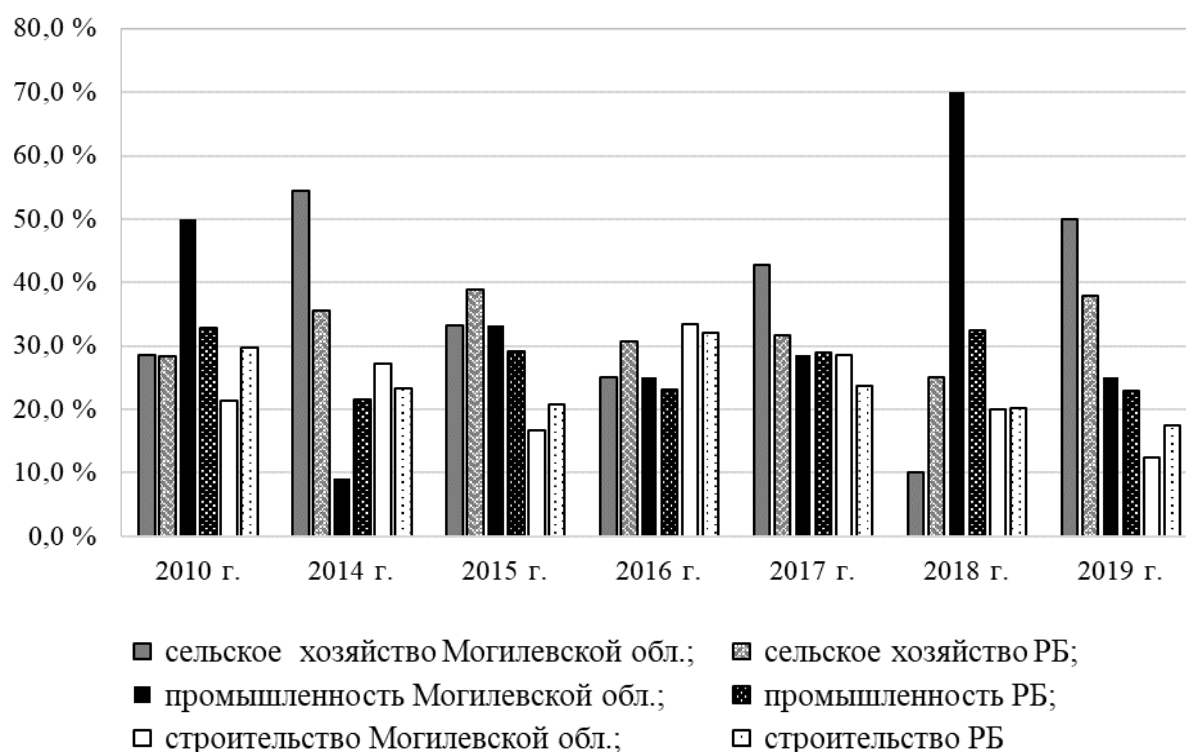


Рис. 5. Доля несчастных случаев со смертельным исходом в некоторых сферах деятельности

Оценивая средневзвешенные за последние шесть лет (2014–2019 гг.) значения несчастных случаев со смертельным исходом в разрезе трех вышеуказанных видов экономической деятельности, наблюдали, что в промышленности их доля в среднем составила 3,7 % от общей численности потерпевших в данной отрасли за указанный период, в сельском, лесном и рыбном хозяйствах – 7,4 %, в строительстве – 10,4 %. В целом по республике (за 2014–2019 гг.) получили следующие значения: в промышленности – 3,9 %, в сельском хозяйстве – 7,4 %, в строительстве – 8,2 %. Полученные результаты показывают, что вероятность возникновения несчастных случаев со смертельным исходом оказалась самой высокой в строительной отрасли. И это

понятно – строительная деятельность всегда несет в себе комплекс рисков: работа на высоте, погрузочно-разгрузочные работы, неблагоприятные погодные условия и др. Абсолютное большинство работ, выполняемых на строительных объектах, отнесены к категории работ с повышенной опасностью. Поэтому на каждом строительном объекте должны строго соблюдаться меры по обеспечению безопасности труда.

Несчастные случаи со смертельным исходом в других сферах экономической деятельности регистрировались гораздо реже. Так, единичные случаи в транспортной сфере (и других приравненных к ней) на территории области зарегистрированы только в 2015 и 2016 гг., в государственном управлении – в 2014 г., в образова-

нии – в 2016 г., в торговле – в 2019 г.

По данным Могилевского областного управления Департамента государственной инспекции труда Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь, наибольшее число несчастных случаев с тяжелыми последствиями происходило в результате воздействий на потерпевших движущихся, разлетающихся, вращающихся предметов, деталей и т. п. (36,7 % – в 2016 г., 32,6 % – в 2018 г. и 29,7 % – в 2019 г.). Нередки несчастные случаи с тяжелыми последствиями в результате падения, обрушения конструкций зданий и сооружений, обвала предметов, материалов и грунта (20 % – в 2016 г., 10,2 % – в 2018 г. и 14,9 % – в 2019 г.), а также в результате падения потерпевших с высоты (соответственно по годам 16,6; 14,3 и 17,6 %) и падения потерпевших во время передвижения (6,7; 14,3 и 14,9 %). При дорожно-транспортных происшествиях доля таких несчастных случаев составляла 3,3 % – в 2016 г., 6,1 % – в 2018 г., 9,4 % – в 2019 г. Несчастные случаи с тяжелыми последствиями, обусловленные поражением электрическим током, воздействием экстремальных температур и другими видами происшествий, встречаются реже.

Основными причинами производственного травматизма чаще всего являются: нарушение потерпевшими трудовой и производственной дисциплины, требований инструкций по охране труда, невыполнение руководителями и специалистами обязанностей по организации труда и обеспечению безопасности, допуск потерпевших к работе без обучения, стажировки и проверки знаний по вопросам охраны труда и инструктажам по охране труда, личная неосторожность потерпевших. Кроме этого, производственному травматизму могут способствовать несоблюдение гигиенических требований в рабочих помещениях, захламление рабочих зон,

отсутствие комфортных условий труда. Нередки случаи, когда экономия средств на технике и оборудовании, облегчающем трудоемкие процессы, снижающем загазованность и улучшающем параметры микроклимата в помещениях, становится опосредованной причиной производственного травматизма.

Заключение

Резюмируя, необходимо отметить, что уровень производственного травматизма в организациях Могилевской области в текущем десятилетии остается достаточно высоким и в последние годы имеет тенденцию роста. Наиболее высокие показатели приходятся на 2011–2012 и на 2018–2019 гг., что, возможно, связано с ухудшением экономической ситуации в эти периоды и, как следствие, снижением внимания руководителей предприятий вопросам обеспечения безопасности труда.

Наибольший удельный вес в производственном травматизме занимает промышленность, затем сельское хозяйство и строительная отрасль. Несчастные случаи чаще возникают на предприятиях с высокой долей ручного труда, поэтому автоматизация и модернизация производств является важным фактором, позволяющим снизить травматизм, обусловленный ошибками самих потерпевших.

В текущем десятилетии отмечена позитивная тенденция в снижении общего числа несчастных случаев со смертельным исходом. Коэффициент, отражающий количество несчастных случаев со смертельным исходом в расчете на 1000 работающих, уменьшился почти в два раза и стал сопоставим с таковым по республике. Наиболее высокая вероятность возникновения несчастных случаев со смертельным исходом сохранялась в строительстве, несмотря на их снижение в последние годы. Поэтому вопросам обеспечения без-

опасных условий труда на территории строительных площадок и участков, где выполняются строительно-монтажные и ремонтно-строительные работы, должно уделяться пристальное внимание со стороны как руководителей, так и самих рабочих.

Отсутствие учета (с 2009 г.) в статистической отчетности данных о производственном травматизме в организациях несколько занижает его фактический уровень как по области, так и по республике в целом.

