

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Tom I.
Rok 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваўне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машынабудавання і машыназнаўства, матэрыялазнаўства і металургіі, хімічных тэхналогій.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия В. Промышленность. прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в областимашиностроения и машиноведения, материаловедения и металлургии, химических технологий.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY
Series B. Industry. Applied sciences

Series B includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in mechanical engineering and machine science, material authority and metallurgy, applied chemistry.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Адрес редакции:

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 53 34 58, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск: В.П. Иванов, Н.Н. Попок, А.А. Ермак.

Редактор И.Н. Чапкевич.

Подписано к печати 06.04.2020. Бумага офсетная 65 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.

Усл. печ. л. 9,76. Уч.-изд. л. 11,77. Тираж 100 экз. Заказ 229.

УДК 621. 9.06 - 529

**КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЗУБОФРЕЗЕРНОГО СТАНКА
С ГИБРИДНЫМИ ФОРМООБРАЗУЮЩИМИ ГРУППАМИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС С НАКЛОННЫМИ ЗУБЬЯМИ**

*канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрены конструктивные особенности цилиндрических зубчатых колес с линией зубьев на делительном конусе. Такие зубчатые колеса при сборке обеспечивают минимальные боковые зазоры и циклические ошибки в пределах срока службы. Показано, что модернизация базовых моделей зубообрабатывающих станков на основе изменения их компоновки для обработки колес с наклонными зубьями снижает коэффициенты универсальности и мобильности этих станков. Предложен способ зубофрезерования цилиндрических колес с наклонными зубьями на основе кинематического воспроизведения траектории движения инструмента по делительному конусу. Разработана реализация данного способа в кинематической структуре зубофрезерного станка с гибридными, мехатронными формообразующими группами.

Ключевые слова: кинематическая структура, зубофрезерный станок, цилиндрические зубчатые колеса, формообразующие группы.

Введение. Конструктивная особенность цилиндрических зубчатых колес (ЦЗК) с наклонными по делительной окружности зубьями – использование делительного конуса вместо делительного цилиндра, характерного для традиционных зубчатых колес. При использовании делительного конуса толщина зуба вдоль его линии равномерно уменьшается от большего основания делительного конуса к его меньшему основанию. Эта конструктивная особенность позволяет регулировать боковой зазор в зубчатых передачах посредством осевого смещения колес. В итоге обеспечиваются в пределах срока службы передачи минимальные величины бокового зазора и циклической ошибки. Такие ЦЗК как с прямыми, так и с винтовыми зубьями используются в передачах, от которых требуется высокая кинематическая точность и минимальные боковые зазоры.

Постановка задачи. Колеса с наклонными зубьями обрабатывают, как правило, зуборезными долбляками и червячными фрезами соответственно на зубодолбежных и зубофрезерных станках, модернизированных на основе их компоновки для нарезания рассматриваемого вида ЦЗК. Модернизация базовых моделей этих станков на этапе конструирования заключается посредством установки направляющих инструментального суппорта под углом к оси делительного стола, или посредством установки продольного стола, несущего делительный стол, под углом к траектории движения суппорта. Варианты модернизации на основе изменения компоновки снижают коэффициенты универсальности и мобильности базовых моделей зубообрабатывающих станков, так как их наладка на обработку традиционных ЦЗК или переналадка на иной угол наклона зубьев проблематична. Поэтому представляется целесообразным использование кинематического принципа воспроизведения траектории движения инструмента по делительному конусу при обработке ЦЗК с наклонными зубьями. Такое техническое решение усложняет кинематическую структуру станка с механическими связями из-за необходимости создания сложной формообразующей группы с соответствующим органом настройки на траекторию движения для воспроизведения линии зубьев на делительном конусе. Этот недостаток устраняется при замене сложных формообразующих групп с механическими связями сложными мехатронными формообразующими группами.

Разработка способа зубофрезерования ЦЗК с наклонными зубьями. На рисунке 1 приведена схема способа зубофрезерования червячной фрезой колес с наклонными зубьями [1]. Характеристический образ червячной фрезы – $\{M\}_K$, класс образования зубчатой поверхности – «обкат – касание» ($H^k - P$).

Согласно способу зубофрезерования червячной фрезой заготовку 1 устанавливают в исходное положение относительно червячной фрезы 2. Причем начальное и конечное положения фрезы в движении P_3 устанавливаются с учетом величины пути L , который складывается из высоты H зубчатого венца заготовки, верхнего K_1 и нижнего K_2 перебегов фрезы. Для воспроизведения линии зуба, являющейся направляющей при нарезании червячной фрезой, на делительном конусе 5 фрезе 2 необходимо сообщать два движения: традиционное движение P_3 продольной подачи – для зубофрезерования цилиндрических колес с линией зуба на цилиндре и дополнительное движение P_4 , согласованное с движением P_3 . Причем путь дополнительного движения P_4 определяется по формуле

$$l = L \operatorname{tg} \varphi,$$

где: l – путь дополнительного движения P_4 , мм; L – путь движения P_3 , мм; φ – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.

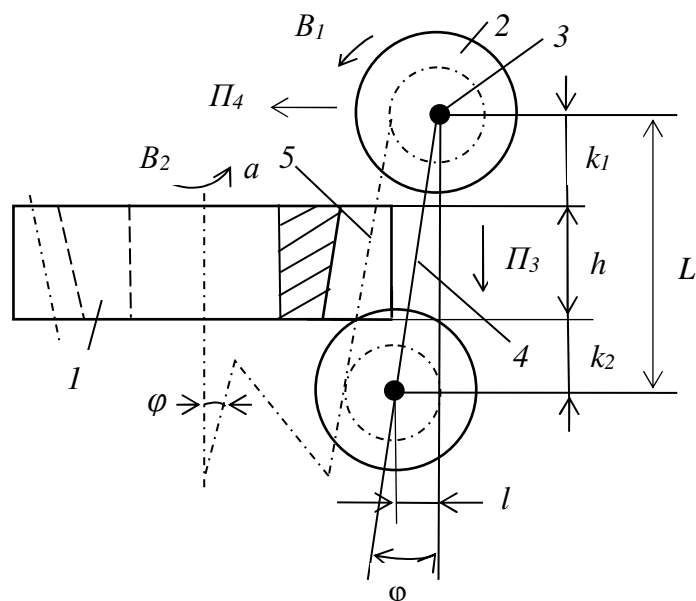


Рисунок 1. – Способ фрезерования цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями

Таким образом, при кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе в рассматриваемом способе зубофрезерования линия зуба должна воспроизводиться сложным двухэлементарным движением подачи $\Phi_s(P_3P_4)$. При этом движения обката $\Phi_v(B_1B_2)$, имитирующее зацепление червячной передачи, остается таким же, как у классического (пионерного) способа зубофрезерования червячными фрезами.

Движение B_1 скорости резания и движение P_3 продольной подачи являются нормируемыми характеристиками процесса зубофрезерования. Согласование движений B_2 и P_4 с движениями B_1 и P_3 соответственно осуществляется на основе следующих расчетных перемещений (РП): 1 оборот фрезы в движении $B_1 \rightarrow k/z$ оборота заготовки в движении B_2 ; L мм перемещения фрезы в движении $P_3 \rightarrow l$ мм перемещения фрезы в движении P_4 , где k – число заходов фрезы; z – число зубьев нарезаемого колеса.

При сообщении фрезе и заготовке сложных формообразующих движений $\Phi_O(B_1B_2)$ и $\Phi_H(P_3P_4)$ осуществляется нарезание цилиндрического колеса с наклонными зубьями. При этом движение $\Phi_v(B_1B_2)$ воспроизводит на заготовке профиль зубьев (образующую), а движение $\Phi_s(P_3P_4)$ перемещает ось 3 фрезы по результирующей траектории 4, эквидистантной делительному конусу 5 обрабатываемого колеса.

Модернизация типовой кинематической структуры зубофрезерного станка. На рисунке 2 приведена кинематическая структура зубофрезерного станка с электронными связями для обработки косозубых и прямозубых ЦЗК с наклонными зубьями. Для обработки косозубых колес схема содержит две сложные, гибридные, формообразующие группы $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(B_3P_3P_4)$. Для обработки прямозубых колес трехэлементарная группа подачи преобразуется в двухэлементарную $\Phi_s(P_3P_4)$. Обе группы связаны общим задатчиком – эталонным генератором.

Группа $\Phi_v(B_1B_2)$ воспроизводит образующую – профиль зубьев. Ее внутренняя связь – гибридная (мехатронная) цепь, соединяющая шпиндель 1 червячной фрезы 2 со шпинделем (делительным столом) 3 обрабатываемой заготовки 4: $B_1 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow M_1 \rightarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow B_2$.

Электронный вал (рисунок 3): усилитель мощности 9 $\rightarrow$ импульсно-аналоговый преобразователь 10 $\rightarrow$ делитель частоты 11 $\rightarrow$ разъем $K_2 \rightarrow$ разъем $K_1 \rightarrow$ делитель частоты 12 $\rightarrow$ импульсно-аналоговый преобразователь 13 $\rightarrow$ параллельный сумматор 14 $\rightarrow$ усилитель мощности 15.

Внешняя связь: импульсный генератор 16 $\rightarrow$ разъем $K_2 \rightarrow K_1$ (звено соединения связей).

Движение $\Phi_v(B_1B_2)$ имеет замкнутую траекторию. Поэтому группа настраивается на два параметра: на траекторию – делителем частоты 11; на скорость резания – делителем частоты 12.

Группа $\Phi_s(B_3P_3P_4)$ воспроизводит направляющую – винтовую линию зубьев на делительном конусе. Эта группа во внутренней связи содержит две гибридные цепи. Первая цепь создает потенциальную возможность воспроизведения прямой линии зубьев на делительном конусе, вторая – потенциальную возможность преобразования прямой линии в винтовую. Первая цепь (см. Рисунок 2) обеспечивает функциональную связь суппорта фрезы 2 с продольным столом, несущим делительный стол (шпиндель) 3 обрабатываемой заготовки 4. Ее структура: $P_3 \rightarrow TB_1 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow M_3 \rightarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_4 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow TB_2 \rightarrow P_4$.

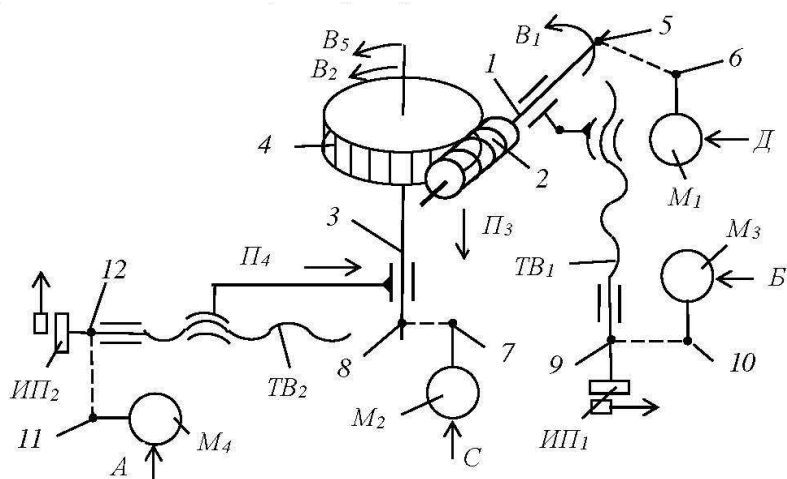


Рисунок 2. – Схема приводов зубофрезерного станка для обработки колес с наклонными зубьями

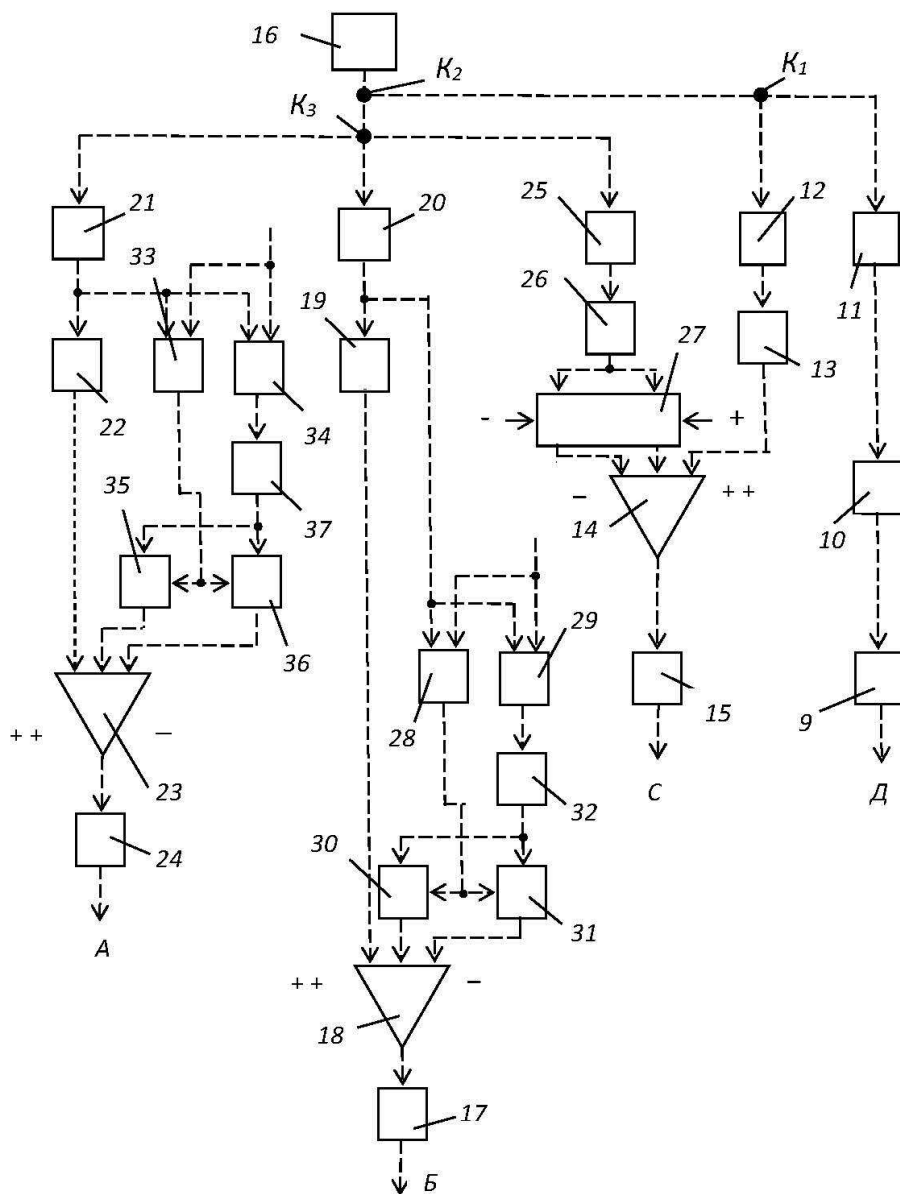


Рисунок 3. – Система синхронизации исполнительных органов станка по схеме равнозначных координат

Электронный вал (см. Рисунок 3): усилитель мощности 17 → параллельный сумматор 18 → импульсно-аналоговый преобразователь 19 → делитель частоты 20 → разъем K_3 → делитель частоты 21 → импульсно-аналоговый преобразователь 22 → параллельный сумматор 23 → усилитель мощности 24.

Вторая цепь (см. Рисунок 2) обеспечивает функциональную связь суппорта фрезы 2 со шпинделем (делительным столом) 3 обрабатываемой заготовки 4. Ее структура: $P_3 \rightarrow TB_1 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow M_3 \rightarrow$ электронный вал $\rightarrow M_2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow B_5$.

Электронный вал (см. Рисунок 3): усилитель мощности 17 → параллельный сумматор 18 → импульсно-аналоговый преобразователь 19 → делитель частоты 20 → разъем K_3 → делитель частоты 25 → импульсно-аналоговый преобразователь 26 → ключ (логический элемент 2И) 27 → параллельный сумматор 14 → усилитель мощности 15.

Внешняя связь: импульсный генератор 16 → разъем K_3 (звено соединения связей).

Движение $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ имеет незамкнутую траекторию. Поэтому группа настраивается на четыре параметра: 1) траекторию – делителями частоты 21 и 25; 2) скорость подачи – делителем частоты 20; 3) исходную точку и 4) путь – программно.

Внутренняя связь группы $\Phi_s(B_1B_2)$ и вторая цепь внутренней связи группы $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ имеют общий участок: параллельный сумматор 14 → усилитель мощности 15. Это обеспечивает физическое сложение движений B_2 и B_5 на шпинделе делительного стола при обработке косозубых колес. При этом параллельный сумматор 14 выполняет такую же функцию, что и механический дифференциал в станках с механическими связями.

В сложных гибридных формообразующих группах основным источником погрешностей, снижающих качественные показатели обрабатываемой поверхности, является девиация механики исполнительных органов этих групп. В мехатронных формообразующих группах явление девиации можно устранить посредством модификации внутренних связей, обеспечивающей непрерывную двухстороннюю коррекцию задающих сигналов управления электродвигателями исполнительных органов. В рассматриваемом станке основными источниками девиации являются приводы исполнительных движений P_3 и P_4 . Для устранения девиации механики этих приводов в обе цепи внутренней связи группы приводов подач $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ включены модули адаптивной двухсторонней коррекции управляющего сигнала.

Модуль коррекции управляющего сигнала движения P_3 содержит знаковый 28 и фазовый 29 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора соединен с управляющим входом ключа 30, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 31, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 32 с аналоговыми входами ключей 30 и 31. Выход ключа 30 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 18, а выход ключа 31 – с входом вычитания этого сумматора. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с делителем частоты 20, вторые – с импульсным измерительным преобразователем $ИП_1$, установленным на тяговом валу TB_1 (см. Рисунок 3).

Аналогично выполнен модуль коррекции управляющего сигнала движения P_4 . Этот модуль содержит знаковый 33 и фазовый 34 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора соединен с управляющим входом ключа 35, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 36, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 37 с аналоговыми входами ключей 35 и 36. Выход ключа 35 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 23, а выход ключа 36 – с входом вычитания этого сумматора. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с делителем частоты 21, а вторые входы – с импульсным измерительным преобразователем $ИП_2$, установленным на тяговом валу TB_2 (см. рисунок 2).

При настройке станка выводят коэффициенты деления k_v , k_x , k_s , k_y , k_z , устанавливаемые при наладке на делителях частоты, соответственно, 11, 12, 20, 27, 25. Для вывода коэффициентов деления можно использовать методику, рассмотренную в работах [2; 3].

Согласно нормативам резания при зубофрезеровании червячными фрезами скорость резания принимается по круговой частоте фрезы (движение B_1), а подача по ее перемещению – параллельно оси заготовки (движение P_3). Это является основанием для задания коэффициентов деления k_v и k_s на делителях частоты, соответственно, 11 и 20. Коэффициент деления k_v задают из условия, при котором на выходе делителя частоты 11 действует задающий сигнал – аналог круговой частоты шпинделя фрезы, соответствующий заданной скорости резания. Аналогично задают коэффициент деления k_s , при котором на выходе делителя частоты 20 действует сигнал-аналог, соответствующий продольной подаче фрезы.

Внутренняя связь и расчетная цепь группы движения обката $\Phi_v(B_1B_2)$ совпадают. Поэтому РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката: 1 об. шпинделя 1 фрезы (B_1) → k/z об. шпинделя 3 заготовки (B_2), где k – число заходов червячной фрезы; z – число нарезаемых зубьев.

Уравнение кинематической цепи (УКЦ) станочного зацепления:

$$k/z = Ic_1n_1/n_2,$$

где: c_1 – произведение передаточных отношений постоянных механических передач расчетной цепи; n_1 – круговая частота электродвигателя M_1 , соответствующая заданной скорости резания, мин^{-1} ; n_2 – круговая частота электродвигателя M_2 , необходимая для обеспечения функциональной связи в движении обката.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда,

$$\kappa/z = 1c_1k_v/k_x.$$

Следовательно

$$k_x = (c_1z/\kappa)k_v,$$

где: k_v – коэффициент деления, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_1 ; k_x – коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 12 для обеспечения функциональной связи шпинделя фрезы и шпинделя заготовки.

Первая цепь внутренней связи группы $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$ и расчетная цепь для определения коэффициента деления k_4 совпадают. Следовательно, РП для исполнительных органов этой цепи можно записать в виде: L мм путь фрезы в движении $\Pi_3 \rightarrow l$ мм путь фрезы в движении Π_4 , где: $l = L \operatorname{tg} \varphi = (h + k_1 + k_2) \operatorname{tg} \varphi$; h – высота зубчатого венца обрабатываемого ЦЗК; k_1 – верхний перебег фрезы; k_2 – нижний перебег фрезы; φ – угол наклона линии зубьев обрабатываемого колеса.

Тогда УКЦ имеет вид:

$$l = L(c_2 = i_0 t_{TB1}/t_{TB2}) n_3/n_4,$$

где: i_0 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи; t_{TB1} и t_{TB2} – шаги тяговых валов.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$l = L(c_2 = i_0 t_{TB1}/t_{TB2}) k_s/k_y.$$

Из этого выражения, после соответствующих преобразований, следует:

$$k_y = c_2 k_s / \operatorname{tg} \varphi,$$

где: k_s – коэффициент деления, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_3 ; k_y – коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 21 для обеспечения функциональной связи движений Π_3 и Π_4 .

Вторая цепь внутренней связи группы $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$ и расчетная цепь для определения коэффициента деления k_z совпадают. Следовательно, РП для исполнительных органов этой цепи можно записать в виде: T мм перемещения фрезы (Π_3) $\rightarrow 1$ об. заготовки (B_5).

Тогда УКЦ имеет вид:

$$1 = (T/t_{TB1} \cdot (n_3/n_5) \cdot c_2,$$

где: T – шаг винтовой линии обрабатываемых зубьев; c_2 – произведения постоянных передаточных отношений механических передач расчетной цепи; n_3 – круговая частота электродвигателя M_3 , соответствующая заданной подаче; n_5 – круговая частота электродвигателя M_2 , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$1 = (T/t_{TB1}) \cdot (k_s/k_z) c_2.$$

Исходя из данного выражения определяется коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 25 :

$$k_z = k_s c_2 (T/t_{TB1}).$$

Шпиндель заготовки является исполнительным органом обоих станочных зацеплений. При работе устройства результирующая круговая частота этого шпинделя представляет собой математическую сумму $B_2 \pm B_5$ двух движений B_2 и B_5 , образующих совместно соответственно с движениями B_1 и Π_3 движение обката $\Phi_v(B_1B_2)$ и винтовое движение подачи $\Phi_v(B_5\Pi_3\Pi_4)$. Суммирование движений B_2 и B_4 осуществляется параллельным сумматором 14 . При этом выбор знака в математической сумме движений зависит от направления винтовых линий зубьев обрабатываемого колеса и червячной фрезы. Знак «+» соответствует условию, когда винтовые линии одноименны, например, обе левые, знак «−» соответствует условию, когда винтовые линии разноименные. Необходимый знак устанавливается при наладке станка подачей управляющего сигнала на соответствующий, потенциальный вход ключа 27 .

Функционирование сложных гибридных формообразующих групп станка осуществляется следующим образом. Эталонный генератор 16 вырабатывает импульсный, высокочастотный сигнал. Этот сигнал поступает на делители частоты 11 , 12 , 20 , 21 , 25 , в которых происходит его деление в соответствии с коэффициентами k_v , k_x , k_s , k_y , k_z .

Сигнал с выхода делителя частоты 11 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 10 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через усилитель мощности 9 поступает на управляемый электродвигатель M_1 , сообщающий шпинделю 1 инструмента движение B_1 , соответ-

ствующее скорости резания. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 12 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 13 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 14 и усилитель мощности 15 сигнал поступает на управляемый электродвигатель M_2 , который сообщает движение B_2 шпинделю 3 заготовки 4 обрабатываемого колеса. В итоге такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение профиля зубчатого колеса формообразующим движением $\Phi_v(B_1B_2)$.

Параллельно сигнал с выхода делителя частоты 20 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 19 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 18 и усилитель мощности 17 поступает на управляемый электродвигатель M_3 . Этот электродвигатель посредством TB_1 сообщает суппорту фрезы движение Π_3 , соответствующее продольной подаче инструмента. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 21 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 22 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 23, и усилитель мощности 24 – сигнал поступает на управляемый электродвигатель M_4 . Электродвигатель, посредством TB_2 , сообщает продольному столу, несущему делительный стол с заготовкой, движение Π_4 , соответствующее подаче заготовки. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 25 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 26 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя сигнал поступает через ключ 27 (логический элемент 2И) на второй вход сложения или на вход вычитания параллельного сумматора 14. В итоге шпинделю заготовки сообщается дополнительное движение B_5 , математически суммирующееся с движением B_2 . В результате такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение винтовой линии зубьев на делительном конусе зубчатого колеса формообразующим движением $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$.