Причины производственного травматизма многообразны. Полностью искоренить его вряд ли удастся, поскольку

в системе «человек – машина» всегда присутствует и человеческий фактор. Однако стремиться к этому следует. Только совместные усилия работодателя и работников, их целеустремленная работа в этом направлении могут свести к минимуму вероятность возникновения несчастных случаев на производстве. Важную роль при этом играют пропаганда знаний в области охраны труда, подготовка высококвалифицированных специалистов, внедрение новых, передовых методов организации труда, комплексный подход в решении ряда организационных, технических, санитарно-гигиенических и экономических задач.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Труд и занятость в Республике Беларусь [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2018. – 310 с. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/f2e/f2ea58074c86319b0a7542c87ff7a021.pdf>.
2. Труд и занятость в Республике Беларусь [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2016. – 290 с. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/f2e/f2ea58074c86319b0a7542c87ff7a021.pdf>.
3. Статистический ежегодник Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2019. – 471 с. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/35d/35d07d80895909d7f4fdd0ea36968465.pdf>.
4. Статистический ежегодник Могилевской области [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь, Главное статистическое управление Могилевской области. – Могилев, 2019. – 471 с. – Режим доступа: <https://mogilev.belstat.gov.by/upload/iblock/0eb/0ebd01cfe6c5bb3705125246cf5fbd0a.pdf>.
5. **Челноков, А. А.** Охрана труда: учебник / А. А. Челноков, И. Н. Жмыхов, В. Н. Цап; под общ. ред. А. А. Челнокова. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск: Вышэйшая школа, 2013. – 655 с.
6. **Янчий, С. В.** Анализ причин производственного травматизма в организации на основе применения статистического метода [Электронный ресурс] / С. В. Янчий, Н. Д. Дегтярев // Молодой ученый. – 2017. – № 4 – С. 95–100. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/138/38850/>.
7. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/>.
8. Главное статистическое управление Могилевской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mogilev.belstat.gov.by/>.

Статья сдана в редакцию 15 октября 2020 года

Тамара Николаевна Агеева, канд. вет. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-26-75-98. E-mail: ageeva.tam@yandex.by.

Вероника Михайловна Пускова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-98-87-22. E-mail: ver_4@mail.ru.

Tamara Nikolaevna Aheyeva, PhD (veterinary medicine), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel. +375-296-26-75-98. E-mail: ageeva.tam@yandex.by.

Veranika Mikhailovna Puskova, senior lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-296-98-87-22. E-mail: ver_4@mail.ru.

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 338.2

О. В. Боровикова

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОГО И КОВАРИАЦИОННОГО АНАЛИЗА В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

UDC 338.2

O. V. Baravikova

APPLICATION OF ANALYSIS OF VARIANCE AND COVARIANCE IN PRODUCT QUALITY MANAGEMENT

Аннотация

Приведены основные статистические методы, используемые на предприятиях при управлении качеством. Рассмотрен пример применения средств дисперсионного и ковариационного анализа для выявления факторов, оказывающих влияние на качество продукции. Разработаны рекомендации по снижению уровня брака на предприятии.

Ключевые слова:

статистические методы, управление качеством, дисперсионный анализ, ковариационный анализ.

Abstract

The paper shows the main statistical methods which are used in enterprise quality management. An example of using the means of the analysis of variance and covariance is given to identify factors that affect the quality of products. Recommendations have been developed to reduce the level of spoilage at the enterprise.

Keywords:

statistical methods, quality management, analysis of variance, analysis of covariance.

Управление качеством продукции – это область науки, которая с учетом глобализации экономики, повышения конкуренции и динамизма на рынках все чаще выходит на первый план и решения в которой могут стать определяющими жизнеспособность компании в длительной перспективе. Управление качеством охватывает все этапы жизненного цикла продукции, начиная с изучения рынка и заканчивая утилизацией тары. Процесс управления осуществляется циклически и проходит че-

рез четыре основных этапа: контроль, учет, анализ, принятие решений. В современных условиях только постоянный мониторинг результатов деятельности в рамках данных четырех этапов и оперативное принятие управленческих решений могут позволить компании оставаться конкурентоспособной.

Анализ текущей ситуации и принятие управленческих решений предполагает использование определенного круга методов (математических, статистических и др.) для обоснования вы-

бранной стратегии. Если говорить о рекомендациях на уровне государства по использованию статистических методов в управлении качеством, то в Руководстве по статистическим методам применительно к СТБ ISO 9001–2009 [1] указывается на необходимость использования статистических методов, т. к. они «позволяют лучше использовать доступные данные для содействия в принятии решений и тем самым помогают постоянно улучшать качество продукции и процессов для достижения удовлетворенности потребителя». В [1] указаны следующие методы в привязке к области, где они могут использоваться:

- описательная статистика;
- планирование экспериментов;
- проверка гипотез;
- измерительный анализ;
- анализ возможностей процесса;
- регрессионный анализ;
- анализ надежности;
- выборочный контроль;
- моделирование;
- карты статистического контроля процесса;
- статистическое назначение допуска;
- анализ временных рядов [1].

Как видно, список статистических методов, которые рекомендуется применять в управлении качеством, достаточно широк. Рассмотрим подробнее регрессионный анализ, т. к. именно он, на наш взгляд, скрывает в себе широкие возможности по анализу процессов и поддержке принятия решений в области управления качеством.

Суть метода состоит в нахождении функциональной зависимости между исследуемыми переменными, причем одна из переменных выступает в качестве независимой или объясняющей и оказывает влияние на вторую переменную, которую называют зависимой или объясняемой. В управлении качеством в роли объясняемой переменной могут быть использованы доля бракованной

продукции, ее стоимость, доля новой продукции, стоимость продукции с наивысшей категорией качества и др., а в качестве объясняющих переменных – затраты на НИОКР, доля нового оборудования, доля квалифицированных рабочих и т. д. Вышеприведенные распространенные примеры переменных являются количественными. Однако в управлении качеством исследователю чаще необходимо оценить влияние качественных переменных на зависимую. Например, цель исследования может быть сформулирована следующим образом: есть ли различие в показателях качества продукции у различных рабочих смен, или у разного оборудования; влияет ли сортность или марка исходного материала на количество бракованной продукции и т. д. В этом случае для отображения качественной переменной в уравнение регрессии необходимо вводить так называемые фиктивные переменные, причем их количество должно быть на один меньше, чем возможных вариантов значения качественной переменной. Если рассматриваются регрессионные модели, содержащие только качественные объясняющие переменные, то говорят об ANOVA-модели или модели дисперсионного анализа. Если же в модели присутствуют и качественные, и количественные переменные (их называют ковариатами), то говорят о ковариационном анализе (модель ANCOVA).

Рассмотрим применение ANOVA- и ANCOVA-моделей на примере одного из предприятий г. Могилева, которое является производителем пластмассовой упаковки, в первую очередь пластиковых ведер. Поставки продукции осуществляются по всему миру, поэтому вопросы качества, а значит, и конкурентоспособности продукции являются доминирующими. Экспертами было отмечено, что некоторые термопластавтоматы (ТПА), на которых осуществляется литье ведер под давлением, чаще дают сбой и требуют переналадки, а также,

возможно, имеют больший процент бракованной продукции. Также было предложено проанализировать влияние на качество конечной продукции типа цветной полипропиленовой крошки, которая является сырьем для изготовления ведер. В качестве исходных данных были взяты данные по браку за январь–август 2020 г., включающие объем выпуска, шт., процент брака, номер ТПА, на котором было изготовлено изделие, а также тип цветной полипропи-

леновой крошки.

Для устранения эффекта шума из исходных данных были удалены записи по изделиям, которые выпускались на оборудовании, которое запускалось меньше 10 раз за анализируемый период, а также о продукции с редко используемым типом полипропиленовой крошки (менее 5 раз).

Описательная статистика по количественным переменным приведена в табл. 1.

Табл. 1. Описательная статистика

Переменная	Количество	Среднее	Медиана	Мода	Частота моды	Минимум	Максимум
Выпуск, шт.	771	44 415	14 480	5 700	7	582	782 956
Процент брака, %	771	5,77	4,21	4,17	17	0,08	92,7

Средний выпуск изделия за анализируемый период составляет 44 415 шт., половина изделий выпустилась в количестве менее 14 480 шт., а у половины изделий выпуск превысил данное значение. Минимальный выпуск за период составил 582 изделия, максимальный –

782 956 шт. Средний процент брака по исследуемым изделиям составил 5,77 %, причем минимальное значение брака было 0,08 %, а максимальное близко к 100 % и составило 92,7 %.

Что касается ТПА, то они использовались достаточно равномерно (рис. 1).

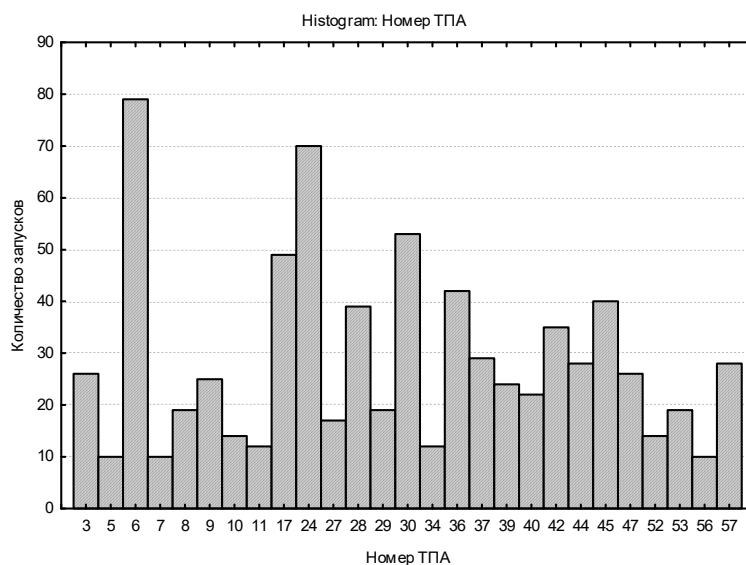


Рис. 1. Гистограмма использования оборудования

Чаще других использовались ТПА
№ 6 и 24 (79 и 70 раз соответственно).

Средние значения брака для каждо-
го номера ТПА представлены на рис. 2.

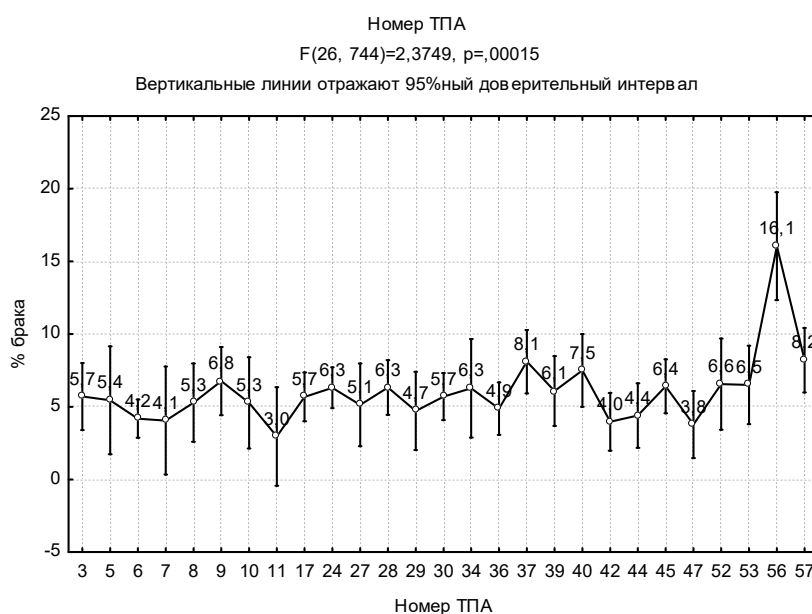


Рис. 2. Средний уровень брака для разных ТПА

На рисунке видно, что наиболь-
ший средний уровень брака в 16,1 %
наблюдается у ТПА № 56, также высо-
кие значения у ТПА № 57 (8,2 %) и
№ 37 (8,1 %).

Что касается типа полипропилен-
ной крошки, то распределение частот
ее применения за исследуемый период
приведено на рис. 3.

Frequency table: Тип пластика (Spreadsheet исходные данные 11)					
Category	Count	Cumulative Count	Percent	Cumulative Percent	
зеленый 553	6	6	0,77821	0,7782	
синий 452	13	19	1,68612	2,4643	
белый 102	468	487	60,70039	63,1647	
зеленый 528	9	496	1,16732	64,3320	
розовый	22	518	2,85344	67,1855	
золотой 217	9	527	1,16732	68,3528	
синий 416	9	536	1,16732	69,5201	
зеленый 529	19	555	2,46433	71,9844	
серебряный 108	19	574	2,46433	74,4488	
синий 439	9	583	1,16732	75,6161	
синий 461	9	592	1,16732	76,7834	
черный 702	35	627	4,53956	81,3230	
оранжевый 270	9	636	1,16732	82,4903	
прозрачный 100	45	681	5,83658	88,3268	
желтый 227	15	696	1,94553	90,2724	
натуральный 101	6	702	0,77821	91,0506	
серый 990021	20	722	2,59403	93,6446	
желтый 221	10	732	1,29702	94,9416	
серебристый 163	11	743	1,42672	96,3684	
серебряный 8222	5	748	0,64851	97,0169	
серебр. 8222	23	771	2,98314	100,0000	
Missing	0	771	0,00000	100,0000	

Рис. 3. Распределение частот использования цветной полипропиленовой крошки

Как и ожидалось, для производства ведер чаще всего используют белую крошку (в исследуемой совокупности частота составила 468 раз или 60,7 %). Следующий по частоте – черный цвет, но его присутствие составляет лишь 4,5 % за анализируемый период.

Количество градаций номера ТПА и типа цветной полипропиленовой крошки равно 27 и 21 варианту соответственно. Известно, что для получения качественной модели регрессии количество наблюдений должно быть не менее семи на один параметр, не считая свободного члена [3]. С учетом правила ввода фиктивных переменных, количество оцениваемых параметров в однофакторных моделях ANOVA будет 26 и 21. Следовательно, требуемое количество наблюдений не менее 182 и 147. Количество наблюдений в выборке составляет 771, что значительно выше ми-

нимально допустимого числа. Это дало возможность строить как однофакторные модели, так и двухфакторную ANOVA-модель.

Таким образом, для оценки влияния типа ТПА на процент брака на предприятии была построена ANOVA-модель зависимости процента брака от номера ТПА. Чтобы проверить ее качество, были оценены значения суммы квадратов отклонений от внутригрупповых средних и общей средней, а также рассчитано значение F-критерия. Выдвигалась гипотеза о том, что средние значения брака для каждого ТПА статистически не различаются между собой. Так как р-значение (рис. 4) меньше уровня значимости (0,05), то можно говорить о том, что с вероятностью 95 % значения средних нельзя считать равными и, следовательно, фактор «номер ТПА» влияет на процент брака.

Тестирование значимости % брака (Spreadsheet исходные данные 111', ANOVA-модель Декомпозиция гипотезы							
Влияние	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p		
Номер ТПА	7690,84	26	295,8015	4,710378	0,000000		
Error	46784,38	745	62,7978				

Рис. 4. Результаты построения ANOVA-модели в ППП Statistica

Также о статистической значимости построенной модели говорит и значимость коэффициента детерминации R^2 .

Целью исследования было оценить не только сам факт влияния фактора на процент брака, но и выяснить, какое именно оборудование дает прирост к результативному фактору. В рамках ис-

следования ANOVA-модели можно построить регрессию с фиктивными переменными, где в качестве фиктивной переменной (со значениями 0 и 1) будут выступать 26 видов исследуемого оборудования, одно из которых выбирается в качестве базовой модели. Результаты приведены на рис. 5.