В процессе функционирования формообразующих групп осуществляется двухсторонняя коррекция действующих сигналов на выходах параллельных сумматоров 18 и 23. В системах управления станочным оборудованием такую двухстороннюю коррекцию функционирования исполнительных органов принято называть адаптивным управлением.

Коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 18, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 28 и фазового 29 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты 20. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с $ИП_1$ (см. Рисунок 2) поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения Π_3 суппорта фрезы. В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании суппорта от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 30 и 31. Синхронно на выходе фазового дискриминатора 29 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 32 поступает на аналоговые входы ключей 30 и 31. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 18 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании суппорта от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 30, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 18, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 31, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге, в параллельном сумматоре 18 происходит, в зависимости от знака погрешности, увеличение или уменьшение управляющего сигнала, то есть происходит непрерывная двухсторонняя коррекция движения подачи Π_3 исполнительного органа – суппорта фрезы относительно номинального значения.

Аналогично осуществляется коррекция задающего сигнала на выходе параллельного сумматора 23. На первых входах знакового 33 и фазового 34 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты 21. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с $ИП_2$ (см. Рисунок 2) поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения Π_4 продольного стола, несущего делительный стол (шпиндель 3). В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании продольного стола от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 35 и 36. Синхронно на выходе фазового дискриминатора 34 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 37 поступает на аналоговые входы ключей 35 и 36. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 23 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании продольного стола от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 35, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 23, а при опережении – через ключ 36, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 23 происходит, в зависимости от знака погрешности, увеличение или уменьшение управляющего сигнала, то есть непре-

рывная двухсторонняя коррекция движения подачи P_4 исполнительного органа – продольного стола – относительно номинального значения.

Рассмотренная структурная схемы также обеспечивает, при соответствующей переналадке, обработку прямозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном конусе и на обработку классических косозубых и прямозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном цилиндре.

При обработке прямозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном конусе отключается делитель частоты 25. При этом трехэлементарная формообразующая группа $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ преобразуется в двухэлементарную группу $\Phi_s(P_3P_4)$. При обработке косозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном цилиндре отключается делитель частоты 21. При этом трехэлементарная формообразующая группа $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ преобразуется в двухэлементарную группу $\Phi_s(B_5P_3)$. При обработке прямозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном цилиндре отключаются делители частоты 21 и 25. При этом трехэлементарная формообразующая группа $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ преобразуется в элементарную группу $\Phi_s(P_3)$.

Заключение. Преобразование элементарной формообразующей группы воспроизведения линии зубьев традиционных ЦЗК в пионерном способе зубофрезерования червячными фрезами в сложную формообразующую группу обеспечивает возможность обработки зубчатых колес с линией зубьев на делительном конусе. Замена сложных формообразующих групп с механическими связями гибридными мехатронными формообразующими группами существенно упрощает механику формообразующих групп зубофрезерного станка и обеспечивает повышение точности их функционирования. Предложена и описана на языке современной парадигмы познания станочного оборудования [4] кинематическая структура зубофрезерного станка с электронными связями в сложных гибридных формообразующих группах для обработки ЦЗК с наклонными зубьями. Замена в предложенной мехатронной структурной схеме станка механических органов настройки параметров исполнительных движений электронными аналогами обеспечивает повышение качества обработки ЦЗК и снижает трудоемкость переналадки станка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации: пат. 6134 (BY) В 23F5/12 / А.И. Голембиевский; заявитель Полоц. гос. ун-т – опубл. 29.12.2003 // Афіційний бюл. / Нац. центр. інтелектуал. власності. – 2012.
2. Голембиевский, А.И. Эволюция развития сложных формообразующих групп металлорежущих станков / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 2–8.
3. Голембиевский, А.И. Эволюция развития кинематической структуры металлорежущих станков для зуботочения обкатным резцом типа долбяка / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. 2018. – № 3. – С. 2–12.
4. Голембиевский, А. Эволюция парадигмы познания металлорежущих станков / А. Голембиевский. – Саарбрюкен: Akademik Publishing LAP LAMBERT, 2019 – 152 с.

Поступила 04.09.2019

KINEMATIC STRUCTURE OF THE GEAR CUTTING MACHINE WITH HYBRID FORMING GROUPS FOR TREATING CYLINDRICAL WHEELS WITH INCLINED TEETH

A. GOLEMBIEVSKI

The design features of cylindrical gears with a line of teeth on a pitch cone are considered. Such gears during assembly provide minimal lateral clearances and cyclical errors within the service life. It is shown that the modernization of basic models of gear-processing machines based on changes in their layout for machining wheels with inclined teeth reduces the universality and mobility coefficients of these machines. A method for gear milling of cylindrical wheels with inclined teeth is proposed based on the kinematic reproduction of the tool movement trajectory along a separation cone. The implementation of this method in the kinematic structure of a gear milling machine with hybrid, mechatronic forming groups has been developed.

Keywords: kinematic structure, gear milling machine, cylindrical gears, forming groups.

УДК 621. 91. 01

АНАЛИЗ СХЕМЫ ОБРАБОТКИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭКСЦЕНТРИЧНО УСТАНОВЛЕННЫМ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВРАЩАЮЩИМСЯ КРУГЛЫМ РЕЗЦОМ

д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
А.Н. СЕЛИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрена схема обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным относительно оси вращения круглым резцом, принудительное вращение которого согласовано с вращением заготовки в соответствии с числом граней обработанной поверхности. Аналитически исследовано влияние на геометрию формируемой синусоидальной поверхности геометрических и кинематических параметров схемы обработки, установлены зависимости для расчета рабочих углов резца и закономерности их изменения в процессе обработки, обусловленные геометрией профиля формируемой поверхности.

Ключевые слова: синусоидальная поверхность, схема обработки, геометрия профиля, рабочие углы инструмента.

Введение. Профильные бесшпоночные соединения все шире применяют вместо шлицевых и шпоночных в трансмиссиях машин и механизмов, а также в режущих и вспомогательных инструментах благодаря более высоким эксплуатационным характеристикам при меньшей стоимости изготовления [1]. Однако профильные соединения не нашли широкого применения в отечественном машиностроении, что обусловлено, в частности, недостаточной технологической отработкой процессов формообразования профильных поверхностей, а также отсутствием специализированного металлорежущего оборудования, режущих инструментов и контрольно-измерительных средств, необходимых для изготовления профильных деталей. В связи с этим актуальна разработка и реализация прогрессивных схем формообразования профильных поверхностей, реализуемых на универсальных станках простыми по конструкции режущими инструментами.

При механической обработке профильная поверхность образуется вследствие непрерывного периодического изменения расстояния между осью вращения заготовки и формообразующим элементом режущего инструмента. Например, при точении профильной поверхности призматическим резцом это достигается сообщением ему возвратно-поступательного движения, согласованного с вращением заготовки. При этом частота возвратно-поступательного движения резца задается в m раз больше частоты вращения заготовки (где m – число выступов профиля), что обуславливает неудовлетворительные динамические условия работы станка, ограничивает частоту вращения шпинделя и производительность обработки. Поэтому предпочтительны схемы обработки профильных поверхностей, например, резцовыми головками, планетарным или ротационным точением [2], без возвратно-поступательного движения инструмента.

Более высокая стойкость инструмента, его производительность и качество поверхности при ротационном точении цилиндрических поверхностей [3–5] обуславливают целесообразность применения этого метода для обработки профильных поверхностей. Поэтому заслуживает внимания реализуемая на шлицефрезерном станке [6] схема обработки таких поверхностей некруглым резцом или круглым эксцентрично установленным резцом [7] с торцовой передней поверхностью (Рисунок 1), аналогичная ротационному точению круглых цилиндрических поверхностей самовращающимися или принудительно вращающимися инструментами [4; 5]. При вращении эксцентрично установленного круглого резца 2 (см. Рисунок 1) вследствие непрерывного изменения расстояния между его режущей кромкой и осью вращения заготовки 1, формируется некруглый профиль обработанной поверхности.

От традиционной схемы ротационного точения круглых поверхностей рассматриваемая схема обработки профильных поверхностей отличается, во-первых, эксцентричной установкой круглого резца относительно оси его вращения, при этом величина эксцентриситета e в 2 раза меньше высоты выступов h профиля над вписанной в него окружностью радиусом r_0 , т.е. зависит от геометрии обработанной поверхности. Другое отличие, обусловленное схемой формообразования профиля, заключается в том, что угловая скорость резца 2 в m раз больше угловой скорости заготовки 1. Поэтому кинематический коэффициент, равный отношению окружных скоростей резца и заготовки, в разы больше, чем при ротационном точении круглых поверхностей [3–5].

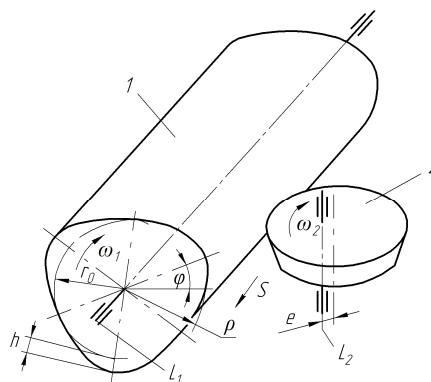


Рисунок 1. – Схема ротационного точения профильной поверхности эксцентрично установленным круглым резцом

Рассмотрим влияние указанных отличительных признаков рассматриваемого метода обработки на геометрию профильной поверхности и рабочие углы инструмента.

Геометрия формируемого профиля. При сообщении резцу 2, установленному с эксцентриситетом e относительно оси L_2 его вращения, и заготовке 1 согласованных вращательных движений вокруг скрещивающихся под прямым углом осей L_2 и L_1 с угловыми скоростями соответственно ω_2 и ω_1 , при $\omega_2 / \omega_1 = m$ образуется поверхность, профиль которой описывается зависимостью [2]

$$r = r_{cp} - e \cos m\varphi, \quad (1)$$

где: φ – текущее значение угла поворота заготовки; r_{cp} – средний радиус некруглого профиля, определяемый по формуле $r_{cp} = r_0 + e$.

Рассмотрим влияние эксцентриситета установки резца e на геометрию формируемого профиля. Из конструктивных и технологических соображений предпочтителен выпуклый профиль, у которого кривизна в каждой точке положительна. В этом случае отсутствуют ограничения на диаметр инструмента при обработке шлифованием или поверхностным пластическим деформированием. При наличии же вогнутых участков радиус инструмента не должен превышать радиус впадины профиля. Кроме того, при выпуклой форме профиля в меньшем диапазоне изменяются рабочие углы режущего лезвия, что улучшает условия резания. Кроме того, контроль вогнутого профиля представляет определенные трудности, так как требуется специальный мерительный инструмент. В этой связи определим условие, при котором кривизна в каждой точке профильной поверхности положительна.

Формула для вычисления кривизны K_p кривой, заданной уравнением в полярных координатах, имеет вид [8]:

$$K_p = \frac{\rho^2 + 2\rho'^2 - \rho\rho''}{(\rho^2 + \rho'^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где: ρ – уравнение кривой в полярных координатах; ρ' – первая производная от ρ ; ρ'' – вторая производная от ρ .

На основании (1) имеем: $\rho' = e \sin(m\varphi)m$; $\rho'' = e \cos(m\varphi)m^2$. Тогда

$$K_p = \frac{(r_c - e \cos(m\varphi))^2 - 2 \cdot (e \sin(m\varphi)m)^2 - (r_c - e \cos(m\varphi)) \cdot (e \cos(m\varphi)m^2)}{((r_c - e \cos(m\varphi))^2 + (e \sin(m\varphi)m)^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

Кривизна K_p равна нулю, если

$$(r_c - e \cos(m\varphi))^2 - 2(e \sin(m\varphi)m)^2 - (r_c - e \cos(m\varphi)) \cdot (e \cos(m\varphi)m^2) = 0. \quad (4)$$

Изменение знака кривизны возможно в наименее удаленных от центра точках, в частности при $\varphi = 0$. Тогда формула (4) примет следующий вид:

$$r_c^2 - 2r_c e + e^2 - r_c m^2 e + e^2 m^2 = 0. \quad (5)$$

Следовательно,

$$K_p = \frac{e}{r_c} = \frac{1}{m^2 + 1}. \quad (6)$$

Выражение (6) определяет граничные условия выпуклости и вогнутости формируемого профиля, получаемого эксцентрично установленным круглым ротационным резцом по рассматриваемой схеме обработки. Если во всех точках профиля $\frac{e}{r_c} < \frac{1}{m^2 + 1}$, он является выпуклым. В точках, где $\frac{e}{r_c} > \frac{1}{m^2 + 1}$,

профиль вогнутый. Если же $\frac{e}{r_c} = \frac{1}{m^2 + 1}$, его кривизна равна нулю.

Рабочие углы инструмента. Процессы деформирования срезаемого слоя при превращении его в стружку и изнашивания контактных поверхностей резца зависят от его рабочих углов, образуемых в процессе резания. Рабочий угол наклона режущей кромки ротационного резца относительно вектора скорости резания в рассматриваемом случае зависит от количества выступов некруглого профиля, что приводит к существенному различию величин рабочих и статических углов инструмента. Определение рабочих углов инструмента рассмотрено ниже в соответствии с известными положениями кинематики резания.

На рисунке 2 представлена схема обработки синусоидальной цилиндрической поверхности принудительно вращающимся круглым резцом с внутренней конической передней поверхностью и наружной конической задней поверхностью.

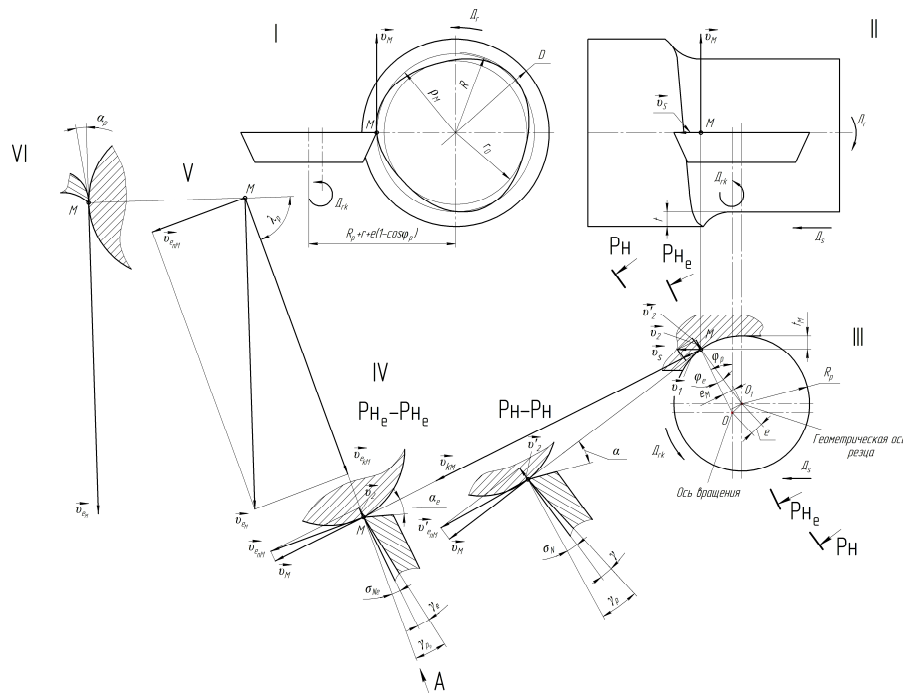


Рисунок 2. – Рабочие углы ротационного реза с передней внутренней конической поверхностью

Резец установлен с эксцентриситетом e и нулевым углом наклона режущей кромки. Рабочий угол наклона режущей кромки λ_p – угол между касательной к ней и плоскостью, перпендикулярной к вектору скорости результирующего движения резания. Рабочий задний угол α_p инструмента, измеряемый в направлении вектора скорости результирующего движения резания, представляет собой угол между плоскостью, касательной к задней поверхности инструмента в рассматриваемой точке режущей кромки и плоскостью, касательной к поверхности резания в той же точке. Рабочий передний угол γ_p – это угол между плоскостью, перпендикулярной к вектору скорости результирующего движения резания, и касательной к передней поверхности инструмента, проведенной в направлении, нормальном к режущей кромке [4]. Поскольку касательная к передней поверхности инструмента проводится в направлении, нормальном к режущей кромке и, учитывая то, что ротационный резец установлен с эксцентриситетом, целесообразно ввести секущую плоскость (обозначим P_{He}), проведенную через рассматриваемую точку режущей кромки и ось вращения инструмента. Обозначим углы, находящиеся в плоскости P_{He} (см. Рисунок 2), γ_e , γ_{pe} , α_e (проекции переднего, переднего рабочего и заднего углов соответственно). Углы σ_{Ne} и σ_N вспомогательные, определяющие положение в пространстве проекции, касательной к траектории результирующего движения точки режущей кромки на плоскости $P_{He}\phi$ и P_H соответственно.

Определим углы α_p , γ_p и λ_p для рассматриваемой точки M режущей кромки. Каждая ее точка участвует одновременно в следующих движениях: вращательном движении резания со скоростью резания $\vec{v}_M$, движении подачи со скоростью $\vec{v}_s$ и вращательном (касательном) движении реза вокруг оси, не совпадающей с его геометрической осью, со скоростью $\vec{v}_{kM}$.

Скорость касательного движения v_{kM} определяется по зависимости

$$v_{kM} = 2\pi[R_p + e(1 - \cos \varphi_p)]n_p,$$

где: $n_p = mn_3$; φ_p – угол контакта, определяемый по формуле

$$\cos \varphi_p = \frac{r_{cp} - R}{e}. \quad (9)$$

Из рисунка 2

$$\gamma_{pe} = \sigma_{Ne} + \gamma_e; \quad \gamma_p = \sigma_N + \gamma; \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_p = \operatorname{tg}(\alpha + \sigma_{Ne}) \cos \lambda_p. \quad (8)$$

Вектор $\vec{v}_{eM}$ представляет собой вектор скорости результирующего движения резания, а векторы $\vec{v}_{e_{nM}}$ и $\vec{v}_{e_{kM}}$ – его составляющие в направлениях соответственно нормальном и касательном к режущей кромке в рассматриваемой точке M .

Вектор $\vec{v}_{e_{nM}}$ является проекцией вектора $\vec{v}_{eM}$ на плоскость P_{He} . Поскольку вектор $\vec{v}_{eM}$ можно считать касательным к поверхности резания на проекции II, его проекция (вектор $\vec{v}_{e_{nM}}$) будет также касательной к поверхности резания в сечении плоскостью P_{He} . Таким образом, положение касательной к поверхности резания на проекции IV характеризует величину угла σ_{Ne} .

Для расчета угла λ_p необходимо знать составляющие $\vec{v}_{e_{nM}}$ и $\vec{v}_{e_{kM}}$ вектора скорости результирующего движения резания в плоскости, касательной к поверхности резания в рассматриваемой точке режущей кромки. Тогда углы σ_{Ne} и λ_p определяются из выражений

$$\operatorname{tg} \sigma_{Ne} = \frac{\vec{v}_2}{\vec{v}_M} \varphi; \quad \operatorname{tg} \lambda_p = \frac{\vec{v}_{e_{kM}}}{\vec{v}_{e_{nM}}}. \quad (10)$$

Угол σ_{Ne} и векторы $\vec{v}_{e_{nM}}$ и $\vec{v}_{e_{kM}}$ найдем на основе общего метода определения рабочих (кинематических) параметров режущего лезвия [9], согласно которому векторы скоростей движений инструмента и направленные отрезки, характеризующие положение в пространстве передней и задней поверхностей и режущего лезвия, последовательно ортогонально проектируют с одной проекции на другую. При этом проектируются не сами векторы и направленные отрезки, а их ортогональные составляющие. Тогда при ортогональном проектировании один составляющий вектор изображается в натуральную величину, а другой проектируется в точку. Для решения поставленной задачи вектор $\vec{v}_s$ на проекции III раскладываем на векторы $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$, которые переносим на проекцию IV. Кроме этого, на проекции IV будет отображаться вектор $\vec{v}_M$. Выразим векторы $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ через исходный вектор $\vec{v}_s$:

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_s \cos \varphi_p; \quad \vec{v}_2 = \vec{v}_s \sin \varphi_p.$$

Тогда искомый угол σ_{Ne} определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \sigma_{Ne} = \frac{\vec{v}_2}{\vec{v}_M} = \frac{\vec{v}_s \sin \varphi_p}{\vec{v}_M}. \quad (11)$$

Согласно проекциям III, IV, касательная и нормальная составляющие вектора скорости результирующего движения резания определяются из уравнений:

$$\vec{v}_{e_{kM}} = \vec{v}_{kM} + \vec{v}_1 = \vec{v}_{kM} + \vec{v}_s \cos \varphi_p; \quad \vec{v}_{e_{nM}} = \frac{\vec{v}_M}{\cos \sigma_{Ne}}.$$

Следовательно,

$$\operatorname{tg} \lambda_p = \frac{\vec{v}_{e_{kM}}}{\vec{v}_{e_{nM}}} = \frac{(\vec{v}_{kM} + \vec{v}_s \cos \varphi_p) \cos \sigma_{Ne}}{\vec{v}_M}. \quad (12)$$

Для нахождения связи между углами σ_{Ne} и σ_N , находящихся соответственно в плоскостях P_{He} и P_H , рассмотрим варианты установки ротационного резца с эксцентриситетом и без него (см. Рисунок 2). Тогда

$$\operatorname{tg} \sigma_N = \frac{\vec{v}_2'}{\vec{v}_M}, \quad (13)$$

где: $\vec{v}_2'$ – составляющая скорости движения подачи $\vec{v}_s$, определяемая по формуле $\vec{v}_2' = \vec{v}_s \sin(\varphi_p + \varphi_e)$.

Угол φ_e , образуемый между OM и O_1M , из-за установки круглого резца с эксцентриситетом e определяется по теореме косинусов:

$$\cos \varphi_e = \frac{R_p^2 + e^2 + [R_p + e(1 - \cos \varphi_p)]^2}{2R_p \cdot (R_p + e(1 - \cos \varphi_p))}. \quad (14)$$

Исходя из (11) и (13),

$$\operatorname{tg} \sigma_N = \frac{\sin(\varphi_p + \varphi_e) \operatorname{tg} \sigma_{Ne}}{\sin \varphi_p}. \quad (15)$$

Так как круглый резец установлен с эксцентриситетом e , то вектор скорости касательного движения $\vec{v}_{km}$ направлен перпендикулярно к OM , следовательно, $\vec{v}_{km}$ не перпендикулярен нормали к режущей кромке O_1M . Тогда плоскость P_{He} , проходящая через OM на расстоянии e_M от оси O_1 и параллельная ей, пересекает заднюю коническую поверхность резца по гиперболе, в то время как нормальная секущая плоскость P_H – по прямолинейным образующим, что и обуславливает различие соответствующих углов в плоскостях P_{He} и P_H .

Рассмотрим задачу о соответствии углов заточки ротационного резца, находящихся в плоскости P_H , и их проекций в плоскости P_{He} . Коническая поверхность высотой H (рисунок 3) с вершиной в точке M_o (0; 0; H) описывается уравнением

$$(z-H)^2 = k(x^2 + y^2).$$

При $z=0$ имеем окружность $x^2 + y^2 = R_p^2$, следовательно, $k = \frac{H^2}{R_p^2}$, где R_p – радиус основания (радиус круговой режущей кромки резца).

$$\text{Таким образом, } (z-H)^2 = \frac{H^2}{R_p^2}(x^2 + y^2).$$

Рассечем коническую поверхность плоскостью $x = e_M$, параллельной оси O_1 и отстоящей от неё на расстоянии e_M , равном высоте треугольника OMO_1 (см. Рисунок 2), проведенной из вершины O_1 . Согласно рисунку 2

$$e_M = \frac{2}{OM} \sqrt{p(p-OM)(p-MO_1)(p-O_1O)}, \quad (16)$$

где: p – полупериметр треугольника OMO_1 , $p = \frac{OM+MO_1+O_1O}{2}$; $OM = R_p + e(1 - \cos \varphi_p)$; $MO_1 = R_p$; $O_1O = e$.