Effect	Parameter Estimates (Spreadsheet исходные данные 111)								
	Level of Effect	Column	% брака Param.	% брака Std.Err	% брака t	% брака p	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt	% брака Beta ('
Intercept		1	6,00959	0,253107	23,74333	0,000000	5,51271	6,50648	
Номер ТПА	3	2	-0,29959	1,156761	-0,25899	0,795712	-2,57050	1,97131	-0,0129
Номер ТПА	5	3	-0,56159	1,837538	-0,30562	0,759977	-4,16897	3,04578	-0,0202
Номер ТПА	6	4	-1,82618	0,695244	-2,62667	0,008800	-3,19105	-0,46130	1,1094
Номер ТПА	7	5	-1,95559	1,837538	-1,06425	0,287562	-5,56297	1,65178	-0,0706
Номер ТПА	8	6	-0,72801	1,344424	-0,54151	0,588320	-3,36733	1,91130	-0,0293
Номер ТПА	9	7	0,75561	1,178582	0,64111	0,521646	-1,55814	3,06935	0,0322
Номер ТПА	10	8	-0,73388	1,558885	-0,47077	0,637942	-3,79422	2,32646	-0,0279
Номер ТПА	11	9	-3,05043	1,680615	-1,81507	0,069916	-6,34974	0,24888	-0,1137
Номер ТПА	17	10	-0,32735	0,860279	-0,38051	0,703672	-2,01621	1,36151	-0,0168
Номер ТПА	24	11	0,29941	0,732990	0,40847	0,683045	-1,13957	1,73838	0,0172
Номер ТПА	27	12	-0,87959	1,418655	-0,62002	0,535435	-3,66464	1,90545	-0,0346
Номер ТПА	28	13	0,31502	0,955729	0,32961	0,741784	-1,56122	2,19127	0,0157
Номер ТПА	29	14	-1,29538	1,344424	-0,96352	0,335598	-3,93470	1,34393	-0,0522
Номер ТПА	30	15	-0,31337	0,830096	-0,37751	0,705904	-1,94298	1,31624	-0,0168
Номер ТПА	34	16	0,26457	1,680615	0,15743	0,874952	-3,03474	3,56388	0,0098
Номер ТПА	36	17	-1,13317	0,923444	-1,22711	0,220171	-2,94603	0,67970	-0,0557
Номер ТПА	37	18	2,09213	1,098316	1,90485	0,057185	-0,06404	4,24830	0,0930
Номер ТПА	39	19	0,07874	1,201776	0,06552	0,947778	-2,28054	2,43801	0,0033
Номер ТПА	40	20	1,49450	1,252892	1,19284	0,233313	-0,96513	3,95412	0,0622
Номер ТПА	42	21	-2,03817	1,005230	-2,02756	0,042961	-4,01159	-0,06474	1,0952
Номер ТПА	44	22	-1,61388	1,116733	-1,44518	0,148829	-3,80620	0,57844	-0,0717
Номер ТПА	45	23	0,40216	0,944555	0,42576	0,670404	-1,45215	2,25647	0,0199
Номер ТПА	47	24	-2,23036	1,156761	-1,92811	0,054222	-4,50127	0,04054	-0,0968
Номер ТПА	52	25	0,54898	1,558885	0,35216	0,724818	-2,51136	3,60932	0,0200
Номер ТПА	53	26	0,49620	1,344424	0,36908	0,712175	-2,14312	3,13551	0,0200
Номер ТПА	56	27	0,04241	1,837538	5,46514	0,000000	6,43503	3,64978	1,3625

Рис. 5. Параметры регрессионной модели в рамках анализа ANOVA в ППП Statistica

На рисунке представлены коэффициенты линейного уравнения регрессии при 26 фиктивных переменных. В качестве базы для сравнения был взят ТПА № 57 (его нет в списке). Статистически значимыми признаны коэффициенты при ТПА № 6, 42 и 56, а также свободный член, который в данном случае характеризует среднее влияние на уровень брака базовой модели (на рисунке они выделены полужирным шрифтом). Соответственно, можно сделать вывод, что узкими местами на предприятии в плане формирования качества продукции являются ТПА № 56 и 57, они присутствуют в модели со знаком «+», а значит увеличивают уровень брака. Статистически значимое отрицательное влияние имеют ТПА № 6 и 42. Эксперты подтвердили последние выводы, т. к. за термопластавтоматом № 6 закреплены конкретная пресс-форма и робот IML, что устраняет необходимость в переналадке робота, а это,

в свою очередь, минимизирует уровень брака, получаемый при запуске нового проекта. Что касается ТПА № 42, то в IV квартале 2019 г. на нем был установлен новый комплекс – пресс-форма и робот IML. Это значительно упростило процесс наладки и позволило снизить брак, который возникает по причине неисправности робота IML (потери вакуума, смещение этикетки на конечном изделии и т. п.).

Аналогичный анализ был проведен и по выявлению влияния типа цветной крошки. Модель оказалась статистически незначима, т. е. можно сделать вывод, что тип крошки не оказывал существенного влияния на уровень брака за анализируемый период.

На предприятиях, где используются ТПА для литья под давлением, имеется специфика необходимости переналадки оборудования под новые заказы, а значит, под новые пресс-формы. Это ведет к тому, что, как правило, с увели-

чением объема выпуска уровень брака падает, т. к. специалисты успевают откалибровать оборудование. Данную ги-

потезу подтверждает график рассеяния исходных данных (рис. 6).

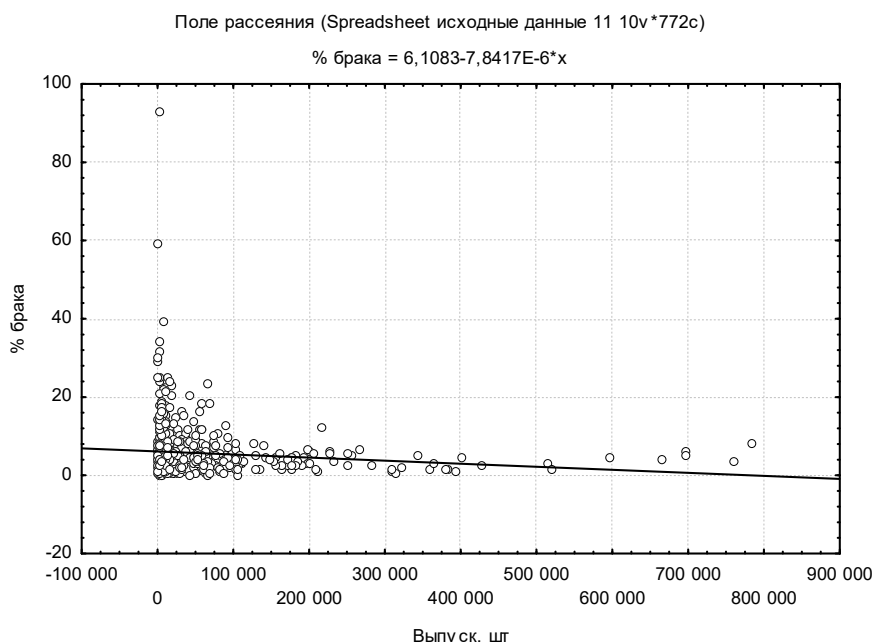


Рис. 6. График зависимости процента брака от объема выпуска

На рисунке видна скученность значений в диапазоне выпуска от 0 до 100 000 шт., а также отрицательный наклон предполагаемой линии регрессии. Была оценена значимость уравнения зависимости, представленного на рисунке. На уровне значимости 5 % уравнение можно считать статистически надежным. Коэффициент корреляции Пирсона между указанными переменными также значим и составляет $-0,11$. Таким образом,

линейная связь есть, она отрицательная, т. е. с увеличением одной переменной, вторая уменьшается.

Для учета в модели количественной переменной «объем выпуска» удобно использовать модель ANCOVA – модель ковариационного анализа. В данном случае, помимо качественной переменной «номер ТПА», в модель была введена количественная – «объем выпуска». Результаты анализа приведены на рис. 7.

Тестирование значимости % брака (Spreadsheet исходные данные 111)						
Ковариационный анализ						
Декомпозиция гипотезы						
Влияние	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p	
Выпуск, шт	1937,85	1	1937,853	32,14881	0,000000	
Номер ТПА	6676,19	26	256,777	4,25990	0,000000	
Error	44846,53	744	60,278			

Рис. 7. Результаты построения ANCOVA-модели в ППП Statistica

На рисунке видно, что модель получилась статистически значимая – на уровне значимости 5 % подтвердилось влияние объема выпуска на уровень брака, а также подтверждена статистически разница в средних уровнях брака на разных ТПА. В целом, выводы по модели оказались аналогичны ANOVA-модели, но в качестве оборудования, отрицательно влияющего на уровень брака, также было отмечено ТПА № 37.

Таким образом, проведение дисперсионного и ковариационного анализа позволило сделать следующие *выводы*.

1. На предприятии существует обратная связь между уровнем брака и объемом выпуска продукции.

2. Уровень брака напрямую зависит от оборудования, на котором изготавливается изделие; тип цветной полипропиленовой крошки не влияет на процент брака.

3. Статистически значимое отрицательное влияние на уровень брака имеют ТПА № 56, 57 и 37, это оборудование является узким местом на предприятии.

Исходя из обратной связи между уровнем брака и объемом выпуска,

можно рекомендовать отделу логистики распределять задания на машины таким образом, чтобы минимизировать переналадку оборудования и закреплять изготовление одного изделия на конкретном оборудовании.

Что касается мероприятий касательно оборудования, являющегося узким местом, то поскольку за каждым из указанных ТПА закреплено одно изделие, которое постоянно изготавливается на нем, проблема заключается не в сложностях переналадки оборудования, а в техническом состоянии самого робота IML. Следует провести ремонтно-восстановительные работы на этих комплексах, которые могут включать:

- замену вакуумных магистралей;
- ремонт узла транспортировки этикетки;
- восстановление покрытия, наносящего статический заряд;
- замену вакуумного насоса.

Также имеет смысл проведение дополнительного анализа причин возникновения брака на данных ТПА и реализация производственных мероприятий для устранения имеющихся проблем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТБ ISO/TR 10017–2011. Руководство по статистическим методам применительно к СТБ ISO 9001–2009. – Введ. 2012-07-01. – Минск: Госстандарт; Изд-во стандартов. – 64 с.
2. Бородич, С. А. Эконометрика : учебное пособие / С. А. Бородич. – 3-е изд., стер. – Минск: Новое знание, 2006. – 408 с.
3. Эконометрика: учебник для магистров / И. И. Елисеева [и др.]; под ред. И. И. Елисеевой. – Москва: Юрайт, 2012. – 453 с.

Статья сдана в редакцию 12 октября 2020 года

Ольга Валерьевна Боровикова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: peklima.olga@gmail.com.

Olga Valer'evna Baravikova, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: peklima.olga@gmail.com.

УДК 338.45

Т. М. Лобанова

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

UDC 338.45

T. M. Lobanova

EVALUATING THE EFFECTIVENES OF INVESTMENT PROCESSES IN THE MANUFACTURING INDUSTRY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Аннотация

Рассмотрено влияние уровня инвестиционных потоков на показатели развития отраслей обрабатывающей промышленности. Статистический анализ взаимосвязи между показателями установил наличие статистического значимого влияния уровня инвестиций на отдельные показатели. Изучены причины сокращения объемов инвестиционных ресурсов и замедления инвестиционных процессов.

Ключевые слова:

обрабатывающая промышленность, модернизация, инвестиции, эффективность, производительность труда, фондоотдача, ранговый анализ.

Abstract

The article considers the influence of the level of investment flows on the development indicators of manufacturing industries. A statistical analysis of the relationship between the indicators has established the presence of a statistically significant effect of the level of investments on individual indicators. The reasons for the reduction in investment resources and the slowdown in investment processes have been studied.

Keywords:

manufacturing industry, modernization, investment, efficiency, labor productivity, capital productivity, rank analysis.

Инвестиции в экономику призваны обеспечить переход производства на новый технологический уровень, который обеспечит создание конкурентоспособной на внешних рынках продукции, рост эффективности использования производственных ресурсов и в конечном счете интенсивный рост национальной экономики, улучшение позиции страны в международных рейтингах.

Основными направлениями модернизации обрабатывающей промышленности должны стать новые технологии, позволяющие обеспечивать большую добавленную стоимость, низкую ресурсоемкость, новые свойства и параметры традиционным товарам и услу-

гам. Указанные приоритетные направления и цели определены Государственной программой инновационного развития Республики Беларусь. Достичь поставленных целей в условиях дефицита инвестиционных ресурсов можно только при получении высокой отдачи на каждый вложенный рубль.

В работе проведена оценка эффективности инвестиционных процессов в обрабатывающей промышленности Республики Беларусь за 2011–2018 гг. Аналитической базой выступили данные Национального статистического комитета Республики Беларусь [1, 2]. За рассматриваемый период произошел ряд кризисных явлений в экономической и

общественно-политической жизни, следствием чего стало обесценивание национальной валюты, снижение платежеспособного спроса, в том числе и внешнего. Все это отразилось на стоимостных показателях отдельных отраслей и национальной экономики в целом. Для получения достоверных результатов

анализа стоимостные показатели были приведены в сопоставимый вид путем корректировки на индекс цен производителей промышленной продукции. Показатели, определяющие место обрабатывающей промышленности в экономике страны, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Макроэкономические показатели обрабатывающей промышленности в сопоставимых величинах

В миллиардах белорусских рублей

Показатель	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Валовый внутренний продукт (ВВП)	105,29	107,73	116,04	124,03	118,09	111,34	112,35	122,32
Валовая добавленная стоимость (ВДС)	92,88	94,48	102,27	109,57	102,40	96,17	97,98	104,79
Объемы производства обрабатывающей промышленности	107,50	109,93	93,76	92,01	84,57	82,15	88,70	97,74
Валовая добавленная стоимость обрабатывающей промышленности	27,82	26,70	25,52	26,16	24,38	22,44	24,43	26,16
Инвестиции, всего	33,81	30,38	36,26	34,68	27,21	21,94	22,46	25,00
Инвестиции в обрабатывающую промышленность	9,69	8,10	8,52	9,33	7,16	4,73	4,96	5,62
Индекс цен производителей промышленной продукции	1,703	1,742	1,137	1,124	1,172	1,12	1,098	1,068

Наблюдается замедление инвестиционных процессов, снижение объемов инвестиций как в экономику в целом (с 33,8 до 25 млрд р.), так и в обрабатывающую промышленность (с 9,69 до 5,62 млрд р.). При этом объемы производства обрабатывающей промышленности не показывают ожидаемого роста и остаются ниже уровня 2011–2012 гг. В то же время показатели ВВП и НДС всей национальной экономики в среднем демонстрируют небольшой рост.

В Республике Беларусь валовая добавленная стоимость обрабатывающей промышленности составляет около 25 % ВВП страны. В обрабатывающих отраслях работает около 18 %

всего занятого в экономике населения. Согласно ОКЭД, обрабатывающая промышленность включает 13 видов экономической деятельности (табл. 2).