Рассматриваемое сечение конической поверхности является гиперболой MNP , уравнение проекции $M_1N_1P_1$ которой на плоскость YOZ выглядит следующим образом:

$$(z-H)^2 = \frac{H^2}{R_p^2}(e_M^2 + y^2). \quad (17)$$

Дифференцирование (17) по y позволяет определить тангенс угла β_e наклона касательной к кривой MNP в точке M . Имеем

$$2(z-H) \cdot Z'_y = \frac{H^2}{R_p^2} \cdot 2y,$$

откуда

$$Z'_y = \frac{H^2 \cdot y}{R_p^2(z-H)}.$$

Для точки M $z=0$, следовательно, на основании (17)

$$H^2 = \frac{H^2}{R_p^2}(e_M^2 + y^2)^2 \text{ или } y^2 = R_p^2 - e_M^2, \quad y = \pm \sqrt{R_p^2 - e_M^2}.$$

Тогда

$$\operatorname{tg} \beta_e = Z'_y(M) = \frac{H^2(-\sqrt{R_p^2 - e_M^2})}{R_p^2(-H)} = \frac{H\sqrt{R_p^2 - e_M^2}}{R_p^2}. \quad (18)$$

Для определения угла α_e , учитывая, что $H = R_p / \operatorname{tg} \alpha$, имеем

$$\alpha_e = 90^\circ - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{R_p^2 - e_M^2}}{R_p \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (19)$$

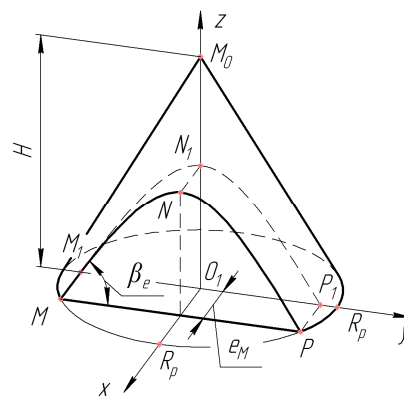


Рисунок 3. – К определению проекций углов

Аналогично для угла γ_e

$$\gamma_e = \arctg \frac{\operatorname{tg} \gamma \sqrt{R_p^2 - e_M^2}}{R_p}. \quad (20)$$

В случае если круглый резец установлен без эксцентриситета ($e = 0$), соответствующие углы в плоскостях P_{He} и P_H равны, т.е. $\alpha_e = \alpha$, $\gamma_e = \gamma$, что свидетельствует о достоверности формул (19), (20).

Заключение. Из формул для определения углов σ_{Ne} и σ_N следует, что их величина не зависит от кинематического коэффициента и количества выступов профиля, поэтому указанные параметры не влияют на значение рабочего переднего угла γ_p , его величина зависит от эксцентриситета e установки ротационного резца, что необходимо учитывать при определении параметров режущего лезвия.

Изменение рабочего угла λ_p наклона режущей кромки обусловлено созданием кинематического наклона режущей кромки в связи с тем, что резец вращается с частотой в m раз большей частоты вращения заготовки. С увеличением числа m выступов профиля поверхности возрастает угол λ_p . Увеличение кинематического коэффициента приводит к уменьшению рабочего заднего угла режущего лезвия α_p .

Результаты исследования позволяют управлять схемой формообразования для получения профиля обработанной синусоидальной цилиндрической поверхности заданной геометрии, а также определить величину рабочих углов круглого эксцентрично установленного резца, что важно для ее практической реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимченко, А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / А.И. Тимченко. – М., 1993. – 41 с.
2. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 264 с.
3. Ротационное резание материалов / П.И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1987. – 229 с.
4. Бобров, В.Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В.Ф. Бобров, Д.Е. Иерусалимский. – М. : Машиностроение, 1972. – 112 с.
5. Попок, Н.Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимися инструментами : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Н.Н. Попок ; Белорус. политехн. ин-т. – Минск, 1983. – 22 с.
6. Данилов, В.А. Анализ и реализация схем обработки профильных цилиндрических поверхностей ротационным инструментом / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 71–82.
7. Ротационный инструмент : пат. ВУ 4541 на полезную модель / В.А. Данилов, А.Н. Селицкий. – Заявка от 08.01.2008.
8. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981.
9. Петрухин, С.С. Общий метод определения кинематических геометрических параметров режущей части инструментов / С.С. Петрухин // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. – 1962. – № 10. – С. 112–116.

Поступила 20.08.2019

ANALYSIS OF THE SINE WAVE PROCESSING SCHEME CYLINDRICAL SURFACES WITH AN ECCENTRICALLY MOUNTED FORCIBLY ROTATING CIRCULAR CUTTER

V. DANILOV, A. SELICKI

The scheme of processing sinusoidal cylindrical surfaces with an eccentric circular cutter installed relative to the axis of rotation, the forced rotation of which is coordinated with the rotation of the workpiece in accordance with the number of faces of the processed surface, is considered. The analysis of practically the influence on the geometry of the generated sinusoidal surface geometric and kinematic parameters of the processing circuit, the dependences for calculation of working angles of the cutter and the regularities of their changes in the process due to the geometry of the profile of the formed surface.

Keywords: sinusoidal surface, the processing circuit, the geometry of the profile working angle of the tool.

УДК 629.114

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ РАБОЧЕГО МЕСТА ВОДИТЕЛЯ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА НА РАЗВИТИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Д.А. ЛИННИК, канд. техн. наук, доц. А.С. ВОРОНЦОВ
(Гродненский государственный университет имени Янки Купалы)

Приведен аналитический обзор литературы по вопросам влияния вибрации на организм человека (водителя). Вибрация рассмотрена как сильный стресс-фактор, оказывающий отрицательное влияние на психомоторную работоспособность, эмоциональную сферу и умственную деятельность человека и повышающий вероятность возникновения несчастных случаев и приводит к развитию профессиональных заболеваний, в частности вибрационной болезни. Приведен анализ видов воздействий на водителя колесного трактора, анализ профессиональных заболеваний водителей колесных тракторов, результаты экспериментальных исследований существующей системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора. Экспериментальные исследования существующей системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 позволили установить ее неэффективность, обусловленную превышением предельно допустимых среднеквадратических значений скорректированного виброускорения в третьоктавных полосах частот (0,8...50 Гц) на рабочем месте водителя для всех рассматриваемых режимов работы колесного трактора.

Ключевые слова: колесный трактор, вибрация, водитель, профессиональное заболевание, рабочее место, пол кабины, подушка сиденья, среднеквадратическое значение скорректированного виброускорения.

На современном этапе технического прогресса борьба с неблагоприятными последствиями воздействия вибрации приобретает все большую социальную и экономическую значимость. Это вызвано, с одной стороны, интенсификацией существующих технологических процессов, с другой – возрастающим внедрением во все отрасли экономики виброактивной техники [1–3].

Совершенствование технико-экономических показателей машин и оборудования осуществляется путем увеличения мощности и рабочей скорости при одновременном уменьшении массы, что ведет к возрастанию виброактивности машин. Вибрация как фактор производственной среды встречается в сельском хозяйстве, металлообрабатывающей, горнодобывающей, металлургической, машиностроительной, строительной, авиа- и судостроительной промышленности, на транспорте и в других отраслях экономики [1–3].

Вибрация – это физический фактор, действие которого определяется передачей человеку механической энергии от источника колебаний [4].

Вибрацию рассматривают как сильный стресс-фактор, оказывающий отрицательное влияние на психомоторную работоспособность, эмоциональную сферу, умственную деятельность человека и повышающий тем самым вероятность возникновения несчастных случаев. Вибрация может прямым путем препятствовать выполнению рабочих операций или косвенно влиять на работоспособность за счет снижения уровня функционального состояния человека [1–6].

Действию общей вибрации подвергается весь организм человека-оператора через пол, сиденье при работе на транспорте, сельскохозяйственной и горнодобывающей технике, при обслуживании технологического оборудования. Чаще всего действию вибрации рабочих мест подвергаются механизаторы сельского хозяйства, водители большегрузных машин, бульдозеристы, машинисты экскаваторов и буровых станков. Для современного производства характерны относительно низкие уровни вибрации с преобладанием низкочастотного спектра в октавах 1...8 Гц [2; 4].

По частотному составу вибрацию подразделяют на *низкочастотную вибрацию* (с преобладанием максимальных уровней в октавных полосах 1...4 Гц – для общей вибрации; 8...16 Гц – для локальной вибрации); *среднечастотную вибрацию* (8...16 Гц – для общей вибрации; 31,5...63 Гц – для локальной вибрации); *высокочастотную вибрацию* (31,5...63 Гц – для общей вибрации; 125...1 000 Гц – для локальной вибрации) [1; 3; 7].

Вибрация рабочих мест водителей транспортных средств и самоходной техники носит преимущественно низкочастотный характер с высокими уровнями интенсивности (до 132 дБ) и зависит от скорости передвижения, типа сиденья и амортизирующей системы, степени изношенности подвижного состава и покрытия дорог, выполняемого технологического процесса [1]. Анализ вибрационного воздей-

ствия показывает, что на водителей транспортных средств и самоходной техники обычно воздействует переменная по уровням и спектрам вибрация, включающая микро- и макропаузы [1].

Низкочастотные вибрации, в отличие от высокочастотных, активно распространяются по всему телу человека, являясь резонансными для многих органов и систем [1–6].

Для транспортных вибраций наибольшая интенсивность отмечается в вертикальном направлении; для транспортно-технологических и технологических – в горизонтальном [1]. Уровни транспортных вибраций значительно выше технологических [1].

Вибрация относится к факторам, обладающим сильным биологическим воздействием. Характер, глубина и направленность физиологических и патологических сдвигов в различных системах организма определяется уровнями, частотными характеристиками вибрации, а также физиологическими свойствами тела человека. В генезе этих реакций важную роль играют анализаторы – вестибулярный, двигательный, зрительный и др. [1; 6].

Двигательная система – главный объект воздействия вибрации, и в зависимости от ее частоты проявляется качественно разными эффектами. На низких частотах (до 1...2 Гц), когда время латентной мышечной системы меньше периода колебаний, она еще способна достаточно эффективно компенсировать вибрационные возмущения. Поэтому преобладающими эффектами являются реакции оповестивулоспиальной системы, проявляющиеся, в частности, в симптомокомплексе укачивания [1; 6].

На более высоких частотах (свыше 2 Гц) механизм противодействия не успевает срабатывать, поэтому мышечная система находится постоянно в состоянии напряжения в связи с нарушением взаимоотношений афферентной и эфферентной импульсаций. На низких частотах регуляция сводится, в конечном счете, к общей или региональной мышечной работе. В случае воздействия вибрации с частотами выше 2 Гц (особенно в резонансном для тела человека диапазоне 4...8 Гц) напряжение скелетно-мышечной системы как проявление компенсаторного механизма противодействия вибрационным перемещениям способствует распространению вибрации по телу человека. В результате оба этих механизма не только вызывают повышение утомления мышечной системы, но и создают условия для микротравматизации опорно-двигательного аппарата [1; 6].

Оценка напряжения мышц верхних конечностей, спины, затылка при воздействии вибрации (низкочастотной – 4...8 Гц) свидетельствует о том, что двигательная система активно участвует в колебаниях и одновременно, используя механизмы центральной и периферической коррекции, формирует противодействие вибрации. Поэтому при обеспечении статической (поддержание позы) и динамической (управление рычагами и педалями) регуляций нервно-мышечный аппарат испытывает двойную нагрузку. Противодействие вибрационным перемещениям при необходимости выполнения требуемых движений в системе «оператор – машина» сопряжено со значительными энергозатратами и может привести к утомлению [1; 6].

Низкочастотная общая вибрация, особенно резонансного диапазона (4...8 Гц), вызывает длительную травматизацию межпозвоночных дисков и костной ткани, смещение органов брюшной полости, изменение моторики гладкой мускулатуры желудка и кишечника, может приводить к болевым ощущениям в области поясницы, возникновению и прогрессированию дегенеративных изменений позвоночника, заболеваний хроническим пояснично-крестцовым радикулитом, которые чаще регистрируются у трактористов, рабочих, занятых в производстве сборного железобетона, у водителей автомобилей [1; 6].

При воздействии низкочастотной вибрации снижается острота зрения, нарушается цветоощущение, сужаются границы поля зрения, уменьшается устойчивость ясного видения, снижается функциональная подвижность, происходит расстройство фиксации предметов глазами, нарушается четкость восприятия объектов, затрудняется чтение приборной информации [1].

Из аналитического обзора литературы по вопросам исследования физиологического состояния водителей *колесных тракторов разных фирм* установлено, что колебания с частотой до 3...5 Гц вызывают реакции вестибулярного аппарата, колебания с частотами 5...11 Гц – резонансные колебания человеческого тела (голова, таз, брюшная полость, позвоночник) [8; 9].

При работе на сельскохозяйственных транспортных средствах водители сталкиваются с физическими (шум, вибрация (высоко- и низкочастотная)), химическими (химические вещества в воздухе, выхлопные газы), биологическими (споры, микроорганизмы) и другими воздействиями [10] (рисунок 1).

Фактором риска, требующим внимания в сельском хозяйстве, является воздействие вибрации, вредной для всего тела [11–13]. Отмечено, что вибрации с частотой ниже 2 Гц могут сопровождаться незначительными и временными эффектами, такими как тошнота, которые вызывают значительный дискомфорт, снижение внимания, в то время как длительное воздействие вибраций в диапазоне от 2 до 20 Гц может вызывать серьезные заболевания, в частности, дегенеративные патологии позвоночника [11–13]. Вредные вибрации, когда они усугубляются трудными условиями труда (неудобные позы, частые манипуляции и т.д.), могут привести к хроническим заболеваниям позвоночника [14].

Европейская директива 2002/44/ЕС определяет «Вибрацию всего тела» как механическую вибрацию, которая при передаче на все тело влечет за собой риск для здоровья и безопасности работников, в частности заболеваемость нижней части спины и травму позвоночника [15]. Относительно сидящих операторов в стандарте ISO 5008/2002 дополнительно указывается, что вибрация всего тела – это «вибрация, передаваемая телу в целом через ягодицы сидящего оператора» [16]. Воздействие высоких уровней вибрации всего тела может вызвать или усугубить травмы спины [16]. Европейская ассоциация сельскохозяйственной техники *СЕМА* (Брюссель, Бельгия) в своих отчетах отмечает, что вибрация всего тела считается основным фактором, влияющим на возникновение болей в спине [17].

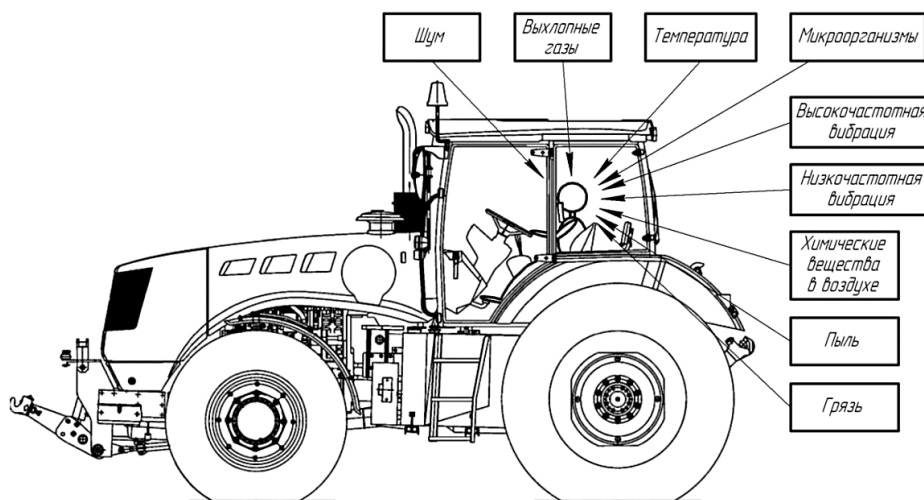


Рисунок 1. – Виды воздействий на водителя колесного трактора

Результаты эпидемиологического исследования (1155 водителей тракторов) показывают, что вождение трактора в значительной степени связано с повышенным риском возникновения симптомов в пояснице – боль в нижней части спины (*LBP*) [27]. Установлено, что суммарная доза вибрации и неловкое положение на работе являются наиболее прогностическими профессиональными факторами возникновения *LBP* среди водителей трактора. Замечено, что вибрационное воздействие и воспринимаемая поструральная нагрузка независимо вносили вклад в избыточный риск развития расстройств нижней части спины [18].

Немецкими учеными *Eberhard Christ, Siegfried Fischer, Uwe Kaulbars, Detlef Sayn* института безопасности труда и здоровья немецкого социального страхования от несчастных случаев (*IFA*) приведены исследования по измерению общей вибрации на рабочем месте водителя при управлении мобильными машинами и транспортными средствами (вибрация всего тела – *WBV*). Отмечено, что длительное воздействие вибрации на организм человека может поставить под угрозу его здоровье, безопасность и привести к повреждению костей и суставов, а также к повреждениям дисков позвоночника [19; 20]. Все это влечет за собой развитие профессиональных заболеваний, в частности, вибрационной болезни [19; 20].

Кроме того, в [19, с. 55; 20, с. 67] приведены результаты измерений среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на полу кабины для тракторов сельского и лесного хозяйств, которые в вертикальном направлении (ось *Z*) находятся в диапазоне от 0,40 до 1,55 м/с²; по оси *X* – 0,15...1,15 м/с²; по оси *Y* – 0,30...1,25 м/с²; на подушке сиденья по оси *Z* – 0,16...1,25 м/с²; по оси *X* – 0,15...1,40 м/с², по оси *Y* – 0,27...1,70 м/с². Для тракторов узкоколейных величина среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на полу кабины по оси *Z* находится в диапазоне от 0,35 до 2,0 м/с², по оси *X* – 0,20...0,60 м/с²; по оси *Y* – 0,48...0,90 м/с²; на подушке сиденья по оси *Z* – 0,20...1,50 м/с²; по оси *X* – 0,23...0,80 м/с²; по оси *Y* – 0,40...0,95 м/с².

Учеными *A.J. Scarlett, J.S. Price, D.A. Semple* научно-исследовательского института *Silsoe* (Великобритания) по охране здоровья и безопасности и лаборатории вибрационных испытаний *R M Stayner* (Великобритания) проведены исследования по количественной оценке вибрации всего тела (*WBV*) водителя и уровней вибрации на рабочем месте водителя для ряда современных сельскохозяйственных транспортных средств (тракторы, самоходные опрыскиватели и вездеходы) [21]. Испытания сельскохозяйственных транспортных средств проводились при выполнении ими ряда сельскохозяйственных работ и при обычном использовании на ферме [21]. Установлено, что вибрация всего тела водителя на рабочем месте современных сельскохозяйственных тракторов (*John Deere 7810, Renault Ares 630 RZ, New Holland TM 165, JCB Fastrac 3185*) в значительной степени зависит от характера выполняемой полевой работы и в мень-

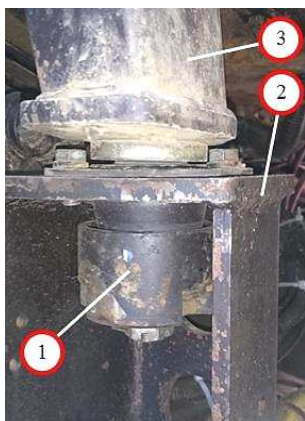
шей мере от возможностей системы подвески, также отмечено доминирование максимальных уровней виброускорения на рабочем месте водителя в вертикальном направлении (ось Z) [21].

Французский национальный институт исследований и безопасности по предотвращению несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний (INRS) с помощью регионального бюро медицинского страхования и профилактики (CRAM, Франция), лаборатории здоровья и безопасности (HSL, Великобритания) и лаборатории вибрационных испытаний (RMS, Великобритания) в период с 1997 по 2005 год проводили исследования по измерению общей вибрации на рабочем месте водителя [22; 23]. Кроме того, приведены выборочные данные, основанные на измерениях общей вибрации на рабочем месте водителя с самыми высокими значениями виброускорения на оси (ось Z). Так, для тракторов сельского хозяйства преобладающими виброускорениями на рабочем месте водителя, являются виброускорения, находящиеся в диапазоне от 0,56 до 0,82 м/с² [22; 23].

На основании вышеизложенного следует акцентировать внимание на том, что длительное воздействие низкочастотной вибрации на организм водителя ведет к развитию вибрационной болезни, которая доминирует среди профессиональных заболеваний и чаще встречается у рабочих, занятых в сельском хозяйстве, на транспорте и в других отраслях народного хозяйства. Основной величиной, используемой для описания уровня вибрации, является среднеквадратическое значение скорректированного виброускорения [24–26].

Для оценки вибрации на рабочем месте водителя колесного трактора, производимого Минским тракторным заводом, представлены экспериментальные исследования существующей системы виброзащиты. Экспериментальные исследования проводили с целью определения величины среднеквадратических значений скорректированного виброускорения в третьоктавных полосах частот на рабочем месте водителя (опорная поверхность для ног (пол кабины), подушка сиденья) при разных рабочих условиях и режимах работы колесного трактора [24–26]. В качестве *объекта исследования* выбран энергонасыщенный колесный трактор «Беларус-3022ДЦ.1» с дизельным двигателем BF06M1013FC номинальной мощностью 303 л. с., тягового класса 5,0. *Предмет исследования* – базовое крепление кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1».

Кабина колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» устанавливается на остова через четыре виброизолятора: спереди на два виброизолятора, установленных на кронштейне крепления кабины к корпусу муфты сцепления; сзади на два виброизолятора, установленных на кронштейне крепления кабины к корпусу полуоси заднего моста (рисунок 2) [27]. Оценку воздействия вибрации на водителя колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» осуществляли путем непрерывного измерения вибрации в течение всего рабочего дня с использованием современной измерительной техники [24].



1 – виброизолятор с фланцем;
2 – кронштейн крепления кабины
к корпусу полуоси заднего моста;
3 – опора кабины

Рисунок 2. – Заднее крепление
кабины колесного трактора
«Беларус-3022ДЦ.1» на корпусе
полуоси заднего моста

Общая длительность воздействия вибрации на водителя колесного трактора в течение рабочего дня получена для каждого рабочего цикла с учетом соответствующих рабочих условий; оценка длительности основана на фактическом измерении длительности вибрационного воздействия во время выполнения конкретных рабочих циклов с учетом их повторяемости в течение рабочего дня. Полученные результаты измерений усредняли. Усредненное среднеквадратическое значение скорректированного виброускорения для серии из N выборок определяли по ГОСТ 31319-2006 (ЕН 14253:2003) [24]. Рабочие условия и испытательные участки определены с точки зрения реальных условий работы колесного трактора. Варьируемыми параметрами, определяющими рабочие условия, служили скорость передвижения колесного трактора в заданном режиме работы и тип поверхности передвижения.

Режим работы определяли исходя из вида выполняемых работ. В нашем случае – это работа по перевозке и внесению органических удобрений колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20. Продолжительность рабочего дня составляла 8 часов (480 минут). Оценку воздействия вибрации на водителя колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» осуществляли путем непрерывного измерения вибрации в течение всего рабочего дня с использованием современной измерительной техники [24]. Общая длительность воздействия вибрации на водителя колесного трактора в течение рабочего дня получена для каждого рабочего цикла с учетом соответствующих рабочих условий.

Оценка этой длительности основана на фактическом измерении длительности вибрационного воздействия во время выполнения конкретных рабочих циклов с учетом их повторяемости в течение рабочего дня.

Полученные результаты измерений усредняли. Усредненное среднеквадратическое значение скорректированного виброускорения для серии из N выборок определяли по ГОСТ 31319-2006 (ЕН 14253:2003) [24].

Рабочие условия и испытательные участки были определены с точки зрения реальных условий работы колесного трактора. Варьируемыми параметрами, определяющими рабочие условия, являлись скорость передвижения колесного трактора в заданном режиме работы и тип поверхности передвижения. Режим работы определяли видом выполняемых работ. В нашем случае это работа по перевозке и внесению органических удобрений колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20. Продолжительность рабочего дня составляла 8 часов (480 минут).

Испытательные участки выбирали таким образом, чтобы длина пути на этом участке, где оценивали общую вибрацию, была достаточной для передвижения колесного трактора с постоянной скоростью в течение не менее 3 минут (180 секунд) в разных рабочих условиях [24; 25].

В качестве испытательных участков определены естественные участки пути с разными типами поверхности передвижения: асфальтобетонная дорога (рисунок 3, а); грунтовая (полевая) дорога (рисунок 3, б); поле под посев (рисунок 3, в).



а – асфальтобетонная дорога; б – грунтовая (полевая) дорога; в – поле под посев

Рисунок 3. – Испытательные участки с разными типами поверхности передвижения

Для измерения среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на рабочем месте водителя использовали поверенный шумомер-вибромметр, анализатор спектра ЭКОФИЗИКА-110А (НФ-Белая) с трехкомпонентным датчиком АР2038Р-10.

Данные, полученные в ходе проведенных исследований, обрабатывали на ПЭВМ с использованием лицензионного программного обеспечения *Signal+3G*.

Измерение среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на рабочем месте водителя осуществляли в соответствии с ГОСТ 31319-2006 (ЕН 14253:2003) [24], ГОСТ 31193-2004 (ЕН 1032:2003) [25], ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:2003) [26].

С целью измерения среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на рабочем месте водителя были выбраны места (точки) установки датчика АР2038Р-10 (рисунок 4): подушка сиденья и опорная поверхность для ног (пол кабины) [24–26]. При измерении вибрации, передающейся через сиденье водителю, датчик АР2038Р-10 устанавливали в центре полужесткого диска, который размещался на поверхности сиденья таким образом, чтобы датчик АР2038Р-10 находился посередине между сидельными буграми сидящего человека (рисунок 4, а). Из соображений комфорта допускается, чтобы центр диска находился впереди (до 5 см) сидельных бугров. Сиденье отрегулировано с учетом массы водителя таким образом, чтобы водителю было удобно работать с органами управления и исключить риск ударов о верхний и нижний ограничители хода подвески [25; 26].

При измерении вибрации, действующей на ноги водителя, датчик AP2038P-10 размещали на опорной поверхности для ног (пол кабины) посередине между сводами его ступней (рисунок 4, б). На момент проведения экспериментальных исследований на передней оси колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» были шины типа-размера 540/65 R30 фирмы «BELSHINA», а на задней оси шины – 650/65 R42 фирмы «Cultor» от производителя *Mitas a.s.* (Чехия). Внутреннее давление воздуха в передних шинах составляло 2,1 МПа, в задних – 2,2 МПа.

Сиденье водителя «Беларус 80В-6800000» колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» имеет механическую подвеску, состоящую из двух спиральных пружин кручения и газонаполненного амортизатора двухстороннего действия. Направляющий механизм типа «ножницы» обеспечивает строго вертикальное перемещение сиденья. Динамический ход сиденья 100 мм. Перед началом эксперимента сиденье отрегулировано по массе водителя.

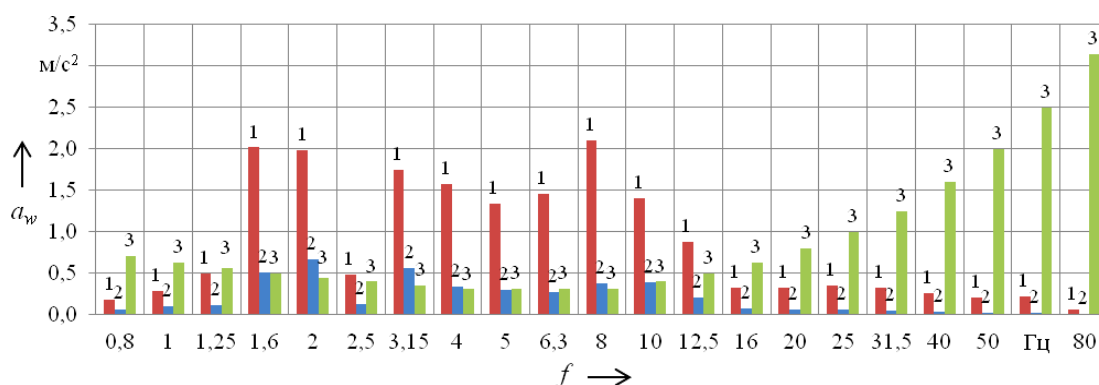


а – подушка сиденья; б – опорная поверхность для ног (пол кабины)

Рисунок 4. – Места установки датчика AP2038P-10

Экспериментальные исследования проводили в несколько этапов. Температура окружающего воздуха находилась в пределах от +2 до +4 °С. Продолжительность рабочего дня составляла 8 часов. Результаты экспериментальных исследований существующей системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» представлены на рисунках 5–7.

На рисунке 5 отображены результаты измерений среднеквадратических значений корректированного виброускорения в вертикальном направлении (ось Z) в третьоктавных полосах частот на полу кабины и подушке сиденья водителя для серии из N выборок в течение 8 часового рабочего дня при перевозке органики колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 по асфальтобетонной дороге (см. рисунок 3, а) со скоростью 20 км/ч.



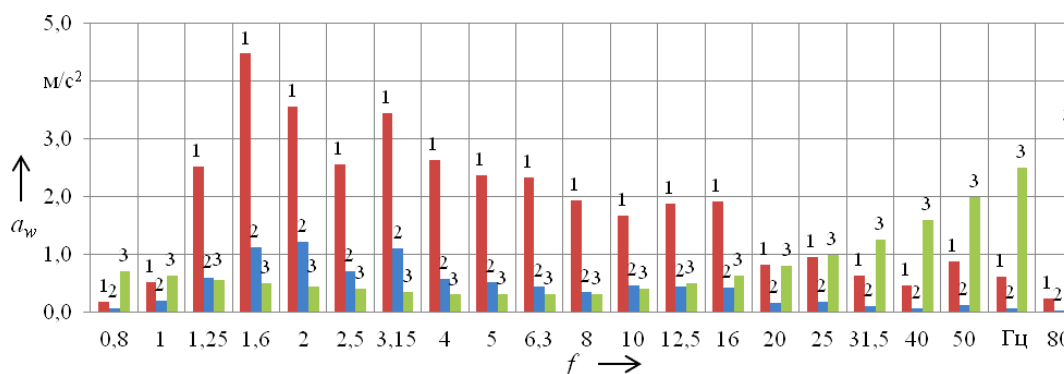
1 – пол кабины; 2 – подушка сиденья; 3 – СНиП от 26.12.2013 № 132 [7]

Рисунок 5. – Среднеквадратические значения корректированного виброускорения при перевозке органических удобрений колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 по асфальтобетонной дороге со скоростью 20 км/ч

На рисунке 6 представлены результаты измерений среднеквадратических значений корректированного виброускорения в вертикальном направлении в третьоктавных полосах частот на полу кабины и подушке сиденья водителя для серии из N выборок в течение 8-часового рабочего дня при перевозке органических удобрений колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 по грунтовой (полевой) дороге (рисунок 3, б) со скоростью 10 км/ч.

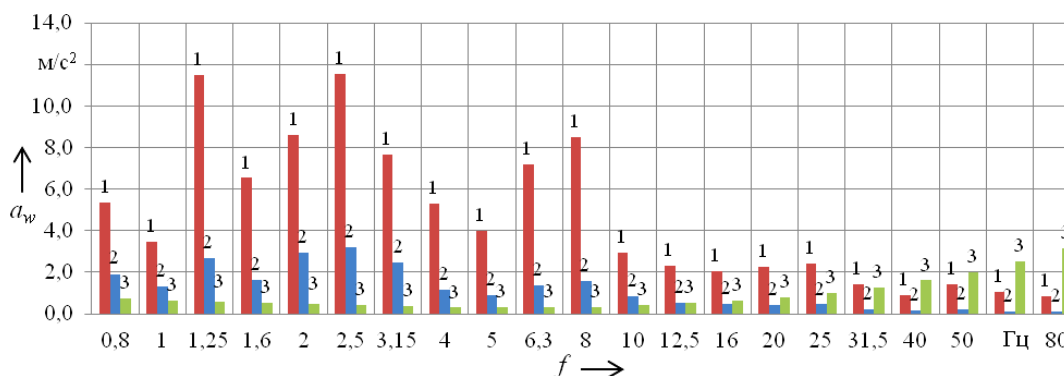
На рисунке 7 проиллюстрированы результаты измерений среднеквадратических значений корректированного виброускорения в вертикальном направлении в третьоктавных полосах частот на полу

кабины и подушке сиденья водителя для серии из N выборок в течение 8-часового рабочего дня при возвращении на загрузку органики колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 (рисунок 3, в) по полю со скоростью 7 км/ч.



1 – пол кабины; 2 – подушка сиденья; 3 – СНИП от 26.12.2013 № 132 [7]

Рисунок 6. – Среднеквадратические значения корректированного виброускорения при перевозке органики колесным трактором «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 по грунтовой (полевой) дороге со скоростью 10 км/ч



1 – пол кабины; 2 – подушка сиденья; 3 – СНИП от 26.12.2013 № 132 [7]

Рисунок 7. – Среднеквадратические значения корректированного виброускорения при возвращении на загрузку органики колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 по полю со скоростью 7 км/ч

Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить эффективность работы существующей системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» и сделать следующие *выводы*:

1) среднеквадратические значения корректированного виброускорения в третьоктавных полосах частот на полу кабины колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 в течение 8-часового рабочего дня превышают величину предельно допустимых значений виброускорения общей вибрации первой категории (транспортной) [7]: при перевозке органических удобрений по асфальтобетонной дороге со скоростью 20 км/ч на диапазоне частот 1,6...12,5 Гц в среднем в 4 раза; при перевозке органических удобрений по грунтовой (полевой) дороге со скоростью 10 км/ч на диапазоне частот 1,25...20 Гц в среднем в 6,1 раза; при возвращении на загрузку органических удобрений по полю со скоростью 7 км/ч на диапазоне частот 0,8...31,5 Гц в среднем в 12,7 раза;

2) среднеквадратические значения корректированного виброускорения в третьоктавных полосах частот на подушке сиденья водителя колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 в течение 8-часового рабочего дня превышают величину предельно допустимых значений виброускорения общей вибрации первой категории (транспортной) [7]: при перевозке органических удобрений по асфальтобетонной дороге со скоростью 20 км/ч на частоте 2 Гц в 1,5 раза, на диапазоне частот 3,15...4 Гц в среднем в 1,4 раза, на частоте 8 Гц в 1,2 раза; при перевозке органических удобрений по грунтовой (полевой) дороге со скоростью 10 км/ч на диапазоне частот 1,25...10 Гц в среднем в 1,8 раза; при возвращении на загрузку органических удобрений по полю со скоростью 7 км/ч на диапазоне частот 0,8...12,5 Гц в среднем в 4 раза;

3) максимальные среднеквадратические значения скорректированного виброускорения в третьоктавных полосах частот на полу кабины наблюдаются при передвижении колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 без нагрузки по полю со скоростью 7 км/ч на диапазоне частот 0,8...31,5 Гц; на подушке сиденья водителя на диапазоне частот 0,8...12,5 Гц;

4) минимальные среднеквадратические значения скорректированного виброускорения в третьоктавных полосах частот на полу кабины и подушке сиденья водителя наблюдаются при передвижении колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20 под нагрузкой по асфальтобетонной дороге со скоростью 20 км/ч.

Таким образом, вышеизложенное указывает на необходимость повышения эффективности работы системы виброзащиты в определенном диапазоне частот для всех рассматриваемых режимов работы колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» с прицепом ПСС-20. Существующая на колесном тракторе «Беларус-3022ДЦ.1» система виброзащиты рабочего места водителя требует совершенствования, а именно система крепления кабины к остоу колесного трактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гигиена труда : учеб. / Под ред. Н.Ф. Измерова, В.Ф. Кириллова. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2008. – 592 с.
2. Артамонова, В.Г. Профессиональные болезни : учебник / В.Г. Артамонова, Н.А. Мухин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Медицина, 2004. – 480 с.
3. Профессиональные болезни : учеб. для студентов учреждений высш. проф. образования / Н.Ф. Измеров [и др.] ; под ред. Н.Ф. Измерова. – 2-е изд., стер. – М. : Издат. ц-р «Академия», 2013. – 464 с.
4. Профессиональные заболевания : в 2 т. / Н.Ф. Измеров [и др.] ; под ред. Н.Ф. Измерова. – М. : Медицина, 1996. – Т. 2. – 480 с.
5. Косарев, В.В. Профессиональные болезни : учеб. пособие / В.В. Косарев, С.А. Бабанов. – М. : Вузовский учебник : ИНФА-М, 2013. – 252 с.
6. Профессиональная патология : национальное руководство / под ред. Н.Ф. Измерова. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2011. – 784 с.
7. Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к производственной вибрации, вибрации в жилых помещениях, помещениях административных и общественных зданий», Гигиенического норматива «Предельно допустимые и допустимые уровни нормируемых параметров при работах с источниками производственной вибрации, вибрации в жилых помещениях, помещениях административных и общественных зданий» [Электронный ресурс] : постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь, 26 дек. 2013 г., № 132 : внес. доп. 15 апр. 2016 г. № 57 / М-во здравоохранения Респ. Беларусь : нормативно-правовая база. – Режим доступа: <http://minzdrav.gov.by/ru/dlya-spetsialistov/normativno-pravovaya-baza/tekhnicheskie-normativnye-pravovye-akty/teksty-tekhnicheskikh-normativnykh-aktov/sanitarnye-normy-pravila-i-gigienicheskie-normativy-reglamentiruyushchie-osnovnye-trebovaniya-pri-vo.php>. – Дата доступа: 12.03.2019.
8. Микулик, Т.Н. Исследование влияния параметров сиденья на вибронегруженность оператора / Т.Н. Микулик, Г.Н. Рейзина // Грузовик. – 2014. – № 4. – С. 30–32.
9. Микулик, Т.Н. К методике повышения активной виброзащиты с использованием функциональной диагностики / Т.Н. Микулик, Г.Н. Рейзина // Наука и техника. – 2014. – № 6. – С. 26–30.
10. Cutini, M. Whole-Body Vibration in Farming: Background Document for Creating a Simplified Procedure to Determine Agricultural Tractor Vibration Comfort / M. Cutini, M. Brambilla, C. Bisaglia // Agriculture. – 2017. – Vol. 7.
11. Okunribido, O.O. Low back pain in drivers: The relative role of whole body vibration, posture and manual materials handling / O.O. Okunribido, M. Magnusson, M. H. Pope // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – Vol. 298. – P. 540–555.
12. Chiang, C.F. A study on biodynamic models of seating human subjects exposed to vertical vibration / C.F. Chiang, C. C. Liang // Int. J. Ind. Ergonom. – 2006. – Vol. 36. – P. 869–890.
13. Seidel, H. Long-term effects of whole-body vibration: A critical survey of the literature / H. Seidel, R. Heide // International Archives of Occupational and Environmental Health. – 1986. – Vol. 58. – P. 1–26.
14. Bonghers, P.M. Back disorders and whole-body vibration at work : Ph. D Thesis / P. M. Bonghers, H.C. Boshuizen. – Universiteit van Amsterdam, Netherlands, 1990. – 317 p.
15. Directive 2002/44/EC of the European parliament and the Council of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration) // Official Journal of the European Communities. – 2002. – L. 177, Vol. 45. – 12 p.
16. Agricultural Wheeled Tractors and Field Machinery – Measurement of Whole-Body Vibration of the Operator : Standard ISO 5008:2002 ; International Standard Organization (ISO). – Geneva, 2002. – 17 p.

17. Whole-body vibration in agriculture. In Practical User's Guide / European Agricultural Machinery (CEMA). – Brussel, 2005. – 6 p.
18. Bovenzi, M. Low-back disorders in agricultural tractor drivers exposed to whole-body vibration and postural stress / M. Bovenzi, A. Betta // *Applied Ergonomics*. – 1994. – Vol. 25 (4). – P. 231–241.
19. Effects of vibration at workplaces – Characteristic values of hand-arm and whole-body vibration / E. Christ, S. Fischer, U. Kaulbars, D. Sayn ; Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) // IFA Report. – 2006. – № 6. – P. 60–120.
20. Vibrationseinwirkung an Arbeitsplätzen – Kennwerte der Hand-Arm- und Ganzkörper-Schwingungsbelastung / E. Christ und [und andere] // BGIA-Report. – 2006. – Vol. 6. – 72 p.
21. Whole-body vibration on agricultural vehicles: evaluation of emission and estimated exposure levels / A.J. Scarlett [und andere] ; Silsoe Research Institute, RMS Vibration Test Laboratory for the Health and Safety Executive. – Sudbury ; Suffolk : HSE Books, 2005. – 249 p.
22. Cutini, M. Whole-Body Vibration in Farming: Background Document for Creating a Simplified Procedure to Determine Agricultural Tractor Vibration Comfort / M. Cutini, M. Brambilla, C. Bisaglia // *Agriculture*. – 2017. – Vol. 7, Is. 84. – 20 p.
23. Guide to Good Practice on Whole-Body Vibration / European Union (EU). – Brussel, 2006. – 425 p.
24. Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах : ГОСТ 31319-2006 (ЕН 14253:2003). – Введ. 30.06.2008. – М. : Науч.-исслед. центр контроля и диагностики технических систем, 2008. – 23 с.
25. Вибрация. Определение параметров вибрационной характеристики самоходных машин. Общие требования : ГОСТ 31193-2004 (ЕН 1032:2003). – Введ. 30.06.2008. – М. : Науч.-исслед. центр контроля и диагностики технических систем, 2008. – 30 с.
26. Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Ч. 1. Общие требования : ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). – Введ. 30.06.2008. – М. : Науч.-исслед. центр контроля и диагностики технических систем, 2008. – 29 с.
27. Рунов, А.В. Трактор «БЕЛАРУС-3022ДЦ.1» : рук-во по эксплуатации / А.В. Рунов. – Минск : РУП «Минский тракторный завод», 2015. – 400 с.

Поступила 02.08.2019

INFLUENCE OF SYSTEM DESIGN VIBRATION PROTECTION OF THE WORKPLACE OF A WHEELED TRACTOR DRIVER FOR THE DEVELOPMENT OF OCCUPATIONAL DISEASES

D. LINNIK, A. VORONTSOV

An analytical review of the literature on the effects of vibration on the human body (driver) is given. Vibration is considered as a strong stress factor that has a negative impact on psychomotor performance, emotional sphere and mental activity of a person and increases the likelihood of accidents and leads to the development of occupational diseases, in particular vibration disease. The analysis of the types of impacts on the driver of a wheeled tractor, the analysis of occupational diseases of drivers of wheeled tractors, the results of experimental studies of the existing vibration protection system for the workplace of a wheeled tractor driver are presented. Experimental studies of the existing vibration protection system for the driver's workplace of the Belarus-3022DC.1 tractor's tractor with the PSS-20 trailer made it possible to determine its inefficiency due to exceeding the maximum permissible root mean square values of the corrected vibration acceleration in one-third octave frequency bands (0.8...50 Hz) by driver's workplace for all considered wheel tractor operating modes.

Keywords: wheeled tractor, vibration, driver, occupational disease, workplace, cab floor, seat cushion, root mean square value of corrected vibration acceleration.

УДК 69:658.26

**ВЛИЯНИЕ РАДИУСА ГИБКИ ТРУБ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО,
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН, Д.О. РАДУЛЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Выполнен анализ степени влияния величины разностенности и радиуса гибки криволинейных участков трубопроводов на их прочностные параметры. Определена степень влияния величины разностенности и величины овальности трубы на величину допустимого давления при прокачке жидкости через трубопровод. Сделан вывод о возможности эксплуатации трубопровода с трубами, имеющими колебания величины толщины стенки в нижней части допуска (в пределах ГОСТа). Выполнен анализ влияния величины радиуса гибки трубы на величину относительного утонения трубы и величину коэффициента запаса прочности трубопровода тормозной системы автомобиля. Установлено, что при увеличении диаметра гибки увеличивается запас прочности криволинейного участка трубопровода. Уменьшение диаметра трубопровода в границах допусков приводит к увеличению запаса прочности криволинейного участка трубопровода на 2,5–3,5% в зависимости от диаметра гибки. При моделировании процесса гибки использовались две формулы, выбрана наиболее целесообразная к применению с точки зрения безопасной эксплуатации трубопроводов.

Ключевые слова: *трубы, гибка, разностенность труб, овальность труб, поперечное сечение, утонение, радиус гибки, внутреннее давление, запас прочности.*

Введение. Величина толщины стенки любой бесшовной трубы колеблется в значительных пределах (в границах допуска согласно ГОСТ) [1; 2], однако при проектировании соединительных трубопроводов в машинах и агрегатах принимают, что трубы имеют постоянную толщину стенки [3]. Колебания толщины стенки наблюдаются как в поперечном сечении, так и вдоль трубы. Изменение геометрических параметров трубы оказывают определенное влияние на ее эксплуатационные характеристики. Входе изготовления автомобильных трубопроводов используется процесс гибки. Изготовление криволинейных участков трубопроводов – сложная техническая задача, требующая применения специализированного оборудования [4–6]. В ходе гибки происходит изменение проходного сечения трубопровода, труба овалится, изменяется толщина ее стенки, могут возникнуть трещины, складки и пр. [5]. К изогнутым участкам трубопроводов ответственного назначения предъявляют жесткие технические требования, и важно, чтобы наведенные в ходе гибки изменения не выводили данный участок трубопровода за предъявляемые к нему требования. Исследования характера изменения параметров трубопроводов в результате гибки с учетом изначальной разностенности трубы являются важной научной задачей [4].

Цель представляемой работы – анализ влияния величин разностенности трубопровода, а также утонения стенки трубы в результате гибки на технологические свойства автомобильных трубопроводов.

Основная часть. В конструкции автомобилей с двигателем внутреннего сгорания применяются следующие трубопроводы: впускной; выпускной; соединительный трубопровод газобаллонного оборудования (ГБО); трубопроводы тормозных систем и т.д.

Главной функцией впускного трубопровода является подвод горючей смеси к цилиндрам, а также подогрев горючей смеси посредством тепла охлаждающей жидкости, которая циркулирует через рубашку трубы. Немаловажным фактором для впускного трубопровода является равномерное распределение горючей смеси к отдельным цилиндрам. Если речь идет о металлическом впускном трубопроводе, то его изготавливают из алюминия [7], давление внутри него колеблется в пределах 20–35 кПа.

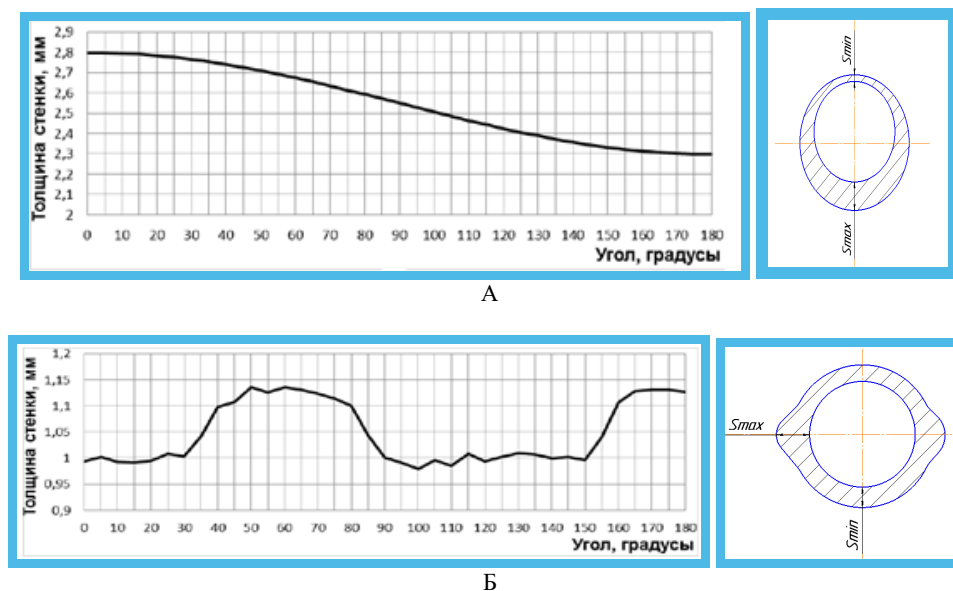
Выпускной трубопровод служит для отвода отработанных газов из цилиндров. Он должен обеспечивать их лучшую очистку, оказывая минимальное сопротивление перемещению газов и обеспечивая большее наполнение. Данный тип трубопровода изготавливают, в основном, из чугуна.

Функционал соединительного трубопровода ГБО представляет собой безопасную подачу компримированного природного газа (КПГ) под высоким давлением из баллонов к двигателю внутреннего сгорания. Соединительный трубопровод изготавливают из бесшовной холоднокатаной трубы из стали марки Сталь 20. Трубопроводы для систем питания ГСН изготавливают из медных трубок, давление газа в них колеблется в пределах 1,0 – 1,2 МПа [8].

Трубопроводы тормозных систем в автомобилях предназначены для передачи усилия от педали к основному цилиндру за счет тормозной жидкости. Трубки подведены к суппортам и соединяются с ними конусными муфтами. При эксплуатации автомобиля тормозные трубки переносят высокие нагрузки – давление внутри них при обычном торможении составляет около 60 бар (6 МПа). Если маши-

на нагружена и движется со скоростью 100 км/ч, рабочее давление повышается до 100 бар (10 МПа), а при экстренном торможении достигает 200 – 300 бар (20-30 МПа.) [9–10].

На рисунке 1 представлено распределение толщины стенки по периметру трубы на примере волочения толстостенной трубы с размерами 25×2,5 мм через 21,4×1,7 мм до тонкостенной трубы 20×1 мм [11]. На примере изменения геометрических параметров поперечного сечения при роликовом волочении одной трубы представлены два возможных вида поперечной разностенности – эксцентричная (А) и симметричная (Б). Большинство труб имеют одну из этих видов разностенностей [12].



А – труба с эксцентричной разностенностью; Б – труба с симметричной разностенностью.