Из всех отраслей обрабатывающей промышленности три отрасли обеспечивают почти половину промышленного производства: производство продуктов питания, напитков и табачных изделий (СА), производство кокса и продуктов нефтепереработки (CD), производство химических продуктов (СЕ). Их суммарный удельный вес в разные периоды составлял 48...51 % всего объема производства обрабатывающей промышленности. Еще три отрасли (СG, СН, СК) составляют 19...23 %. На долю остальных семи отраслей приходит-

ся 27...32 % промышленного производства. Структура отраслей с точки зрения занятых в них трудовых ресурсов несколько отличается от структуры объемов производства ввиду различий технологических процессов по трудоемкости, фондоемкости и материалоемкости.

Так, почти третья часть работников обрабатывающей промышленности занята производством продуктов питания, напитков и табачных изделий (СА), текстильных изделий, одежды, изделий из кожи и меха (СВ) и производством машин и оборудования (СК) [3].

Табл. 2. Объемы производства и численность работников обрабатывающей промышленности

Вид экономической деятельности	Секция (по ОКЭД)	Объем производства промышленной продукции, млн белорус. р.	Численность работников, тыс. чел.
Обрабатывающая промышленность:	С	97 737,40	741,4
производство продуктов питания, напитков и табачных изделий	СА	25 133,13	139,5
производство текстильных изделий, одежды, изделий из кожи и меха	СВ	3 985,09	85,2
производство изделий из дерева и бумаги; полиграфическая деятельность и тиражирование записанных носителей информации	СС	5 112,21	60,4
производство кокса и продуктов нефтепереработки	CD	17 173,89	13,0
производство химических продуктов	CE	10 303,73	47,9
производство основных фармацевтических продуктов и фармацевтических препаратов	CF	1 251,54	10,1
производство резиновых и пластмассовых изделий, прочих неметаллических минеральных продуктов	CG	7 562,88	79,2
металлургическое производство.	CH	7 419,41	58,2
Производство готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования			
производство вычислительной, электронной и оптической аппаратуры	CI	1 709,45	19,6
производство электрооборудования	CJ	2 706,89	32,1
производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки	CK	7 934,95	86,4
производство транспортных средств и оборудования	CL	3 450,86	43,8
производство прочих готовых изделий; ремонт, монтаж машин и оборудования	CM	3 993,38	65,6

Объемы инвестиций в отрасли зависят от множества факторов. В первую очередь это масштабы отрасли: чем больше капитала в них сосредоточено, тем больше их вклад в ВВП и тем, соответственно, больше инвестиций они привлекают. Еще одним фактором являются приоритеты государственной политики, цель которой – снижение зависимости от внешних факторов и стабилизация национальной валюты. Од-

нако инвестиции являются ограниченным ресурсом, поэтому чтобы инвестиционные процессы не замедлялись, необходимо получать прибыль на каждый ранее вложенный рубль.

Зависимость между средними значениями показателей инвестиционных процессов и показателями отраслей была изучена с помощью корреляционного анализа. Исходными данными выступали значения четырнадцати годовых по-

казателей по тринадцати отраслям за восемь лет. Условные обозначения переменных приведены в табл. 3, коэф-

фициенты корреляции – в табл. 4. Значимость коэффициентов корреляции проверялась по t-критерию Стьюдента.

Табл. 3. Изучаемые показатели

Обозначение переменной	Показатель
x1	Общий объем инвестиций в отрасль, млн р.
x2	Инвестиции на одну организацию, тыс. р.
x3	Инвестиции на одного работника, тыс. р.
x4	Объем производства, млн р.
x5	Прибыль, млн р.
x6	Рентабельность, %
x7	Объем производства на одну организацию, тыс. р.
x8	Прибыль на одну организацию, тыс. р.
x9	Прибыль на одного работника, тыс. р.
x10	Износ основных фондов, %
x11	Фондоотдача
x12	Производительность труда, тыс. р.
x13	Экспорт, млн долл.
x14	Импорт, млн долл.

В абсолютном выражении объем инвестиций напрямую зависит от масштабов производственной деятельности, которая проявляется через такие показатели, как объем производства, прибыль и стоимость основных фондов. Это еще связано и с тем, что инвестиции осуществляются преимущественно за счет собственных источников и кредитов банков. Следовательно, чем большая сумма капитала сосредоточена в той или иной отрасли обрабатывающей промышленности, тем больше и объем инвестиций.

При этом рентабельность производственной деятельности не является определяющим фактором в инвестиционной деятельности предприятий обрабатывающей сферы. Как показывает корреляционный анализ, между рентабельностью и объемом инвестиций

связь полностью отсутствует или даже имеет место слабая обратная связь. Таким образом, низкорентабельные отрасли активно пытаются повысить рентабельность за счет модернизации. Но при этом медленная отдача от вложенных инвестиционных ресурсов приводит, по сути, к их замораживанию и снижению дальнейшей инвестиционной активности.

Основная цель инвестиционной политики прослеживается в модернизации собственной материально-технической базы. Варианты инвестирования в другие более прибыльные проекты с целью получения прибыли от капиталовложений не рассматриваются. Исправить эту ситуацию и повысить эффективность инвестиционных процессов поможет более интенсивное развитие фондового рынка.

Табл. 4. Корреляционная матрица

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14
x1	1													
x2	0,32	1												
x3	0,51	0,93	1											
x4	0,58	0,43	0,41	1										
x5	0,54	0,07	0,14	0,78	1									
x6	-0,26	-0,26	-0,21	-0,31	0,16	1								
x7	0,26	0,98	0,87	0,45	0,05	-0,30	1							
x8	0,30	0,86	0,88	0,44	0,25	-0,10	0,83	1						
x9	0,33	0,67	0,79	0,40	0,42	0,13	0,61	0,91	1					
x10	-0,11	0,41	0,32	0,08	0,09	0,13	0,40	0,45	0,37	1				
x11	-0,02	0,33	0,30	0,17	0,03	-0,04	0,35	0,43	0,40	0,24	1			
x12	0,31	0,96	0,93	0,50	0,13	-0,30	0,97	0,91	0,75	0,39	0,39	1		
x13	0,32	-0,11	-0,15	0,59	0,66	-0,02	-0,09	-0,02	-0,02	0,05	0,09	-0,08	1	
x14	0,32	0,72	0,67	0,52	0,28	-0,24	0,79	0,82	0,66	0,37	0,72	0,79	0,37	1

Одним из приоритетных направлений экономической политики является импортозамещение и производство экспортоориентированной продукции, что должно обеспечить приток в страну валюты. Коэффициент корреляции между объемами экспорта и прибылью (0,66 при $t = 7,69$) показывает сильную связь между данными показателями. Экспортная деятельность выгодна отраслям и позволяет увеличить прибыль. Но при этом заметна проблема, связанная с объемами импорта. Имеет место сильная и средняя прямая связь между импортом и почти всеми исследуемыми показателями. Большинство отраслей в своей деятельности использует импортное сырье, модернизация также осуществляется путем приобретения основных фондов и технологий за рубежом.

Приоритетным направлением является развитие отраслей, использующих внутренние возобновляемые ресурсы. Так, с 2011 по 2015 гг. произошла

существенная модернизация деревообрабатывающей промышленности. Капиталовложения в отрасль превышали стоимость всех имеющихся в отрасли основных производственных фондов. После окончания масштабных инвестиций в отрасль наблюдается наращивание объемов производства в сопоставимых ценах. Как результат, доля деревообработки увеличилась в промышленном производстве с 2,7 % в 2011 г. до 4,5 % в 2018 г., а сальдо за тот же период – с 33,3 до 713,5 млн долл.

На рис. 1 представлена динамика среднего значения производительности труда и фондоотдачи по шести отраслям, на долю которых пришлось около 80 % всех инвестиций в обрабатывающую промышленность, и динамика данных показателей деревообрабатывающей промышленности как отрасли, получившей наибольший объем капиталовложений в сравнении с ее объемами производства и стоимостью фондов.