Рисунок 1. – Распределение толщины стенки по периметру поперечных сечений [8]

Криволинейные участки трубопроводов, изготавливаемых из бесшовных труб, выполняют с применением процесса гибки. Из-за наличия разностенности трубы нейтральная линия гибки (рисунок 2, $R_{\text{г.б.нейтр.}}$) находится в эксцентриситете (рисунок 2, e) относительно нейтральной линии трубы [13].

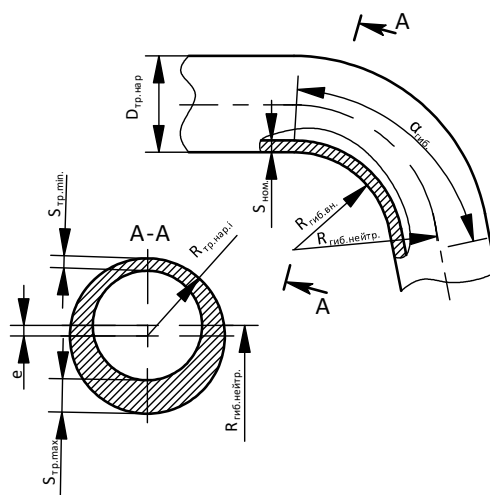


Рисунок 2. – Положение нейтральной линии деформаций в сечении трубы с учетом разнотолщинности стенки [13; 14]

В ходе гибки, наружная часть изгибаемой трубы находится в зоне растяжения, а внутренняя – сжатия (рисунок 3) [15]. В зоне растяжения стенка трубы утоняется, в зоне сжатия – утолщается (рисунок 4) [16]. Кроме этого, в зоне сжатия может произойти процесс складкообразования [15; 16].

Как видно (см. Рисунок 4), толщина стенки трубы в ходе гибки может изменяться в значительных пределах, особенно опасным является процесс утонения стенки трубы в зоне растяжения. Уменьшение толщины

стенки может вывести ее значения за минимально допустимые (с учетом того, что бесшовная труба изначально имеет некоторую величину разностенности [1; 2; 12]). Необходимо определить, в какой мере процесс утонения влияет на уменьшение коэффициента запаса прочности автомобильных трубопроводов.

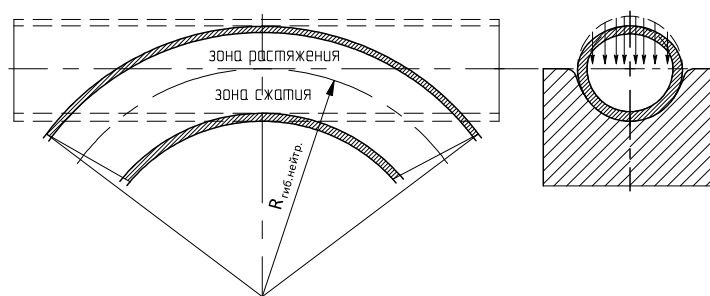


Рисунок 3. – Характерные для процесса гибки зоны деформации трубы [15] в зоне растяжения

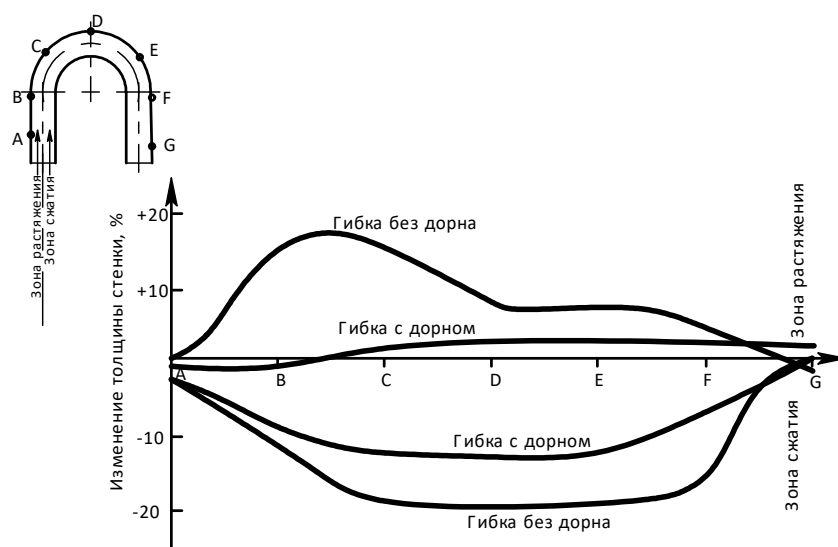


Рисунок 4. – Изменение толщины стенки в зонах гибки трубы [16]

Утонение стенки в зоне максимального изгиба можно определить по формуле [17–18]

$$S_{тр.деф.1} = \frac{S_{ном.}}{1 + \frac{D_{тр.нар.} + S_{ном.}}{D_{гиб.вн} + D_{тр.нар.}}} \quad (1)$$

или [15]

$$S_{тр.деф.2} = \frac{D_{гиб.вн} S_{ном.} + D_{тр.нар.}}{2 \left(\frac{D_{гиб.вн}}{2} + D_{тр.нар.} \right)} \quad (2)$$

Величина утонения стенки трубы в ходе деформации рассчитывается по формуле [14]

$$\delta_{\%} = \frac{S_{ном.} - S_{деф.}}{S_{ном.}} 100\%, \quad (3)$$

где $S_{ном.}$ и $S_{тр.деф.}$ – толщина стенки до и после деформации соответственно.

Допустимое рабочее давление на участок трубопровода трубы в зависимости от диаметра и толщины стенки трубы можно рассчитать по соответствующей формуле [19]:

$$P_{доп} = \frac{2 \cdot S_{ном.} \cdot \sigma_{\epsilon} \cdot m}{n \cdot D_{тр.вн.} \cdot K_1 \cdot K_{назн.}}, \text{ МПа}, \quad (4)$$

где: $S_{ном.}$ – номинальная толщина стенки трубы, мм; σ_{ϵ} – временное сопротивление разрыву металла трубы, МПа; m – коэффициент категорийности трубопровода; n – коэффициент надежности по нагрузке;

$D_{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода, мм; K_l – коэффициент надежности по материалу; K_n – коэффициент надежности по назначению трубопровода.

В качестве рабочего давления автомобильного трубопровода можно выбрать $P_{раб.} = 50$ МПа.

Наиболее нагруженным является трубопровод тормозной системы. Для анализа влияния величины разностенности трубопровода на его способность сопротивляться внутреннему давлению выбираем трубу бесшовную холоднокатаную согласно ГОСТ 617-2006 «Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения. Технические условия». Материал медной трубы для тормозной системы (М1) имеет следующие механические характеристики: $\sigma_s = 270$ МПа (трубы холоднокатаные, полутвердое состояние материала); $\sigma_T = 180$ МПа [20]. Для анализа выбрана труба диаметром 4,76 (с допуском: +0; –0,15 мм) и толщиной стенки 0,8 (с допуском: $\pm 0,08$ мм, или $\pm 0,07$ для повышенной точности). Во время расчетов, значение всех коэффициентов в формуле (1) были приравнены к единице. Расчеты проводились в одном из математических редакторов. Результаты расчетов показаны в таблице 1.

Таблица 1. – Влияние точности геометрических характеристик поперечного сечения трубы на допустимое давление в медном трубопроводе 4,76×0,8 мм

S_{max}		S_{min}	
$D_{внутр. max}$	$D_{внутр. min}$	$D_{внутр. max}$	$D_{внутр. min}$
3	2,9	3,32	3,22
$P_{доп}$ (МПа)			
158,4	163,8621	117,1084	120,7453
Запас прочности (при $P_{раб.} = 50$ МПа)			
3,2	3,3	2,3	2,4

Как видно из таблицы 1, коэффициент запаса прочности при минимальной толщине стенки и максимальном значении диаметра трубы минимальный (2,3), но этого вполне достаточно для работы трубопровода. При минимальном значении диаметра трубы и максимальной толщине стенки коэффициент запаса прочности принимает наибольшее значение (3,3). В целом, трубы с рядовыми допусками на величину разностенности вполне удовлетворяют требованиям для трубопроводов тормозных систем и применять более дорогие, высокоточные трубы не имеет смысла.

Так как геометрические характеристики поперечного сечения напрямую влияют на массу труб, целесообразно рассчитать экономию материала при изготовлении 1000 м трубы.

Массу трубы можно рассчитать по следующей формуле:

$$m = \rho V, \text{ кг}, \quad (5)$$

где: ρ – плотность материала трубы, кг/м³; V – объем материала трубы, м³.

Объем материала трубы:

$$V = S \cdot L, \text{ м}^3, \quad (6)$$

где: S – площадь поперечного сечения трубы, мм²; L – длина трубы.

Площадь поперечного сечения трубы:

$$S = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_{вн}^2), \text{ мм}^2, \quad (7)$$

где, D – наружный диаметр трубы, мм; $D_{вн}$ – внутренний диаметр трубы, мм.

Геометрические характеристики поперечного сечения исследуемой трубы приведены в таблице 1. Во время расчетов значение длины трубы принимается равным одному метру. Расчеты проводились в одном из математических редакторов. Результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2. – Влияние точности геометрических характеристик поперечного сечения трубы на массу в медном трубопроводе 4,76×0,8 мм

S_{max}		S_{min}	
$D_{внутр. max}$	$D_{внутр. min}$	$D_{внутр. max}$	$D_{внутр. min}$
3	2,9	3,32	3,22
m (кг)			
0,095896	0,093425	0,081696	0,079674

Для исследования влияния величины утонения стенки трубы на изменение величины коэффициента запаса прочности трубопровода была выбрана бесшовная труба, которая удовлетворяет требованиям ГОСТ 617-2006. Для анализа выбрана та же труба с минимальной возможной толщиной стенки согласно ГОСТ. Во время расчетов, значения всех коэффициентов в формуле (4) были приравнены к единице.

Анализируя формулы (1) и (2) можно сделать вывод о том, что на величину утонения трубы влияют:

– наружный диаметр трубы (колеблется в границах допусков);

- величина толщины стенки (колеблется в границах допусков);
- внутренний радиус гибки (выбирается эмпирически из условий устойчивости профиля трубы).

В ходе моделирования процесса утонения использовались обе формулы (для сравнения результатов их работы). В качестве начального значения толщины стенки выбрано её минимальное значение согласно допуску ГОСТа. В качестве значений наружного диаметра выбраны экстремальные значения допуска на величину диаметра согласно ГОСТу. Внутренний диаметр гибки изменялся в пределах от 10 до 30 мм, с шагом в 5 мм. (рисунок 5).

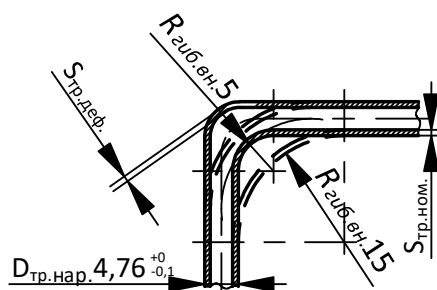


Рисунок 5. – Криволинейный участок трубопровода с разными радиусами гибки

В таблицах 3 и 4 показаны результаты расчетов изменения технологических параметров трубы в зависимости от радиуса гибки.

Таблица 3. – Изменение технологических параметров трубы в зависимости от радиуса гибки (расчет по формуле (1))

$D_{гнб.вн.}, мм$		10	15	20	25	30
Параметр	Внутр. диам. трубы	-				
$P_{доп}$ (МПа)	$D_{внутр. max}$	76,43	83,79	88,90	92,65	95,52
	$D_{внутр. min}$	78,86	86,49	91,77	95,64	98,60
Запас прочности (при $P_{раб.} = 50$ МПа)	$D_{внутр. max}$	1,5285	1,6758	1,7780	1,8530	1,9104
	$D_{внутр. min}$	1,5772	1,7298	1,8354	1,9128	1,9719
$S_{тр.деф.1}$	$D_{внутр. max}$	0,5251	0,5637	0,5895	0,6080	0,6219
	$D_{внутр. min}$	0,5267	0,5653	0,5911	0,6095	0,6233
$D, \%$	$D_{внутр. max}$	27,0751	21,7116	18,1217	15,5505	13,6183
	$D_{внутр. min}$	26,8463	21,4856	17,9095	15,3539	13,4366

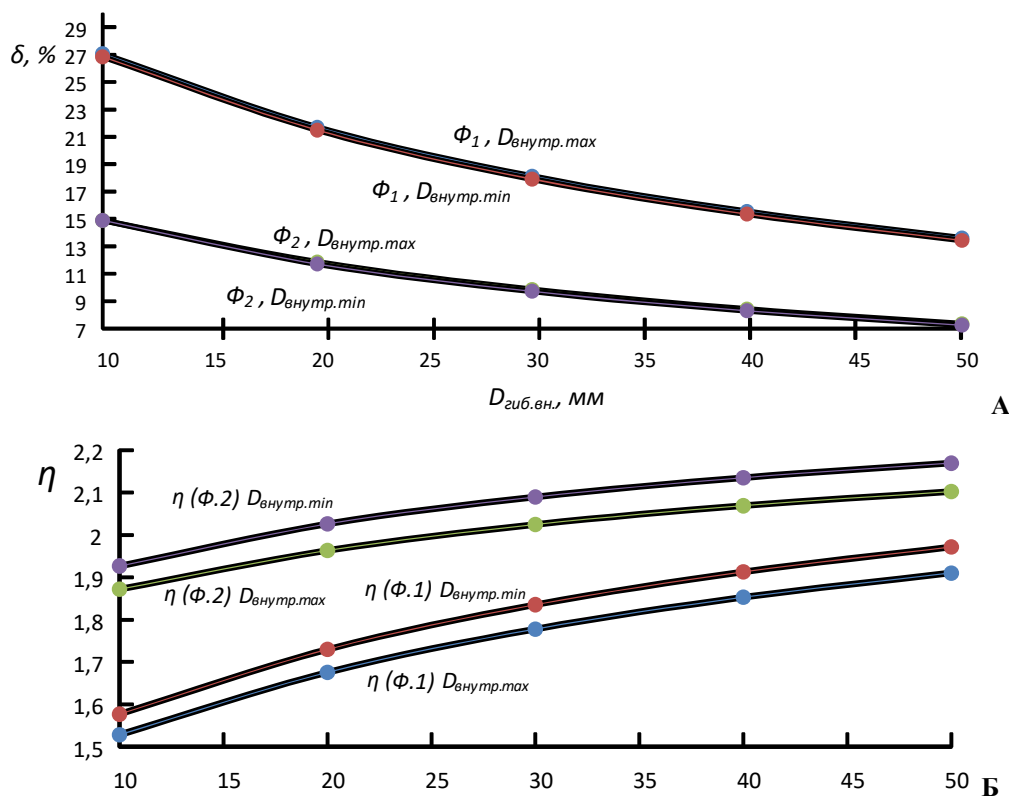
Таблица 4. – Изменение технологических параметров трубы в зависимости от радиуса гибки (расчет по формуле (2))

$D_{гнб.вн.}, мм$		10	15	20	25	30
Параметр	Внутр. диам. трубы	-				
$P_{доп}$ (МПа)	$D_{внутр. max}$	93,61	98,16	101,24	103,46	105,13
	$D_{внутр. min}$	96,33	101,30	104,48	106,76	108,49
Запас прочности (при $P_{раб.} = 50$ МПа)	$D_{внутр. max}$	1,8721	1,9633	2,0248	2,0692	2,1026
	$D_{внутр. min}$	1,9266	2,0260	2,0896	2,1353	2,1697
$S_{тр.деф.1}$	$D_{внутр. max}$	0,6127	0,6346	0,6491	0,6593	0,6670
	$D_{внутр. min}$	0,6127	0,6357	0,6501	0,6603	0,6679
$D, \%$	$D_{внутр. max}$	14,9021	11,8633	9,8540	8,4267	7,3605
	$D_{внутр. min}$	14,9021	11,7096	9,7127	8,2977	7,2426

Формула (1), по сравнению с формулой (2), дает на 80–88% большие результаты величины относительного утонения толщины стенки, однако характер изменения этого параметра в зависимости от диаметра гибки одинаков. Увеличение диаметра гибки приводит к уменьшению относительной величины утонения на 2–5% с каждым шагом (13,5 и 7,5 – суммарное изменение D в зависимости от применяемой для расчета формулы). Изменение диаметра трубы в границах допусков согласно ГОСТ не приводит к значительному изменению величины D при любых диаметрах гибки.

На рисунке 6 показаны графики изменения коэффициента запаса прочности трубы в зависимости от диаметра гибки (при $P_{раб.} = 50$ МПа). Из графиков видно, что увеличение диаметра гибки приводит к увеличению запаса прочности трубопровода от 9,45 – до 3% с каждым шагом при расчетах по формуле (1) (25% общий) и от 5 – до 1,6% с каждым шагом при расчетах по формуле (2) (12,5% общий). Колебания

диаметра трубы в пределах допуска приводят к изменению коэффициента запаса прочности на 2,5–3,5% в зависимости диаметра гибки.



А – Относительное утонение толщины стенки трубы при разных диаметрах гибки;
Б – Коэффициент запаса прочности трубы при разных диаметрах гибки (при $P_{раб.} = 50$ МПа).
Рисунок 6. – Графики изменения коэффициента запаса прочности трубы в зависимости от диаметра гибки

Заключение. Трубы, имеющие колебания толщины стенки в нижней части допуска (Согласно ГОСТ, от $S_{среднее}$ до S_{min}) имеют достаточную степень запаса прочности для безопасной эксплуатации автомобильных трубопроводов. Из-за уменьшения массы труб возможна экономия дорогостоящего материала. В рассматриваемом примере разность между максимальным и минимальным значениями массы трубы составляет 0,016222 кг, что при изготовлении 1000 м труб даёт экономии материала в 16,222 кг. При этом коэффициент запаса прочности трубы с минимальной толщиной стенки и минимальным диаметром (а, следовательно, и с минимальной массой) равен 2,4, что является оптимальным вариантом для производства трубопроводов тормозных систем автомобилей. Исследования влияния радиуса гибки на величину относительного утонения трубы показали, что увеличение диаметра гибки приводит к значительному уменьшению величины относительного утонения стенки трубы. Так, увеличение диаметра гибки с 5 до 30 мм привело к уменьшению относительного утонения стенки трубы на 13,5% (формула (1) и на 7,5% (формула (2)). При увеличении диаметра гибки увеличивается запас прочности криволинейного участка трубопровода ($3_y = 25\%$ при ведении расчетов по формуле (1); $3_y = 12,5\%$ – по формуле (2)). Уменьшение диаметра трубопровода в границах допусков приводит к увеличению запаса прочности криволинейного участка трубопровода на 2,5–3,5% в зависимости от диаметра гибки. Формула (1) дает более высокие результаты величины относительного утонения стенки. С точки зрения безопасной эксплуатации трубопроводов, желательно производить расчеты этой величины именно с ее использованием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пилипенко, С.В. Исследование изменения разностенности труб в ходе прокатки на стане ХПТ / С.В. Пилипенко // Сталь. – 2016. – № 3. – С. 32–37.
2. Григоренко, В.У. Исследование изменения разностенности холоднокатаных труб / В.У. Григоренко, С.В. Пилипенко // Сталь. – 2008. – № 9. – С. 62–63.
3. Куликов, Ю.А. Динамика трубопроводов летательных аппаратов : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.07.03 / Ю.А. Куликов ; Йошкар-Ола, 1995. – 282 л.

4. Мальцев, Д.Н. Совершенствование трубогибного производства предварительным деформированием сечения заготовок : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.09 / Д.Н. Мальцев. – Орел, 2014. – 124 л.
5. Вдовин, С.И. Инженерный метод вариационной оценки пластических деформаций / С.И. Вдовин, Т.В. Федоров. – Орел : Госуниверситет, 2013. – 93 с.
6. Никитин, В.И. Проектирование станков горячей гибки труб / В.И. Никитин. – СПб. : ОАО «ЦТСС», 2011. – 236 с.
7. Устройство автомобиля: впускные трубопроводы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ustroystvo-avtomobilya.ru/sistemy-vpryska/vpuskny-e-truboprovody/>. – Дата доступа: 10.07.2019.
8. Редукторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://auto.kombat.com.ua/reduktoryi-vyisokogo-davleniya-gazoballonogo-obogudovaniya-gbo-avtomobilye/>. – Дата доступа: 10.07.2019.
9. Белорусский ресурс автозапчастей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.braz.by/reverse/brake/brake-pipes/?of=s10136>. – Дата доступа: 10.07.2019.
10. Тормозные системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://systemsauto.ru/brake/brake.html>. – Дата доступа: 10.07.2019.
11. Вагапов, Е.Н. Разработка математической модели роликового волочения труб на длинной оправке с целью прогнозирования точности : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.09 / Е.Н. Вагапов. – Екатеринбург, 2012. – 162 л.
12. Столетний, М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт. – М. : Металлургия, 1975. – 239 с.
13. Вдовин, С.И. Инженерный метод вариационной оценки пластических деформаций / С.И. Вдовин, Т.В. Федоров. – Орел : Госуниверситет, 2013. – 93 с.
14. Никитин, В.И. Проектирование станков горячей гибки труб / В.И. Никитин. – СПб. : ОАО «ЦТСС», 2011. – 236 с.
15. Мосин, И.Ф. Технология изготовления деталей из труб / И.Ф. Мосин. – М. : ГНТИ машиностроит. лит-ры, 1962. – 171 с.
16. Трубогибы и трубогибочные станки для холодной гибки труб [Электронный ресурс] // Газовик. – Режим доступа: <https://gazovikpipe.ru/trubogiby-i-trubogibochnye-stanki-dlya-holodnoj-gibki-trub>. – Дата доступа: 09.06.2019.
17. Гибка труб [Электронный ресурс] // Энциклопедия по машиностроению XXL. – Режим доступа: <https://mash-xxl.info/pics/98106/>. – Дата доступа: 09.06.2019.
18. Трубопроводы и присоединительная арматура [Электронный ресурс] // Энциклопедия по машиностроению XXL. – Режим доступа: <https://mash-xxl.info/page/245125212242203008235116212113157228050070153189/>. – Дата доступа: 09.06.2019.
19. Абрамов, И.П. Расчет максимально допустимого рабочего давления при длительной эксплуатации магистральных нефтепроводов / И.П. Абрамов, И.Ю. Подалов // Записки Горного института. – 2006. – Т. 167. Ч. 2. – С. 184–185.
20. Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения. Технические условия : ГОСТ 617-2006. – М., 2008. – 34 с.

Поступила 27.07.2019

INFLUENCE OF THE BENDING RADIUS OF PIPES ON STRENGTH PARAMETERS AUTOMOBILE PIPELINES

S. PYLYPENKO, A. DUGAN, D. RADULEVIC

The analysis of the degree of influence of the difference value and bending radius of curved sections of pipelines on their strength parameters is performed. The degree of influence of the difference value and the ovality value of the pipe on the permissible pressure when pumping liquid through the pipeline is determined. It is concluded that it is possible to operate a pipeline with pipes that have fluctuations in the wall thickness in the lower part of the tolerance (within GOST). The analysis of the influence of the bending radius of the pipe on the value of the relative thinning of the pipe and the value of the safety factor of the pipeline of the car's brake system is performed. It is found that when the bending diameter increases, the safety margin of the curved section of the pipeline increases. A decrease in the diameter of the pipeline within the tolerance limits leads to an increase in the safety margin of the curved section of the pipeline by 2.5–3.5%, depending on the bending diameter. When modeling the bending process, two formulas were used, and the most appropriate one was chosen from the point of view of safe operation of pipelines.

Keywords: pipes, bending, pipe difference, pipe ovality, cross-section, thinning, bending radius, degree of influence, internal pressure, safety margin.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.91.01

КИНЕМАТИКА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
ВРАЩАЮЩИМСЯ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ
С КАСАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК, В.С. АНИСИМОВ*
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены преимущества механической обработки поверхностей деталей инструментом с касательным движением режущей кромки, приведены результаты исследований кинематических параметров процесса резания плоских, цилиндрических и сферических поверхностей деталей.

Ключевые слова: механическая обработка, процесс резания, вращающийся режущий инструмент, касательное движение, угол наклона режущей кромки.

Введение. В связи с развитием металлорежущих станков с ЧПУ, позволяющих реализовывать трех-, четырех- и пяти осевую обработку с обеспечением требуемых значений мощности и скорости резания, увеличивается количество применяемых на практике кинематических схем резания, предложенных профессором Г.И. Грановским [1]. Реализованы такие виды обработки как винтовая интерполяция, трепанация, трохойдальное и плунжерное резание, в которых реализуются сложные движения и траектории резания, например, винтовая и циклоида наведенные на окружность, трохоида и т.п. [2]. Зачастую в этих видах обработки рекомендуется использовать касательное движение (врезание по касательной) режущих лезвий, а также вращающийся режущий инструмент с крутоспиральными режущими кромками, как обеспечивающие плавное (безударное) резание. Эти предложения присутствуют в каталогах и рекламных материалах ведущих в области металлообработки зарубежных фирм, таких как «Sandvik Coromant» (Швеция), «Seco» (Япония), «Hertel» (Германия), «Isca» (Израиль), «TaeguTec» (Корея) и других. При этом не объясняется за счет каких физических и технологических аспектов обработки обеспечиваются преимущества применения касательного движения и крутоспиральных режущих инструментов. Вместе с тем физические явления, сопровождающие сложные виды обработки резанием, ранее исследовались и описывались ведущими отечественными учеными Г.И. Грановским, Ю.А. Новоселовым, В.В. Шварцем и др.

Обоснование преимуществ касательного движения режущей кромки инструмента. Согласно ГОСТ 25762 [3] касательное движение D_K – это прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента, скорость которого меньше скорости главного движения резания и направлена по касательной к режущей кромке, предназначенное для того, чтобы сменять контактирующие с заготовкой участки режущей кромки. Профессор В.Ф. Бобров [4] трактует понятие касательного движения шире и рассматривает наружное продольное точение резцом с углом наклона режущей кромки равным 90° , когда режущая кромка касательна к обработанной поверхности, и продольное точение широким резцом с углом наклона режущей кромки не равным 0° и углом в плане равным 0° , когда режущая кромка перемещается вдоль самой себя. Он доказал, что увеличение угла λ при свободном резании уменьшает степень деформации стружки по длине, толщине и ширине. Если было бы возможно резание инструментом с углом λ_K равным 90° , то в этом случае размеры срезанной стружки были бы равны размерам срезаемого слоя. Однако это не означает, что зерна металла срезаемого слоя не будут деформироваться, т.к. относительный сдвиг и интенсивность деформаций с ростом угла λ уменьшаются сравнительно мало, а в некоторых случаях остаются постоянными. Последнее происходит потому, что уменьшение нормального относительного сдвига компенсируется соответствующим увеличением относительного сдвига вдоль режущей кромки. При возрастании угла λ растут составляющие силы резания и боковая сила, т.к. возрастает рабочая длина режущей кромки. С увеличением угла λ увеличивается удельная работа резания и удельная работа трения на передней поверхности инструмента, а удельная работа деформации при этом уменьшается. Влияние увеличения угла λ на удельную работу и ее составляющие заметно только при $\lambda > 30^\circ\text{--}40^\circ$. При возрастании угла λ происходит уменьшение средней температуры стружки и увеличение износа режущей кромки. В дальнейших исследованиях процесса резания с принудительным перемещением режущей кромки вдоль самой себя отмечается [5], что указанный процесс соответствует процессу резания инструментом со статическим углом $\lambda \neq 0$ и постоянной рабочей длиной режущей кромки. Особенности процесса, по сравнению с обычным резанием с прямолинейной кромкой,

состоят в том, что, во-первых, рабочий угол наклона режущей кромки создается кинематически и его величина определяется соотношением линейных скоростей вращения резца и заготовки v_p / v ; во-вторых, что в соприкосновении со срезаемым слоем за один оборот резца вступают все новые участки передней и задней поверхностей. Процессу присущи почти все закономерности резания, осуществляемого путем придания инструменту статического угла $\lambda_c \neq 0$. Исключением является более интенсивное уменьшение силы трения F , чем нормальной силы N при увеличении соотношений v_k / v (рабочего угла наклона кромки λ_k), приводящего не к увеличению среднего коэффициента трения, как это имеет место при традиционном резании, а к его уменьшению. Путь резания точки режущей кромки вращающегося резца уменьшается при возрастании угла λ , что увеличивает период стойкости инструмента.

В 70 – 80-е годы XIX столетия активизировалось применение ротационного резания, в котором реализуется касательное перемещение режущей кромки, и во многих исследованиях доказывались преимущества этого вида обработки по снижению трения, работы резания, температуры резания, шероховатости обработанной поверхности [6]. В частности, В.А. Землянский утверждал [7], что согласно вариационному принципу Остроградского – Гамильтона (принципу наименьшего действия), из всех возможных перемещений системы действительное перемещение между заданными точками будет соответствовать наименьшему действию. Применительно к обработке самовращающимся инструментом из всех возможных значений линейной скорости вращения при заданных условиях действительная скорость будет соответствовать наименьшей суммарной работе сил резания на режущих кромках резца и сил трения в его опорах. Следовательно, самовращающийся резец сам должен за счет линейной скорости вращения выходить на режим минимальной затраты энергии, что соответствует наименьшим силам и температуре в зоне резания, а значит и наибольшей стойкости инструмента. Одновременно с этим при любой скорости вращения, не равной нулю, стойкость вращающегося резца должна быть большей, чем у обычного резца, из-за более эффективного охлаждения при непосредственном контакте рабочих участков режущих кромок с охлаждающей средой и увеличением длины активной части лезвия резца. При резании круглым резцом трение скольжения деформируемого материала по рабочим поверхностям заменяется частично трением качения в опорах вращающейся части резца. Это явление сопровождается уменьшением линейных скоростей, а значит и соответствующим снижением работы поверхностного трения, что в свою очередь, влечет за собой снижение работы объемного деформирования благодаря меньшей интенсивности деформации. Уменьшение пластического деформирования срезаемого слоя и трения на поверхностях режущего лезвия инструмента за счет касательного перемещения режущей кромки приводит к снижению температуры резания. Так, И.С. Кушнер и В.В. Ледяев отмечали [8] немонотонное изменение температуры резания при увеличении соотношений скоростей вращения резца и заготовки. Причем точки минимальных значений температуры резания соответствуют соотношению линейных скоростей резца и детали в пределах 0,5...0,6, что соответствует углу наклона режущей кромки примерно 30°. Немонотонное изменение температуры резания при переменной скорости вращения резца, по-видимому, связано со следующими обстоятельствами: уменьшение количества выделяемой теплоты в результате снижения работы резания, происходящего при увеличении соотношений скоростей резца и детали (угла наклона режущей кромки), противодействует уменьшению отдачи теплоты в окружающую среду контактными поверхностями резца. Чем больше это соотношение, тем меньше время охлаждения поверхностей резца при холостом пробеге режущей кромки и более нагретыми вступают в резание его контактные поверхности. Действие обоих факторов приводит к образованию точки минимума на кривых зависимости температуры резания от соотношения линейных скоростей резца и детали.

Результаты этих исследований не были реализованы в полной мере в связи с отсутствием компактных приводов с «жесткими» и высокоскоростными характеристиками, быстродействующих программируемых систем и т.д. Необходимо отметить, что этим работам предшествовали разработки 40-х годов XIX столетия, включающие вращательные трубчатые резцы [9], использующие принцип В. Рейхеля [10], который утверждал, что каждой паре обрабатываемого и инструментального материалов соответствует оптимальная температура резания. Позднее профессор А.Д. Макаров подтвердил достоверность этого принципа [11] применительно к обработке нержавеющей стали и жаропрочных сплавов. То есть с интервалом в 20 – 40 лет происходит возвращение к старым идеям, на качественно новом техническом уровне в связи с развитием «жесткого» и быстродействующего металлообрабатывающего оборудования.

В работе [12] были сопоставлены результаты исследований процесса резания с касательным перемещением режущей кромки в режимах самовращения и принудительного вращения инструмента, а также рассмотрены преимущества применения прерывистой режущей кромки. В частности, отмечена взаимосвязь таких характеристик процесса резания, как сила резания, усадка стружки, длина контакта, коэффициент трения и температура резания при изменении режима резания (соотношения линейной скорости вращающихся резца и детали, скорости детали, подачи на оборот и глубины резания) [13]. Установлен минимум значений температуры резания при определенных значениях соотношений линейных скоростей вращения резца и заготовки, что позволило предложить способ обработки с оптимизацией

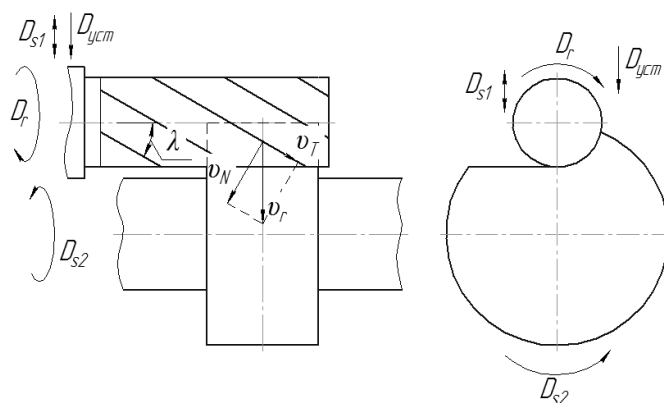
режимов резания [14], при котором корректировку скорости резания производят путем изменения одновременно линейной скорости вращения резца и заготовки при значениях соотношений скоростей вращения резца и заготовки от 0,2 до 0,6.

Результаты рассмотренных исследований были положены в основу совершенствования и развития обработки поверхностей деталей в виде тел вращения вращающимся инструментом, реализуемой на современных трех- и пятиосевых станках с ЧПУ.

Кинематика процесса резания. Для определения влияния угла наклона режущей кромки инструмента и ее касательного движения резания на параметры (скорость резания, подача) и характеристики (сила резания, усадка стружки) процесса резания рассмотрим некоторые схемы обработки конструктивных элементов и поверхностей вращающейся детали вращающимся инструментом.

На рисунке 1 представлена схема обработки плоской поверхности детали на токарно-фрезерном станке с ЧПУ. Обработка плоской поверхности может осуществляться как при попутном (рисунок 1, а), так и при встречном фрезеровании (рисунок 1, б).

а)



б)

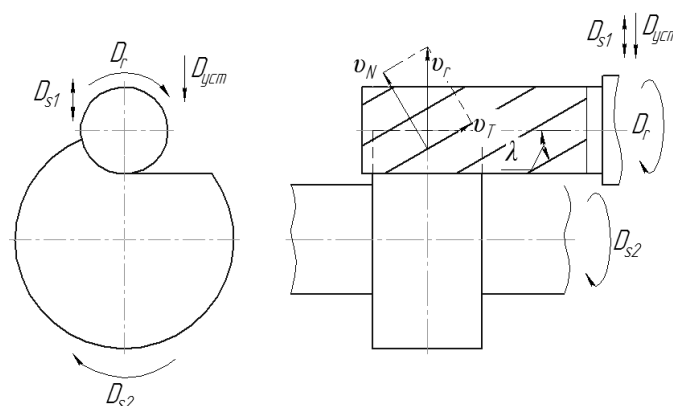


Рисунок 1. – Схемы обработки плоской поверхности детали при попутном (а) и встречном (б) фрезеровании

Вращательное движение инструмента D_r , которое совпадает по направлению с движением подачи заготовки D_{s2} , (при попутном фрезеровании) или разнонаправлено (при встречном фрезеровании), в сочетании с движением подачи инструмента D_{s1} позволяет получать плоскую поверхность детали. На данных схемах видно, что нормальная линейная скорость резания v_N , направленная перпендикулярно к режущей кромке инструмента в сочетании с касательной линейной скоростью резания v_T образуют линейную скорость резания инструмента v_r . Независимо от угла наклона режущей кромки λ скорость резания инструмента v_r будет перпендикулярна в любой точке режущей кромки к оси вращения инструмента. Но, учитывая скорости движения подачи инструмента v_{s1} и заготовки v_{s2} , результирующая скорость резания при попутном и встречном фрезеровании в различных точках соприкосновения режущего лезвия инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки будет разной.

Как при попутном, так и при встречном фрезеровании скорость движения подачи инструмента v_{s1} от точки начала врезания в заготовку до точки пересечения с осью детали имеет одно направление, которое затем меняется на противоположное (рисунки 2 и 3). Данное изменение направлений скорости движения подачи инструмента v_{s1} влияет на общее направление результирующей скорости резания. Направление результирующей линейной скорости обработки $v \uparrow$ и $v \downarrow$, будет зависеть от направления

суммарной скорости подачи v_{s1} и v_{s2} , включающей скорости движения подачи инструмента v_{s1} и заготовки v_{s2} в рассматриваемой точке.

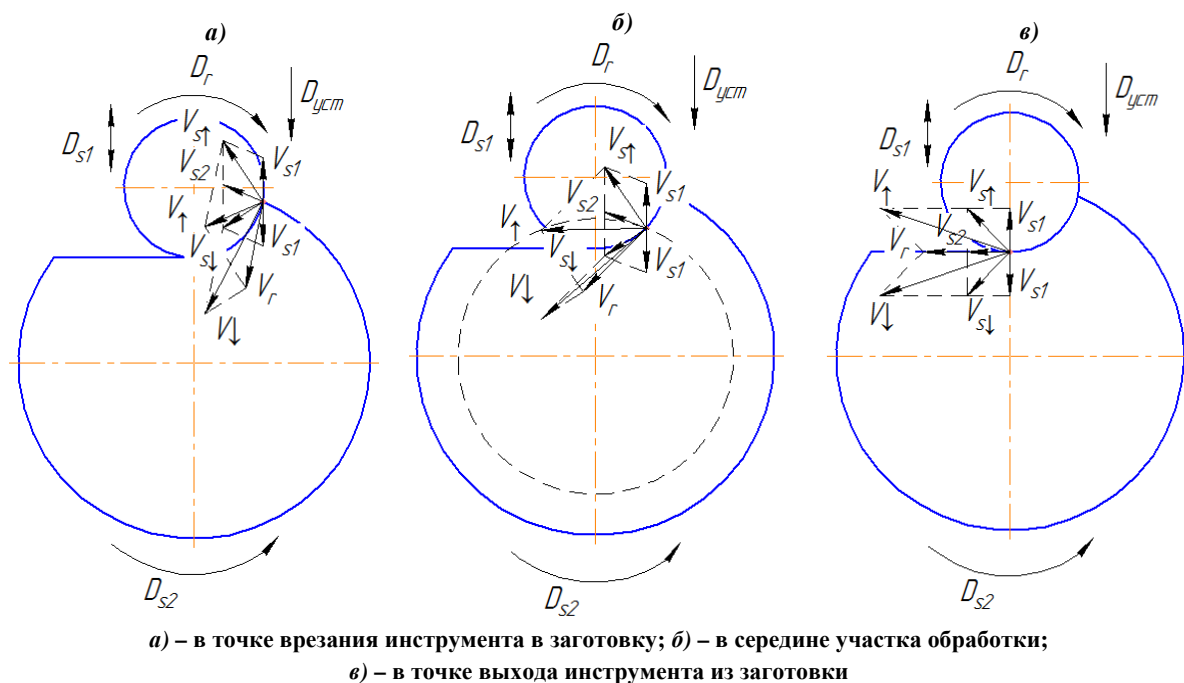


Рисунок 2. – Направления линейных скоростей резания при попутном фрезеровании плоской поверхности

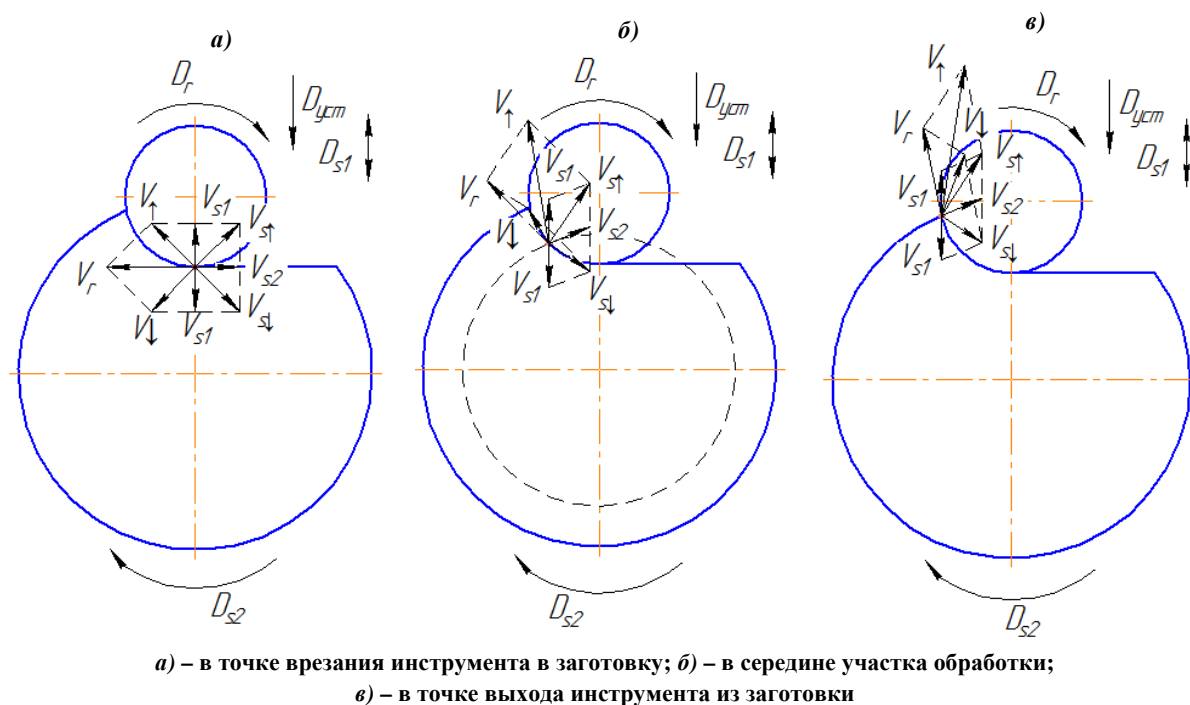


Рисунок 3. – Направления линейных скоростей резания при встречном фрезеровании плоской поверхности

Из рисунков 2 и 3 видно, что при попутном и встречном фрезеровании наблюдается угловое расхождение между результирующими скоростями обработки $v_{\uparrow}$ и $v_{\downarrow}$. Величина расхождения между результирующими векторами будет зависеть не только от скорости движения подачи инструмента v_{s1} , но и от разнонаправленности скорости резания инструмента v_r со скоростью подачи заготовки v_{s2} в рассматриваемой точке (при попутном фрезеровании скорость v_r и скорость заготовки v_{s2} в рассматриваемой точке направлены в одну сторону: при встречном – разнонаправлены).

Для определения величины результирующего вектора $\vec{v}_{\uparrow}$ или $\vec{v}_{\downarrow}$ воспользуемся теоремами косинусов и синусов. Расчетная схема нахождения результирующих скоростей представлена на рисунке 4.

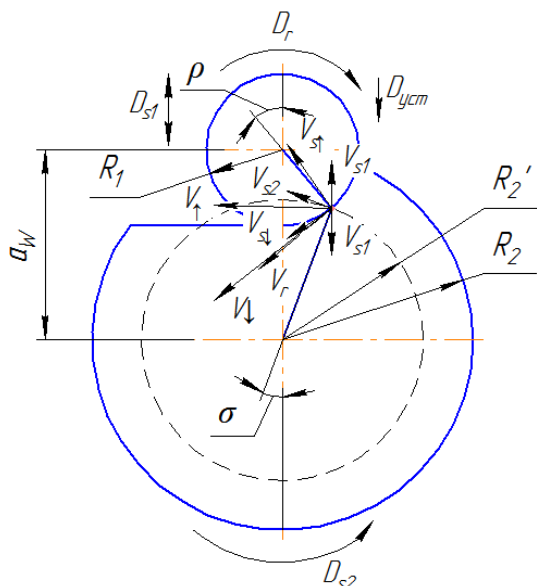


Рисунок 4. – Схема для определения результирующих линейных скоростей

При обработке плоскости вращающимся инструментом с радиусом R_1 цилиндрической заготовки с радиусом R_2 векторы линейных скоростей в любой точке обрабатываемого участка, которая расположена под некоторым углом ρ относительно центра инструмента определяются путем нахождения контактного радиуса заготовки R_2' . Этот радиус находится как $R_2' = \sqrt{a_w^2 + R_1^2 - 2 \cdot a_w \cdot R_1 \cdot \cos \rho}$. Зная этот радиус можно найти угол, под которым наклонен искомый радиус. Он находится следующим образом: $\frac{R_2'}{\sin \rho} = \frac{R_1}{\sin \sigma}$. Отсюда определяется угол наклона радиуса: $\sigma = \arcsin \frac{R_1 \cdot \sin \rho}{R_2'}$.

Зная этот угол и направление подачи можно определить направление вектора линейной подачи в рассматриваемой точке относительно центра заготовки, который расположен перпендикулярно к радиусу контактной окружности заготовки R_2' в рассматриваемой точке. Согласно правилу нахождения скалярного произведения, находим результирующий вектор подачи $v_{s\uparrow}$ или $v_{s\downarrow}$, направление которого зависит от направления подачи инструмента v_{s1} в рассматриваемой точке: $v_{s\uparrow}(v_{s\downarrow}) = v_{s1} \cdot v_{s2} \cdot \cos v_{s1} v_{s2}$. Отсюда, зная направление скорости резания инструмента v_r , линейный вектор которой расположен перпендикулярно к радиусу окружности инструмента R_1 в рассматриваемой точке, можно найти результирующие векторы линейных скоростей обработки $\vec{v}_{\uparrow}$ и $\vec{v}_{\downarrow}$: $v_{\uparrow}(v_{\downarrow}) = v_r \cdot v_{s\uparrow}(v_{s\downarrow}) \cdot \cos v_r v_{s\uparrow}(v_{s\downarrow})$.

Как известно, угол наклона режущей кромки λ рассматривается в инструментальной, статической и кинематической системах координат [3]. В инструментальной системе координат угол λ_L , по сути, угол заточки режущей кромки инструмента, рассматриваемого как геометрическое тело (вне процесса резания). Этот угол определяется между режущей кромкой и отсчетной осью или поверхностью инструмента. Например, для концевой фрезы угол λ_L – это угол между режущей кромкой и геометрической осью (осью симметрии) (рисунок 5).

Угол λ_C в статической системе координат – это угол установки инструмента на станке только при главном движении резания. В этом случае за отсчетную плоскость принимается основная плоскость, перпендикулярная вектору линейной скорости главного движения. Например, для концевой фрезы λ_C – это угол в статической плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью $Pv_c - Pv_c$.

В кинематической системе координат учитываются все элементарные движения резания и отсчетную основную плоскость проводят перпендикулярно вектору скорости резания (результирующему). Например, для концевой фрезы угол λ_K – это угол между режущей кромкой и кинематической основной плоскостью $Pv_K - Pv_K$.

При обработке плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (рисунок 6, а) возможные варианты расположения режущей кромки на цилиндрической и торцевой поверхностях фрезы представлены на рисунках 6, б и 6, в.