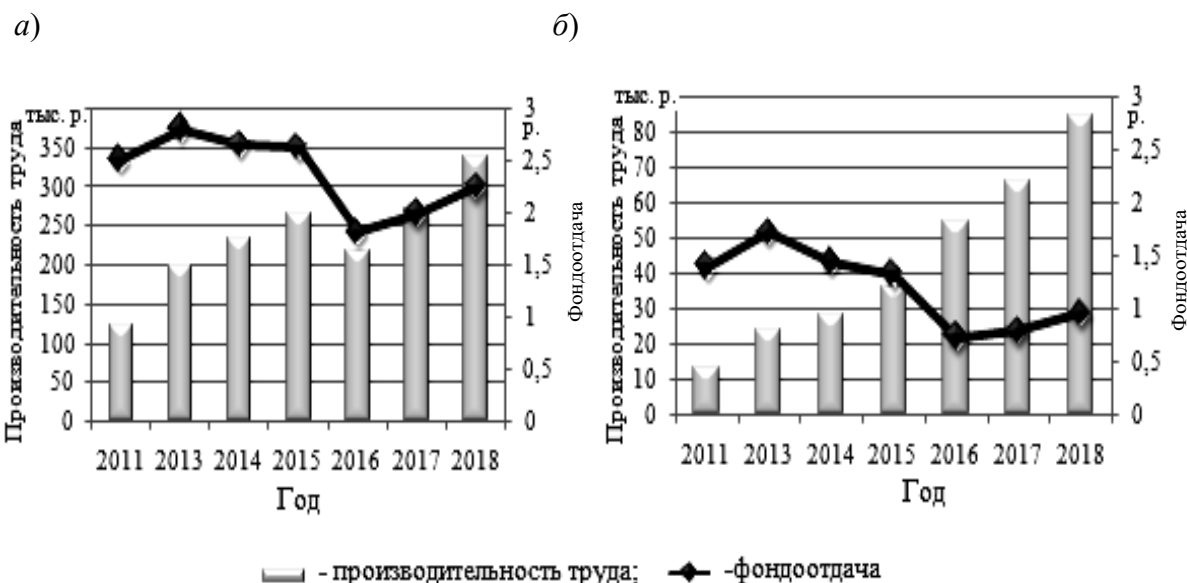


Рис. 1. Динамика производительности труда и фондоотдачи: а – СА, СС, СD, СЕ, СG, СН; б – СС

Однако на изменение показателей развития отрасли влияет не столько сам факт наличия капиталовложений, сколько степень модернизации отрасли. На рис. 1, б приведена динамика производительности труда и фондоотдачи деревообрабатывающей промышленности, инвестиции в которую в несколько раз превысили стоимость ее материально-технической базы. В результате имеет место рост производительности труда, однако фондоотдача из-за высокой остаточной стоимости нового оборудования снизилась.

Приводят ли капиталовложения к росту качественных показателей, можно видеть из табл. 5, в которой представлена информация о временном периоде наибольших капиталовложений в отрасль, а также о периоде, когда наблюдался максимальный темп роста Tr_{max} таких показателей, как прибыль на одного работника, производительность труда и экспорт.

Влияние масштабов инвестиционной деятельности на приоритетные показатели отраслей было изучено с помощью приемов статистического анализа. Показатели эффективности исследовались в части их темпов роста под влиянием инвестиционных процессов. Исследовалась взаимосвязь между следующими показателями: доля инвестиций относительно объемов производства, доля инвестиций относительно среднегодовой стоимости основных фондов, темпы роста прибыли на одного работника, производительности труда, экспорта, импорта, объемов производства. Подробные результаты анализа приведены в [3].

Корреляционный анализ показал значимую сильную связь между инвестициями и ростом прибыли в расчете на одного работника и производительности труда. Немного в меньшей степени зависимость наблюдается между влиянием инвестиций на объемы производства и экспорт.

Табл. 5. Динамика отдельных показателей отраслей в постинвестиционный период

Код ВЭД	Период максимальных капиталовложений, год	Прибыль на одного работника		Производительность труда		Экспорт	
		Год	Тр _{max}	Год	Тр _{max}	Год	Тр _{max}
СА	2013–2015	2016	1,424	2016	1,069	2017	1,19
СВ	2014	2015	1,605	2016	1,175	2016	1,18
СС	2012–2015	2016	2,462	2016	1,334	2017	1,36
CD	2014–2015	2017	2,024	2017	1,207	2015	5,36
СЕ	2012–2015	2017	2,274	2014	1,395	2015	2,22
CF	2015	2015	1,479	2015	1,364	2017	1,28
CG	2012–2014	2016	1,426	2017	1,126	2017	1,38
CH	2013–2015	2017	1,701	2017	1,182	2017	1,27
CI	2013–2014	2015	1,564	2016	1,437	2015	1,63
CJ	2013–2015	2015	3,290	2016	1,166	2017	1,14
СК	2012–2014	2015	2,260	2016	1,616	2017	1,32
CL	2013	2015	1,957	2016	1,183	2016	1,18
CM	2013	2015	1,422	2015	1,088	2017	1,21

Ранговый анализ структурных особенностей обрабатывающей промышленности

Ранговая корреляция используется для исследования отношения переменных, упорядоченных по возрастанию или убыванию их значений. Коэффициенты ранговой корреляции возможно использовать независимо от характера распределения коррелирующих признаков.

Для количественной оценки рациональности структуры использовался коэффициент Спирмена, рассчитанный на основе разницы рангов d . Его значимость проверялась по критерию Стьюдента.

Анализ проводился на основе усредненных показателей структуры соответствующих показателей за анализируемый период (табл. 6). Изучалась взаимосвязь между уровнем инвестиций в каждую отрасль и ее уровнем по таким показателям, как объемы производства, прибыль, рентабельность, экспорт.

Результаты представлены в табл. 7.

Рациональность структуры инвестиционных потоков с точки зрения направлений их по отраслям обрабатывающей промышленности была изучена с помощью рангового анализа. Применительно к инвестиционным процессам рациональность будет означать максимальное вложение средств в те направления, которые будут приносить максимальную отдачу.

Для визуализации результатов рангового анализа строится график (аналог корреляционного поля), на котором по осям координат откладываются ранги по соответствующим показателям. Каждая точка на графике соответствует месту конкретного объекта. Диагональ из левого нижнего угла в правый верхний угол показывает идеальную структуру, когда наблюдается полное соответствие рангов по каждому из двух показателей. Чем ближе точки расположены к данной линии, тем выше коэффициент корреляции рангов и тем эф-

фективнее структура.

Результаты рангового анализа
структурных особенностей инвестици-

онных процессов в обрабатывающей
промышленности приведены на рис. 2.

Табл. 6. Исходные данные для рангового анализа

В процентах

Отрасль	Доля инвестиций	Доля в производстве	Доля в прибыли	Рентабельность	Доля в экспорте
CA	11,13	24,13	22,00	8,93	17,40
CB	2,21	3,73	3,81	10,53	4,95
CC	10,28	3,72	3,14	5,94	3,76
CD	7,85	14,67	6,57	4,49	16,40
CE	11,15	9,25	18,19	15,17	14,86
CF	1,44	1,16	2,56	22,87	0,66
CG	7,56	7,36	4,32	6,43	5,90
CH	4,18	6,37	4,21	6,03	8,09
CI	0,63	1,52	1,87	11,36	1,62
CJ	0,98	2,57	2,12	6,53	3,69
CK	2,81	5,94	7,11	9,76	10,14
CL	3,24	3,04	2,17	5,26	5,42
CM	2,32	3,56	4,52	10,82	2,62