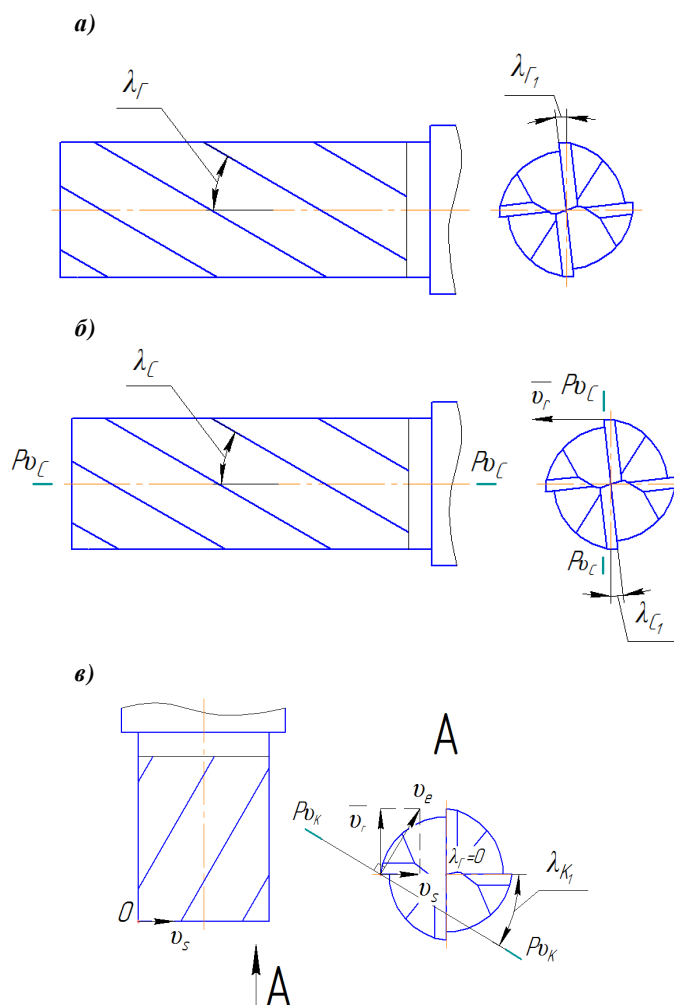


Рисунок 5. – Схема для определения угла наклона режущей кромки инструмента в инструментальной (а), статической (б) и кинематической (в) системах координат

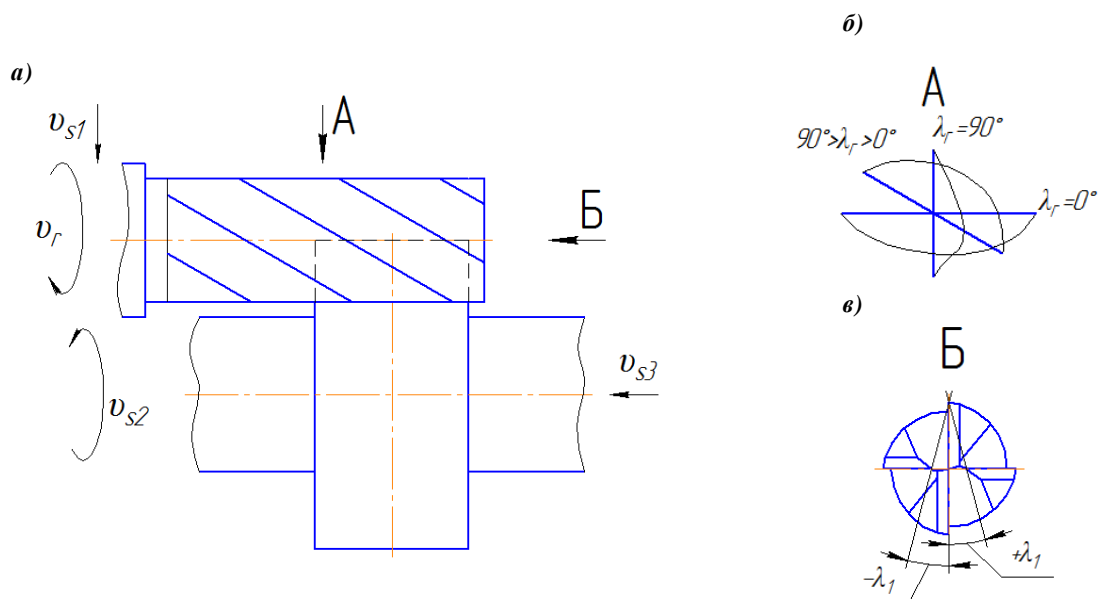


Рисунок 6. – Схема обработки плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (а) и возможные углы наклона режущей кромки на цилиндрической (б) и торцевой (в) поверхностях концевой фрезы

Если $\lambda_r = 0^\circ$ (см. Рисунок 6, б), то режущая кромка инструмента контактирует по максимальной ширине b , что приводит к росту сил и мощности резания. При $0^\circ < \lambda_r \leq 90^\circ$ резание возможно при подаче инструмента v_{s3} вдоль оси главного вращательного движения. В этом случае реализуется ротационное и плунжерное резание, для которых характерно снижение мощности резания за счет касательного движения.

При касательном движении важно соотношение линейных скоростей вращения инструмента и заготовки (передаточное отношение i_k). Если реализуется кинематическая схема резания точения, то $\frac{v_{II}}{v_3} \leq 1$ и оптимальным считается значение кинематического коэффициента $i_k = 0,5 \dots 0,6$, что соответ-

ствует изменению $60^\circ > \lambda_K > 30^\circ$. Если реализуется кинематическая схема фрезерования, то $\frac{v_3}{v_{II}} < 1$ и в

этом случае $i_k = 0,01 \dots 0,1$, то есть влияние изменения направления вектора линейной скорости заготовки на положение основной плоскости незначительно и им можно пренебречь.

При фрезеровании существенным является влияние изменения λ_c или угла установки осей вращения инструмента и заготовки на процесс резания, который для разных кинематических схем резания может принимать различные значения (рисунок 7).

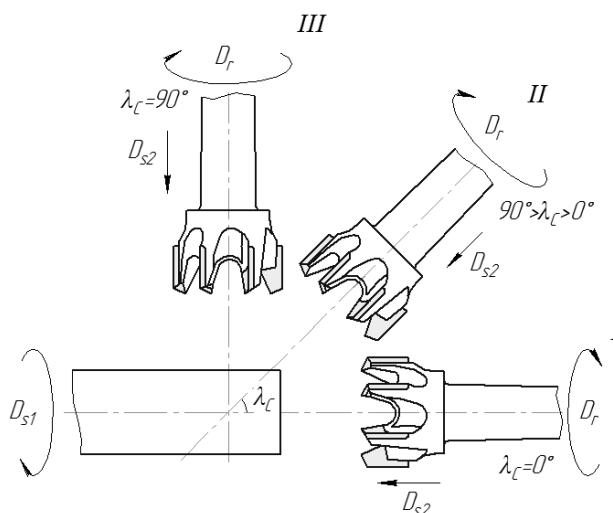


Рисунок 7. – Схемы установки вращающегося инструмента относительно вращающейся детали

Например, при обработке цилиндрической или конической поверхностей детали фреза и деталь соосны и $\lambda_c = 0^\circ$ (положение I фрезы на рисунке 7). При обработке неполной сферической поверхности детали оси вращения детали и фрезы наклонены относительно друг друга под углом $90^\circ \geq \lambda_c > 0^\circ$ (положения II и III фрезы на рисунке 7).

Заключение. Кинематический анализ различных схем обработки плоских, цилиндрических, сферических, винтовых (резьбовых) поверхностей деталей показывает, что им присуще движение режущей кромки по касательной к поверхности резания или обрабатываемой поверхности детали, характеризующееся соответствующими направлением и величиной линейной скорости резания. При этом возможно изменение значений геометрического угла наклона режущей кромки вращающегося инструмента в пределах от 0° до 90° за счет угла установки оси вращения детали или инструмента и положения основной плоскости в кинематической системе координат. Наличие касательного движения и трансформация угла наклона режущей кромки приводят к существенным изменениям физических характеристик процесса резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский, Г.И. Кинематика резания / Г.И. Грановский – М. : Машгиз, 1948. – 199 с.
2. Попок, Н.Н. Анализ особенностей кинематики и геометрии процесса высокоскоростного резания / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, М.В. Черневич // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : Междунар. науч.-техн. конф. : тез. докл. ; редколл.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2014. – С. 93–95.

3. Обработка резанием : ГОСТ 25762-83 ; Введ. 01.07.84. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 42 с.
4. Бобров, В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В.Ф. Бобров. – М. : Машгиз, 1962. – 152 с.
5. Бобров, В.Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В.Ф. Бобров, Д.Е. Иерусалимский. – М. : Машиностроение, 1972. – 111 с.
6. Коновалов, Е.Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко, А.В. Соусь. – Минск : «Наука и техника», 1972. – 272 с.
7. Землянский, В.А. Обработка высокопрочных материалов инструментами с самовращающимися резцами / В.А. Землянский, Б.В. Лупкин. – Киев : Техника, 1980. – 120 с.
8. Кушнер, И.С. Круглые вращающиеся резцы / И.С. Кушнер, В.В. Ледяев // Эффективные режущие и мерительные инструменты. – Куйбышев : Куйбыш. кн. изд-во, 1966. – С. 40–49.
9. Каширин, А.Н. Резание металлов принудительно вращающимся резцов системы Л.М. Ронин и А.Н. Каширин / А.Н. Каширин, Л.М. Ронин. // Изв. АН СССР, ОТН. – 1940. – № 7. – С. 39–46.
10. Рейхель, В. Методика определения стойкости резца и обрабатываемости материала / В. Рейхель // Мировая техника. – 1936. – № 4. – С. 6–14.
11. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с.
12. Попок, Н.Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимся инструментом : дисс. ... канд. техн. наук / Н.Н. Попок. – Минск, 1983. – 274 л.
13. Новоселов, Ю.А. Оптимизация процесса резания на основе сопоставительного анализа взаимосвязи выходных характеристик / Ю.А. Новоселов, Н.Н. Попок // Изв. Вузов. Машиностроение. – 1989. – № 5. – С. 149–153.
14. Способ обработки с оптимизацией режимов резания : а. с. В23В1/00 / П.И. Ящерицын, Ю.А. Новоселов, Н.Н.Попок. – Оpubл. 30.10.1985.

Поступила 05.07.2019

KINEMATICS OF PROCESSING SURFACES OF PARTS WITH A ROTATING CUTTING TOOL WITH A TANGENT MOVEMENT OF THE CUTTING EDGE

N. POPOK, V. ANISIMOV

Advantages of machining surfaces of the tool parts with tangential movement of the cutting edge, the results of research of kinematic parameters of the cutting process of planar, cylindrical, and spherical surfaces.

Keywords: *machining, cutting process, rotating cutting tool, tangent movement, angle of inclination of the cutting edge.*

УДК 621.793

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПСЕВДОСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

канд. техн. наук А.Н. ГРИГОРЧИК, Е.В. АСТРАШАБ,
 д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. КУКАРЕКО,
 канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ
 (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)
 канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН
 (Полоцкий государственный университет)

Исследовано структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства газотермических покрытий из сталей 08Г2С, 40Х13, 95Х18, а также покрытий из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1», «95Х18+Л63». Показано, что напыленные псевдосплавы содержат пониженное количество оксидов железа FeO и Fe₃O₄, что связано с обволакиванием стальных частиц более легкоплавкими частицами медных сплавов в процессе газотермического напыления. Установлено, что покрытия из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1» обладают более высокой износостойкостью при трении в паре со стальным контртелом по сравнению со стальными покрытиями из сталей 08Г2С и 40Х13. В свою очередь, газотермические покрытия из сталей 08Г2С, 40Х13 и 95Х18 характеризуются более высокой износостойкостью при трении по контртелу из латуни Л63 по сравнению с покрытиями из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1», «95Х18+Л63».

Ключевые слова: высокоскоростная металлизация, псевдосплавы, бронза, структура, фазовый состав, износостойкость.

Введение. Метод газотермического напыления является производительным и экономичным способом получения псевдосплавов из различных токопроводящих материалов [1]. К отличительным особенностям высокоскоростного напыления можно отнести: высокую скорость распыляемых частиц (выше 400 м/с), низкую пористость получаемых покрытий (~ 2% – 5%), а также высокий коэффициент использования напыляемого материала (0,85) [2]. Вместе с тем, структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства газотермических покрытий из псевдосплавов изучены недостаточно, что существенным образом ограничивает область их применения.

Целью данной работы является исследование структурно-фазового состояния и триботехнических свойств газотермических покрытий, полученных методом высокоскоростной металлизации путем совместного распыления стальной проволоки и проволоки из медного сплава.

Подготовка образцов и методики исследований. В качестве объектов исследований были выбраны газотермические покрытия из сталей 08Г2С, 40Х13, 95Х18 и покрытия из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1», «95Х18+Л63», напыленные методом высокоскоростной металлизации с использованием установки АДМ-10 [2]. Комбинированные покрытия из стали и бронзы, напылялись на пластины из стали 45 с размерами 100 × 50 × 6 мм. Химический состав напыленных псевдосплавов представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав псевдосплавов, полученных методом высокоскоростного напыления

Напыляемые материалы	Содержание элемента, масс. %											
	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo	Sn
08Г2С+БрКМц3-1	0,180	1,662	0,038	0,015	0,016	1,187	45,214	0,084	51,543	0,033	–	–
40Х13+БрКМц3-1	0,371	1,176	0,042	0,027	7,823	0,717	47,987	0,210	41,506	–	0,043	0,036
95Х18+Л63	–	0,049	0,052	0,012	6,489	0,089	25,801	0,219	43,830	23,459	–	–

Для исследований структуры, фазового состава и трибомеханических свойств из предварительно отшлифованных пластин с напыленными покрытиями вырезались образцы с размерами 8 × 6 × 5 мм.

Металлографические исследования газотермических покрытий проводились на оптическом микроскопе АЛБТАМИ МЕТ 1МТ. Исследование фазового состояния газотермических покрытий, проводилось на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном кобальтовом (CoK_α) излучении при напряжении 28 кВ и анодном токе 14 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялось при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2.

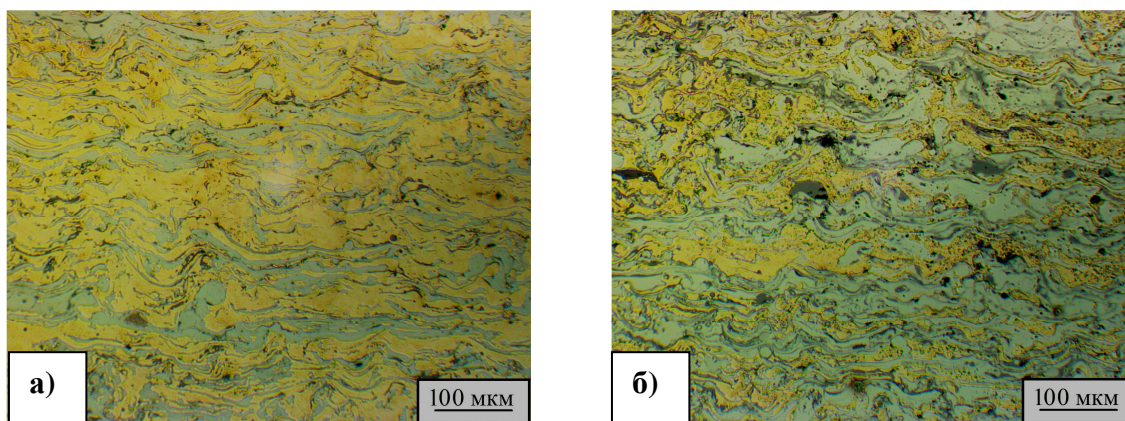
Триботехнические испытания образцов напыленного сплава проводились на трибометре АТВП. Испытания осуществлялись по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при

средней скорости взаимного перемещения $\approx 0,1$ м/с в режиме трения без смазочного материала. Удельная нагрузка испытаний составляла $p = 1,5$ МПа. При испытаниях использовалось контртело, изготовленное из закаленной стали У10 (800 HV10) и из латуни Л63 (100 HV 10.). Путь трения составлял ≈ 1200 м.

Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор $P = 10$ кг.

Результаты исследований и их анализ. В результате совместного напыления проволоки из стали и цветного металла, формируются покрытия, состоящие из стальных прослоек, прослоек цветного металла, а также оксидов. Характерные микроstructures псевдосплавов, полученных методом высокоскоростной металлизации, представлены на рисунке 1.

Пористость напыленных покрытий не превышала 5 об. %.



а) – «08Г2С+БрКМц3-1»; б) – «40Х13+ БрКМц3-1».

Рисунок 1. – Характерные микроstructures газотермических покрытий из псевдосплавов

Фазовый состав покрытий из псевдосплавов представлен в таблице 2 и на рисунке 2.

Можно видеть, что газотермические покрытия из высокохромистых сталей 95Х18 и 40Х13 в фазовом составе содержат α -Fe, γ -Fe и оксиды железа FeO, Fe₃O₄, а покрытие из низколегированной стали 08Г2С включает в себя α -Fe, FeO, Fe₃O₄ (см. Таблица 2, рисунок 2). В покрытиях из псевдосплавов, сформированных с использованием проволоки из медных сплавов и сталей, помимо вышеуказанных фаз, регистрируются медь (псевдосплавы «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1») и интерметаллидные фазы CuZn, Cu_{0.64}Zn_{0.36} в псевдосплаве «95Х18+Л63» (см. Таблица 2, рисунок 2). Также необходимо отметить, что во всех псевдосплавах регистрируется пониженное количество оксидов железа FeO, Fe₃O₄ (см. Рисунок 2). Это связано с тем, что в процессе газотермического напыления более легкоплавкие частицы медных сплавов обволакивают частицы железа и, тем самым, препятствуют их интенсивному окислению. Кроме этого, в фазовом составе напыленных псевдосплавов не регистрируются оксиды меди (см. Таблица 2, рисунок 2). По нашему мнению, отсутствие оксидов меди связано с их восстановлением в процессе газотермического напыления железом [3].

Таблица 2. – Фазовый состав газотермических покрытий

Материал псевдосплава	Фазовый состав	Твердость, HV 30
08Г2С	α -Fe, FeO, Fe ₃ O ₄	280
08Г2С+БрКМц3-1	Cu, α -Fe, FeO, Fe ₃ O ₄	145
40Х13	α -Fe, γ -Fe, Fe ₃ O ₄ , FeO	400
40Х13+БрКМц3-1	Cu, α -Fe, γ -Fe, Fe ₃ O ₄ , FeO	180
95Х18	γ -Fe, α -Fe, Fe ₃ O ₄ , FeO	360
95Х18+ Л63	α -Fe, γ -Fe, Cu, CuZn, Cu _{0.64} Zn _{0.36} , Fe ₃ O ₄	155

Твердость напыленных покрытий из псевдосплавов значительно ниже твердости покрытий, напыленных стальных покрытий (см. Таблица 2). В частности, твердость покрытий из монолитных сталей 08Г2С, 40Х13 и 95Х18 составляет 280, 400 и 360 HV 10, соответственно (см. Таблица 2). Твердость псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1» и «95Х18+Л63» составляет 145, 180 и 155 HV 10, соответственно (см. Таблица 2). Пониженная твердость псевдосплавов обусловлена присутствием в них мягких прослоек из бронзы.

Триботехнические испытания образцов газотермических покрытий из сталей и псевдосплавов проводились на контртелах из стали У10 и латуни Л63. Результаты триботехнических испытаний газотермических покрытий из псевдосплавов представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

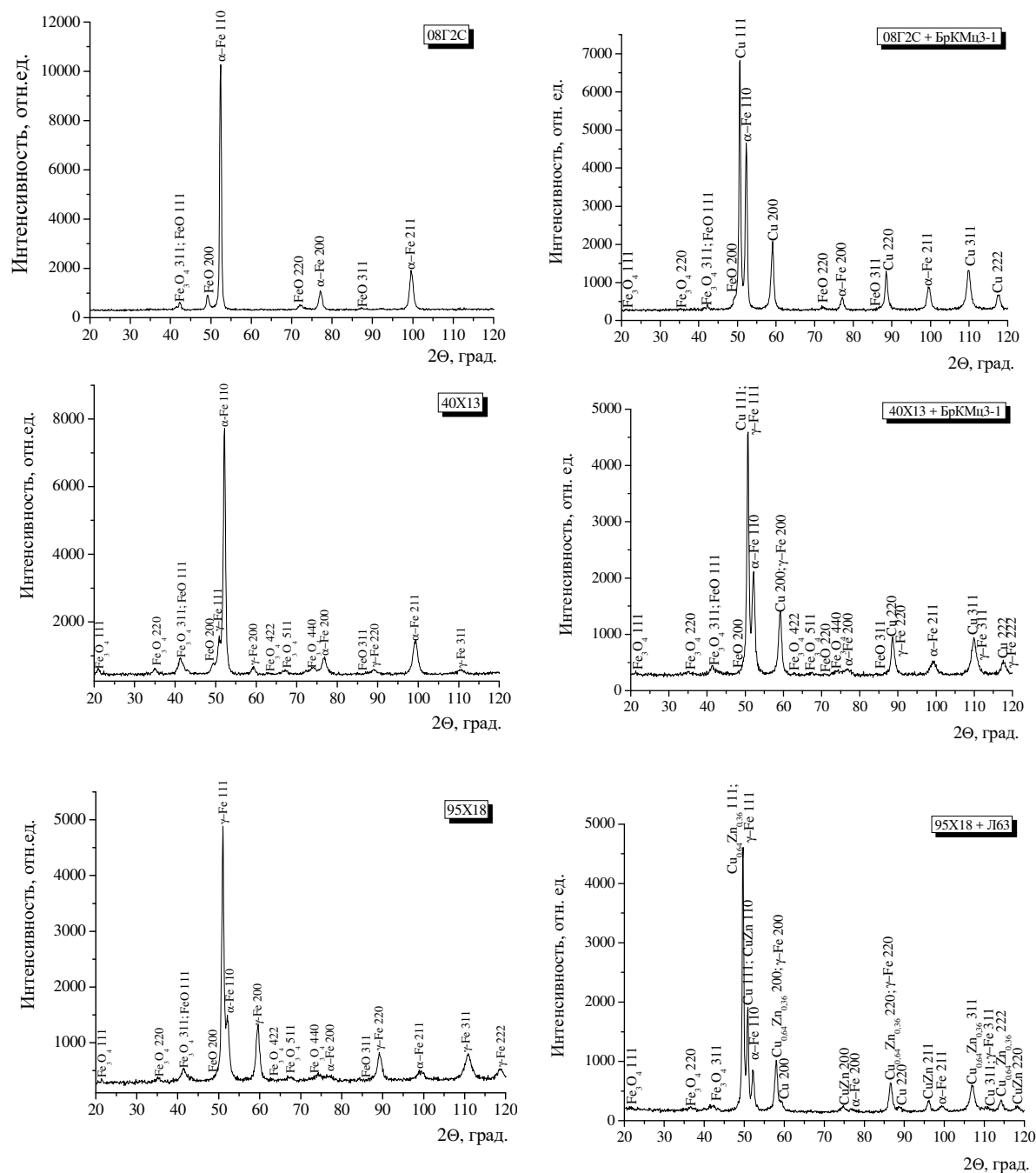


Рисунок 2. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α) от поверхностных слоев газотермических покрытий из сталей и псевдосплавов, напыленных методом высокоскоростной металлизации

Таблица 3. – Результаты триботехнических испытаний газотермических покрытий

Покрытие	Интенсивность массового изнашивания в условиях сухого трения, $\times 10^{-3}$ мг/м		Интенсивность линейного изнашивания контртела из латуни Л63, $\times 10^{-7}$
	Материал контртела		
	Сталь У10	Латунь Л63	
08Г2С	1450,0	33,2	2,3
08Г2С+КМц3-1	185,0	348,4	2,2
40Х13	8,6	3,3	2,7
40Х13+КМц3-1	4,7	29,7	2,6
95Х18	1,5	2,0	2,1
95Х18+Л63	13,5	392,3	2,0

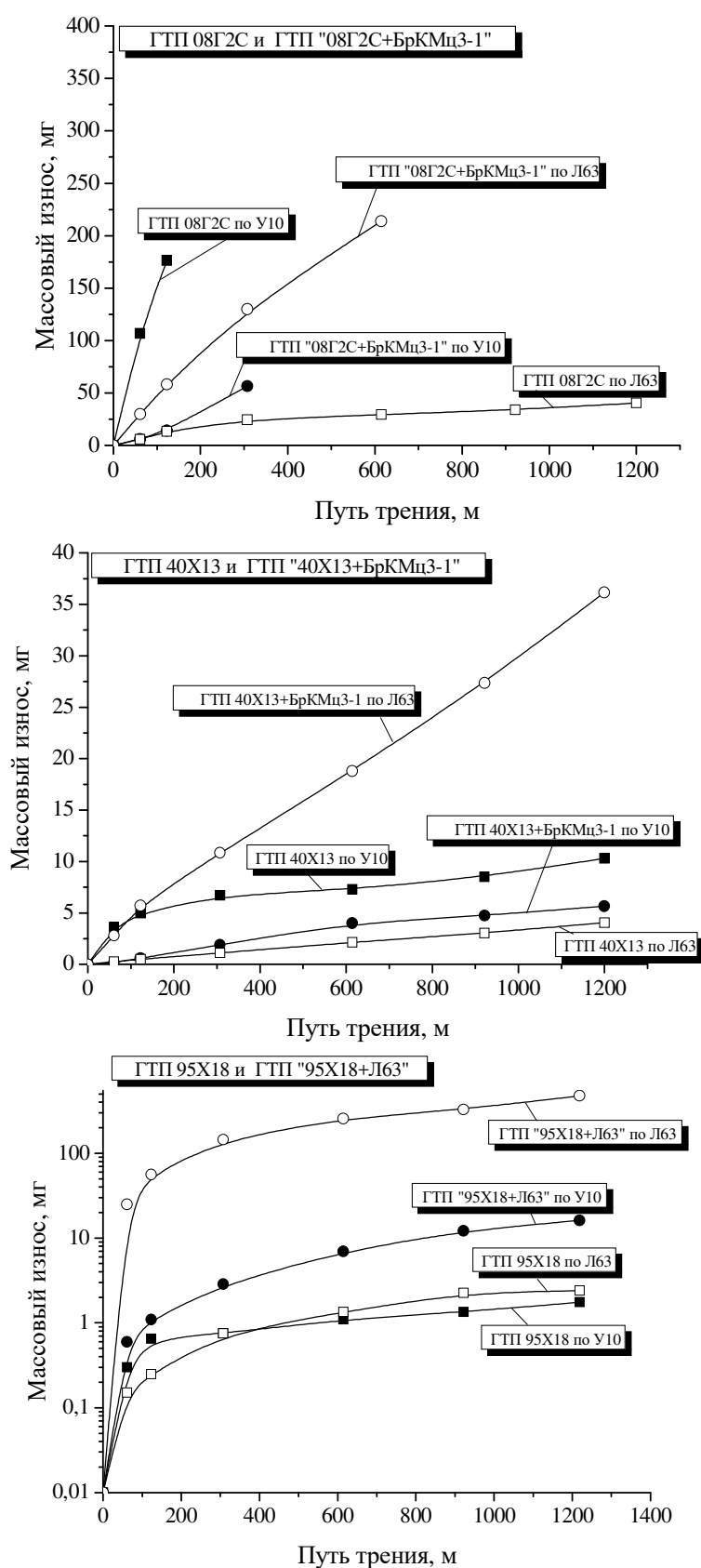


Рисунок 3. – Зависимости массового износа газотермических покрытий из различных материалов, полученных методом гиперзвуковой металлизации, от пути трения

Можно видеть, что износостойкость монопкрытий из сталей 08Г2С, 40Х13 и 95Х18 при трении в паре с контртелами из стали У10 и латуни Л63 возрастает с увеличением содержания в покрытиях углерода и хрома (см. Таблица 3). В свою очередь покрытия из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1» характеризуются более высокой износостойкостью при их триботехнических испытаниях в паре со стальным контртелом по сравнению с покрытиями из сталей 08Г2С и 40Х13 (см. Таблица 3, рисунок 3). В частности, интенсивности их массового изнашивания составляют $185,0 \times 10^{-3}$ и $4,7 \times 10^{-3}$, соответственно (см. Таблица 3). Более высокая износостойкость покрытий из псевдосплавов обусловлена низким содержанием в них оксидов железа (см. Рисунок 2), являющихся местами зарождения микротрещин и их распространения при трении. Однако покрытия из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1» при трении в паре с контртелом из латуни Л63 характеризуются пониженной износостойкостью, по сравнению с трением по контртелу из стали У10 (см. Таблица 3). При этом интенсивности их массового изнашивания составляют $348,4 \times 10^{-3}$ и $29,7 \times 10^{-3}$, соответственно (см. Таблица 3). Невысокая износостойкость покрытий из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1» при сухом трении по контртелу из латуни Л63 (см. Таблица 3) связана с интенсивным протеканием процессов адгезионного схватывания между материалами пары трения, содержащими медь.