Табл. 7. Таблица рангов

Отрасль	Ранг инвести- ций	Производство		Прибыль		Рентабельность		Экспорт	
		Ранг	d	Ранг	d	Ранг	d	Ранг	d
CA	2	1	1	1	1	7	-5	1	1
CB	10	7	3	8	2	5	5	8	2
CC	3	8	-5	9	-6	11	-8	9	-6
CD	4	2	2	4	0	13	-9	2	2
CE	1	3	-2	2	-1	2	-1	3	-2
CF	11	13	-2	10	1	1	10	13	-2
CG	5	4	1	6	-1	9	-4	6	-1
CH	6	5	1	7	-1	10	-4	5	1
CI	13	12	1	13	0	3	10	12	1
CJ	12	11	1	12	0	8	4	10	2
CK	8	6	2	3	5	6	2	4	4
CL	7	10	-3	11	-4	12	-5	7	0
CM	9	9	0	5	4	4	5	11	-2
Коэффициент корреляции Спирмена		0,82		0,72		-0,37		0,78	
t расчетное		4,82		3,44		-1,31		4,14	
t _{0,05;11} табличное		2,20							

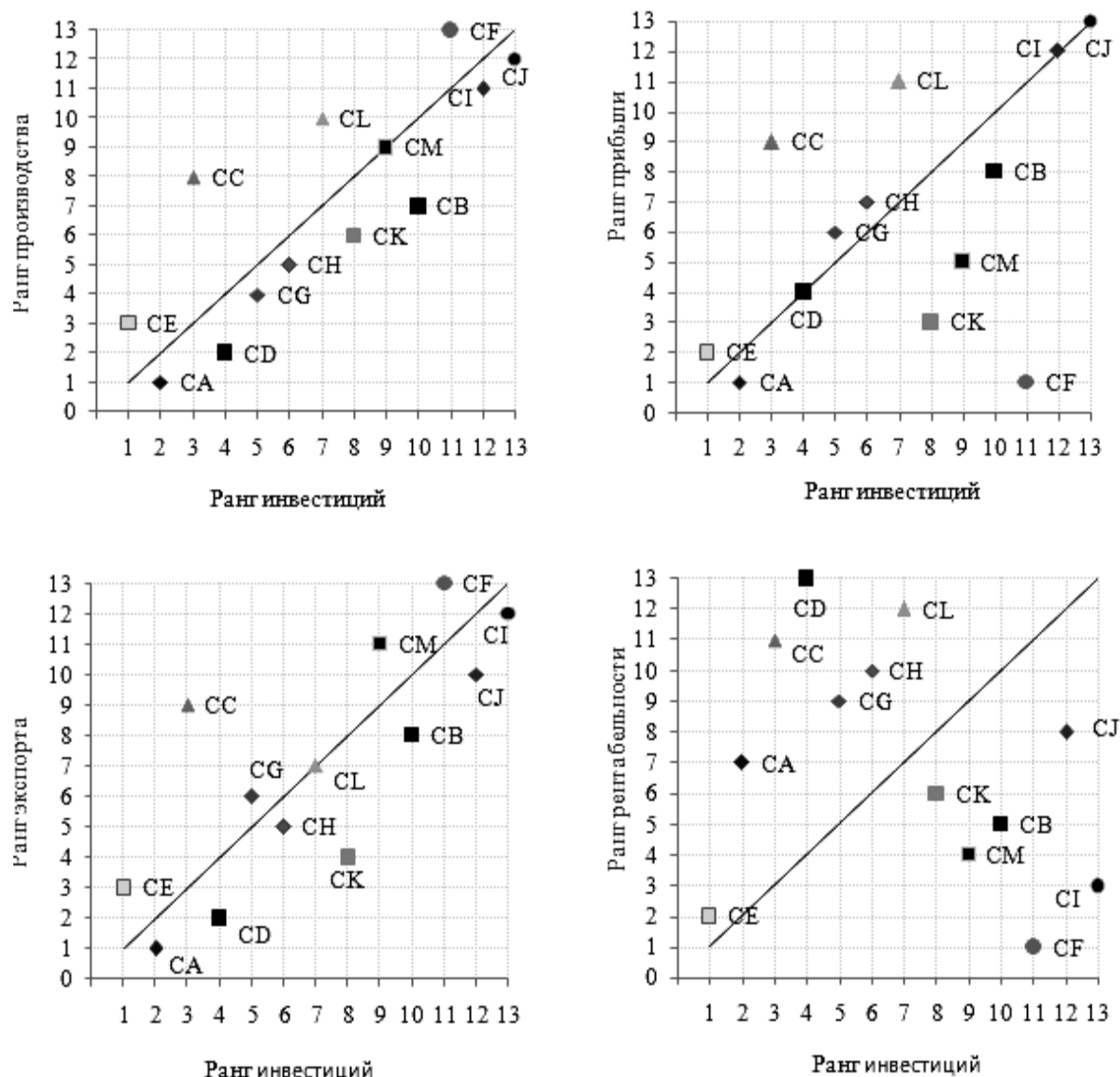


Рис. 2. Результаты рангового анализа

Ранговый анализ, как и корреляционный, подтвердил отсутствие принципа максимальной отдачи на капиталовложения при распределении инвестиционных потоков между отраслями обрабатывающей промышленности. Наибольшая зависимость прослеживается, как и прежде, между размерами инвестиций и показателями масштаба отраслей. Отрицательный коэффициент корреляции рангов инвестиций и рентабельности объясняет сокращение доступных инвестиционных ресурсов их замораживанием в низкоэффективных направлениях.

Отрицательная разница рангов означает, что на данную отрасль приходится большая доля инвестиций, чем ее вклад в общий эффект. Антилидером по данному критерию эффективности капиталовложений является деревообрабатывающая отрасль (CC) с максимальными отрицательными значениями разницы рангов.

Выводы

Результаты анализа подтвердили существование эффекта от проводимой модернизации, однако существует

проблема дефицита инвестиционных ресурсов. Так, доля капиталовложений в обрабатывающую промышленность снизилась с 9...10 % от ВВП в 2011–2014 гг. до 8,5 % в 2015 г., а на протяжении последних 4 лет остаётся на уровне 5,7...5,8 %. Таким образом, вложенные ранее средства не приносят быстрой отдачи и дальнейшая инвестицион-

ная активность снижается. При принятии решения о выборе объекта инвестирования следует формировать сбалансированный по срокам, видам и эффективности портфель проектов [5]. Краткосрочные коммерческие проекты будут приносить быструю отдачу, за счет чего станет возможным финансировать долгосрочные и социальные.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Промышленность Республики Беларусь, 2019: стат. сб. [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by>. – Дата доступа: 01.09.2020.
2. Инвестиции и строительство в Республике Беларусь, 2019: стат. сб. [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by>. – Дата доступа: 01.09.2020.
3. **Лобанова, Т. М.** Исследование влияния инвестиционных процессов на развитие отраслей обрабатывающей промышленности / Т. М. Лобанова // Весн. Магілёўскага дзярж. ун-та імя А. А. Куляшова. Сер. Д. Эканоміка, сацыялогія, права. – 2020. – № 2 (56). – С. 12–19.
4. **Канторович, Г. Г.** Удельные затраты в отраслях российской промышленности: ведут ли прямые инвестиции к их снижению? / Г. Г. Канторович, Е. Ю. Назруллаева // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2009. – Т. 13, № 1. – С. 59–79.
5. **Лобанова, Т. М.** Оценка влияния инвестиций на эффективность отраслей обрабатывающей промышленности / Т. М. Лобанова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 393.

Статья сдана в редакцию 12 октября 2020 года

Лобанова Татьяна Михайловна, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: yatm@rambler.ru.

Lobanova Tatiana Mikhailovna, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: yatm@rambler.ru.

ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 4(69) 2020

Ответственный за выпуск

И. В. Брискина

Оформление обложки

Е. С. Лустенкова

Дизайн и компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр-т Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 331, 212000, г. Могилев. Телефон: 23-00-07, e-mail: bru@bru.mogilev.by.

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 08.02.2010.

Подписано в печать 30.11.2020. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 16,74. Уч.-изд. л. 8,94. Тираж 100 экз. Заказ 5448.

Отпечатано в унитарном полиграфическом коммунальном предприятии «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя». ЛП 02330/23 от 30.12.2013. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.