Также необходимо отметить, что покрытие из стали 95Х18 имеет более высокую износостойкость в случае его триботехнических испытаний в паре со стальным контртелом из закаленной стали У10, по сравнению со случаем испытания с контртелом из латуни Л63 (см. Таблица 3, рисунок 3). Высокая износостойкость покрытия из стали 95Х18 в паре с закаленным контртелом из стали У10 связана с более интенсивным протеканием в его поверхностных слоях деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения [4; 5], по сравнению с покрытием, испытываемом в паре с контртелом из латуни Л63. Покрытия из псевдосплавов «95Х18+Л63» характеризуются пониженной износостойкостью в паре с контртелами из стали У10 и латуни Л63, по сравнению с покрытием из стали 95Х18 (см. Таблица 3). Интенсивное изнашивание покрытий из псевдосплавов «95Х18+Л63» связано с наличием в их фазовом составе хрупких интерметаллидных фаз CuZn, $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ (см. Таблица 2).

В результате проведенных исследований было выявлено, что при испытаниях псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1» и «95Х18+Л63» регистрируется несколько пониженный износ контртел из латуни Л63, по сравнению с износом контртел при испытаниях покрытий из сталей 08Г2С, 40Х13 и 95Х18 (см. Таблица 3).

Таким образом, использование газотермических покрытий из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1» целесообразно в узлах трения в паре с закаленными высокоуглеродистыми сталями. В свою очередь, использование покрытий из сталей 08Г2С, 40Х13 и 95Х18 перспективно в триботехнических узлах в паре с изделиями из медных сплавов. Покрытия на основе сталь-латунь не обеспечивают высоких триботехнических свойств в условиях сухого трения.

Заключение. Исследовано структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства газотермических покрытий из сталей 08Г2С, 40Х13, 95Х18, а также из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1», «95Х18+Л63». Показано, что покрытия из псевдосплавов содержат пониженное количество оксидов по сравнению с покрытиями из сталей, что связано с уменьшением интенсивности окисления стальных частиц в процессе металлизации за счет их обволакивания более легкоплавкими частицами медных сплавов.

Установлено, что газотермические покрытия из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1» и «95Х18+Л63» обладают повышенной износостойкостью в паре с закаленными стальными контртелами из стали У10 по сравнению с их износостойкостью в паре с контртелами из латуни Л63. В свою очередь, покрытия из сталей 08Г2С и 40Х13 характеризуются более высокой износостойкостью при их испытаниях по латуни Л63, по сравнению с износостойкостью в паре с закаленной сталью У10. Покрытия на основе сталь-латунь не обеспечивают высоких триботехнических свойств в условиях сухого трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск : УП «Технопринт», 2004. – 200 с.
2. Замена гальванического хромирования на технологию гиперзвуковой металлизации при ремонте деталей узлов трения скольжения / П.А. Витязь [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 10. – С. 2–5.
3. Калюкова, Е.Н. Свойства металлов и их соединений : учеб. пособие / Е.Н. Калюкова. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – 156 с.

4. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В.А. Кукареко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – М., 2017. – Т.13. – №7(151). – С. 318–322.
5. Кукареко, В.А. Деформационно-активированное мартенситное превращение в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей при сухом трении / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // ПОЛИКОМТРИБ-2015 : междунар. науч.-техн. конф. : тез. докл. ; редкол.: В.Н. Адериha [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 75.

Поступила 10.08.2019

WEAR RESISTANCE OF GAS-THERMAL COATINGS FROM COPPER-ALLOYS ON THE BASIS OF COPPER OBTAINED BY HIGH-SPEED METALLIZATION METHOD

A. GRIGORCHIK, E. ASTRASHAB, M. BELOTSEKOVSKIY,
A.V. SOSNOVSKIY, A. DUDAN

The structural phase state and tribotechnical properties of gas-thermal coatings from 08G2S, 40Cr13, 95Cr18 steels, as well as coatings from pseudo-alloys 08G2S + BrKMC3-1, 40Cr13 + BrKMC3-1, 95Cr18 + L63, were investigated. It is shown that sprayed pseudo-alloys contain a reduced amount of iron oxides FeO and Fe₃O₄, which is associated with the enveloping of steel particles by more easily fusible particles of copper alloys during gas thermal spraying. It has been established that coatings from pseudo-alloys 08G2S + BrKMC3-1 and 40Cr13 + BrKMC3-1 have higher wear resistance during friction paired with steel counterbody compared to steel coatings from 08G2S and 40Cr13 steels. In turn, gas-thermal coatings from 08G2S, 40Cr13 and 95Cr18 steels are characterized by higher wear resistance during friction on the counterbody made of brass L63 compared to coatings from pseudo-alloys 08G2S + BrKMC3-1, 40Cr13 + BrKMC3-1, 95Cr18 + L63.

Keywords: high-speed metallization, pseudo-alloys, bronze, structure, phase composition, wear resistance.

УДК 621.793.724 + 621.794.61

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ОКСИДИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ,
НАНЕСЕННЫХ НА ПОЛИМЕРЫ**

д-р техн. наук М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, И.И. ТАРАН, П.И. КОТ
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)
канд. техн. наук А.В. ДУДАН
(Полоцкий государственный университет)

Определены режимы гиперзвуковой металлизации алюминиевых покрытий на основу из термопластичных полимеров, позволяющие обеспечить прочность сцепления покрытий до 7,5 МПа. Разработано оборудование микродугового оксидирования для формирования оксидокерамических слоев на поверхности газотермических покрытий из Al, нанесенных на полимерные материалы. Показано, что износостойкость оксидированных поверхностей алюминиевых покрытий при сухом трении в 2 и более раз превышает износостойкость высокопрочного чугуна марки ВЧ50-7.

Ключевые слова: *металлические покрытия на полимерах, гиперзвуковая металлизация, микродуговое оксидирование, интенсивность изнашивания, коэффициент трения.*

Введение. Технология металлизации пластмасс очень широко используется в современной промышленности. Она позволяет увеличить теплопроводность поверхности полимера или обеспечить его электропроводность, дает возможность отражать электромагнитное излучение, а также снизить газопроницаемость, повысить прочность и износостойкость полимерного материала, улучшить внешний вид и поверхностные свойства изделий.

Наибольшее распространение в промышленном производстве получили два метода металлизации полимерных изделий – напыление в высоком вакууме и гальваническое осаждение [1]. Процесс вакуумного напыления производителен, однако толщина покрытия при этом составляет от 0,5 до 5 мкм. Гальванические технологии позволяют осаждать на полимерах металлические слои до 40 мкм, однако при этом возникают определенные экологические проблемы. Кроме того, адгезия электрохимических покрытий на полимерах не превышает 2 МПа.

Весьма перспективным направлением для аэрокосмической промышленности представляется замена металлических деталей на полимерные с металлическими покрытиями, что позволит значительно снизить массу изделия. При этом необходима разработка таких приемов формирования покрытий, которые бы обеспечили их толщину 0,2 – 0,5 мм при адгезии не ниже 4 МПа, т.е. позволили бы сохранить определенную механическую прочность.

Наиболее приемлемым методом нанесения толстослойных металлических покрытий на полимерных материалах является газотермическое напыление, а в частности – электродуговая металлизация. Данный метод позволяет наносить покрытия толщиной более 50 мкм. Наиболее перспективным способом нанесения толстослойных металлических покрытий является технология гиперзвуковой металлизации (ГМ) [2].

Анализируя технологию гиперзвуковой металлизации, можно предположить, что она позволит обеспечить повышенную прочность сцепления высокоплотных металлических покрытий на полимерной подложке. В связи с этим были проведены работы по экспериментальному исследованию влияния технологического процесса гиперзвуковой металлизации на прочность сцепления алюминиевого покрытия, напыленного на образцы из полиамида ПА6. С целью дальнейшего снижения веса элементов конструкций было предложено использовать полимерные материалы с нанесенным алюминиевым покрытием и керамическим слоем, полученным микродуговым оксидированием (МДО) на поверхности покрытия [3]. Использование полимерных материалов в качестве основы обусловлено тем, что большинство конструкционных полимеров имеет плотность в 1,5 – 2 раза меньшую, чем алюминий и его сплавы.

Данная работа посвящена выбору технологических приемов гиперзвуковой металлизации, обеспечивающих максимальную адгезию алюминиевых покрытий с полимерной основой, разработке оборудования и процесса микродугового оксидирования напыленных покрытий, исследованию триботехнических характеристик оксидированных поверхностей покрытий.

Исследование влияния на адгезию покрытий режимов подготовки поверхности и гиперзвуковой металлизации. Для обеспечения необходимой прочности сцепления, которая в зависимости от природы материалов пары «покрытие – подложка» обуславливается механическими либо физико-химическими связями, металлизированную поверхность подвергают предварительной подготовке. Наиболее широко применяется струйно-абразивная обработка. Такая подготовка очищает поверхность и выво-

дит ее из состояния термодинамического равновесия со средой, освобождая межатомные связи поверхностных атомов, т.е. химически активирует подложку.

Образцы из полиамида ПА6 и полипропилена ПП, армированного стекловолокном, подвергались дробеструйной обработке. При этом использовали колотую чугунную дробь ДЧК фракцией от 0,15 мм до 1,8 мм (ГОСТ 11964-81). Применялись следующие режимы дробеструйной обработки: давление сжатого воздуха 0,6 МПа; расход сжатого воздуха 0,7 м³/мин; угол атаки 70–90°; расстояние до обрабатываемой поверхности 60–80 мм; время обработки 10 см² – не менее 2 мин (до появления матового цвета).

Нанесение покрытий на образцы осуществлялось не позже 1 ч после проведения дробеструйной обработки. Для гиперзвуковой металлизации использовали установку АДМ-10 конструкции ОИМ НАН Беларуси. При нанесении покрытия, помимо непосредственного напыления алюминия на полимер, также использовали подслои. На основании проведенных предварительных исследований [4] в качестве подслоя использовали цинк, никель, сплав цинка и алюминия Zn Al15.

Испытания на прочность сцепления (адгезию) газотермических покрытий с полимерными материалами проводили с использованием адгезиметра покрытий ELCOMETER 506 (производство Elcometer Ltd, Великобритания) (рисунок 1), который предназначен для измерения адгезии покрытия к основанию материала.



Рисунок 1. – Внешний вид адгезиметра ELCOMETER 506 с образцами

Поверка осуществлялась по документу МП 061.Д4-15 «ГСИ. Адгезиметр покрытий ELCOMETER 506. Методика поверки», утвержденному ФГУП «ВНИИОФИ» 24.11.2016 (акт № 4670). Результаты испытаний приведены в таблице 1 и на рисунках 2, 3.

Таблица 1. – Режимы напыления покрытий и их прочность сцепления с полимерной подложкой

Материал подслоя	Материал покрытия	Условия подготовки и режимы напыления	Прочность сцепления покрытий, МПа
Алюмоцинк Zn Al15	Алюминий АД1	Дробь; $U_m = 30$ В; Дистанция обработки (L) = 150 мм; Давление воздуха (P_a) ¹ = 0,2–0,4 МПа; Давление пропана (P_p) ² = 0,2–0,4 МПа	2,9 – 3,5
Цинк Ц1	Алюминий АД1	Дробь; $U_m = 28$ В; $L = 150$ мм; $P_a = 0,45$ МПа; $P_p = 0,4$ МПа	3,5 – 4,0
Никель НП-2	Алюминий АД1	Дробь; $U_m = 32$ В; $L = 150$ мм; $P_a = 0,4$ МПа; $P_p = 0,37$ МПа	6,0 – 7,5

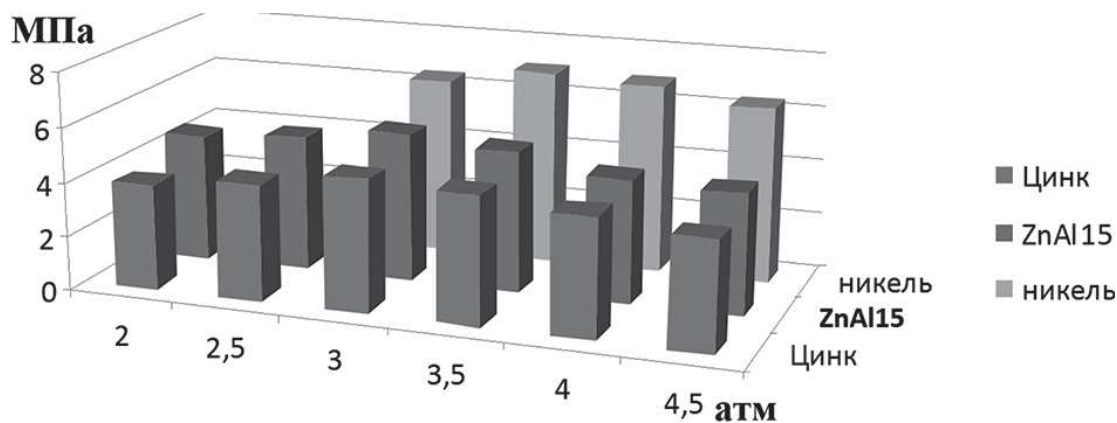


Рисунок 2. – Влияние давления воздуха на прочность сцепления различных подслоев с полимерной подложкой при ГМ

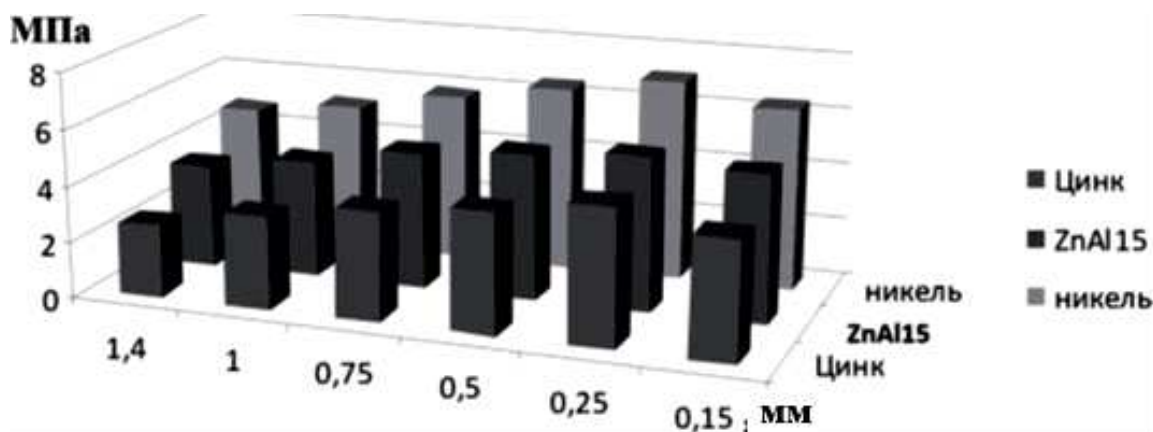


Рисунок 3. – Влияние размера дроби, используемой для подготовки под напыление, на прочность сцепления различных подслоев с полимерной подложкой при ГМ

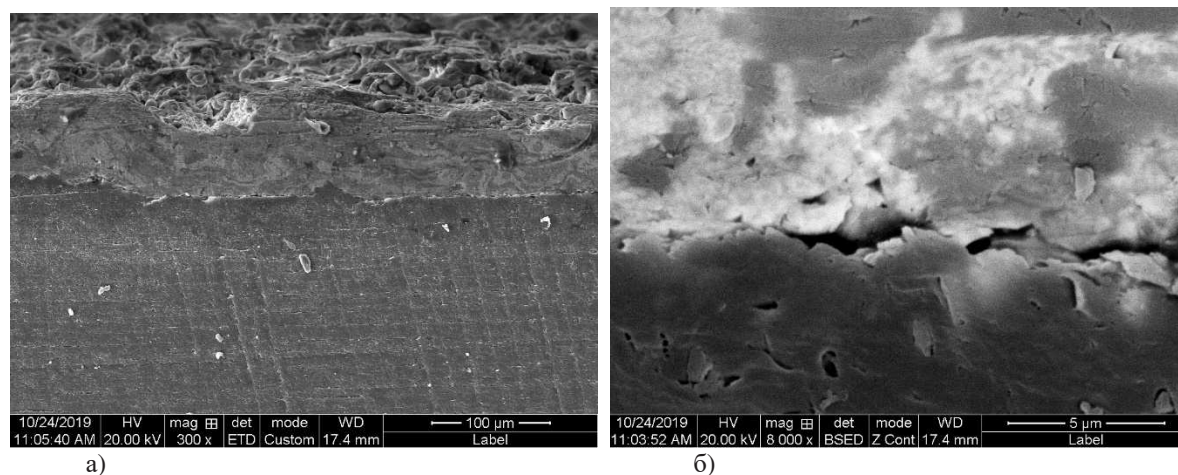
В результате исследования было определено влияние давления воздуха, используемого для формирования распыляющей пропано-воздушной струи (рисунок 2), а также грануляции абразива, используемого для подготовки напыляемой поверхности (рисунок 3), на прочность сцепления покрытия с основой.

Исследования показали, что наибольшую прочность сцепления покрытия с основой (6–7,5 МПа) обеспечивает подслои из никеля, а наименьшую (2,5–3,5 МПа) – подслои из цинка. Установлено, что наибольшая прочность сцепления подслоя из цинка и алюминия обеспечивается при давлении, подаваемом на распыление газа, 0,3 МПа, в то же время, для никеля данная величина составляет 0,35 МПа.

Исследования влияния дробеструйной подготовки поверхности на прочность сцепления показали, что наибольшую адгезию обеспечивает дробь грануляцией 250 мкм. Причем эта величина соответствует для всех типов подслоя, а также для различных давлений газа, подаваемого на напыление.

Исследования зоны «покрытие – полимерная подложка», проведенные с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta FEG 450, показали, что после металлизации цинком наблюдается четко фиксируемая трещина между покрытием и полимерной основой (рисунок 4). При нанесении никеля регистрируются только внедрившиеся частицы металла в полимер без трещин и расслоений (рисунок 5).

Иллюстрируемый результат взаимодействия капель металлов с полимерной подложкой обусловлен, прежде всего, теплофизическими процессами, происходящими в зоне их контакта, изучение которого является темой отдельного исследования. На сегодняшний день можно только объяснить факт более высокой адгезии у никелевых подслоев по сравнению с цинковыми, образованием у последних четкой границы раздела в ходе усадки при остывании напыленного слоя.

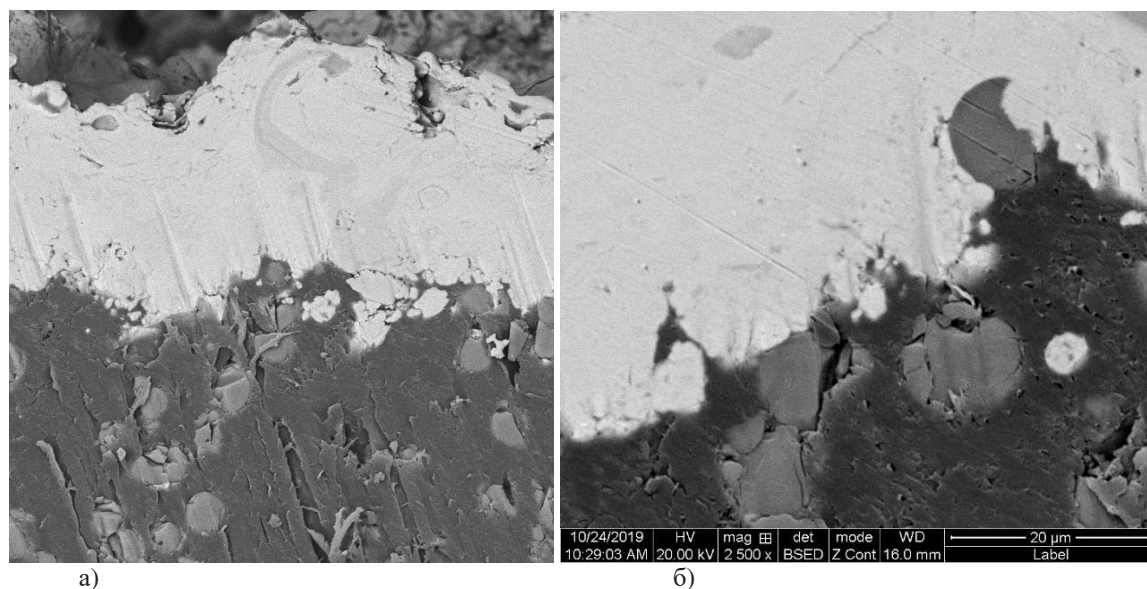


а)

б)

а) x 300; б) x 8000.

Рисунок 4. – Зона между цинковым покрытием и полимерной (ПА6) основой



а)

б)

а) x300; б) x2500.

Рисунок 5. – Зона между никелевым покрытием и полимерной (ПП армированный) основой

Формирование оксидокерамического слоя на поверхности алюминиевых покрытий. Микродуговое оксидирование напыленных покрытий осуществляли на установке, разработанной и изготовленной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси (рисунок 6). В комплект МДО установки входят электролитическая ванна и технологический источник тока. Основные технические характеристики установки представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Основные технические характеристики установки МДО

Объем электролитической ванны, л	5
Обрабатываемая площадь изделия, дм ² , не более	1
Входное напряжение 50 Гц, В (эфф.)	380
Потребляемая мощность, кВт	8
Максимальное выходное напряжение, В	500
Пределы регулирования рабочего напряжения, В	150÷500
Максимальный выходной ток, А	16
Пределы регулирования тока, А	0,1÷16
Относительная точность установки среднего значения анодного и катодного токов, %	1
Наличие защиты от тока перегрузки и короткого замыкания	



Рисунок 6. – Установка микродугового оксидирования газотермических покрытий

В силовой части технологического источника тока применены два однофазных тиристорных регулятора с обратной связью по току, предназначенные для стабилизации тока положительной и отрицательной полярности, соответственно. Выходные сигналы регуляторов поступают на входы генератора защиты, где происходит формирование импульсов управления силовыми тиристорами. Это позволяет независимо регулировать анодную и катодную составляющие тока.

В качестве электролита использовали следующий состав: гидроксид калия КОН – 3 г/л; силикат натрия Na_2SiO_3 – 5 г/л; изопропиловый спирт – 25 г/л. При изготовлении электролита использовались компоненты, чистотой не ниже «чда», и дистиллированная вода двойной очистки. Параметром, задающим режимы МДО, является плотность тока, которая изменяется от 20 до 50 А/дм², который, в свою очередь, определяется средним значением анодного тока и фактической площадью обрабатываемого образца. Предельные отклонения от значений задаваемых токов составляли не менее ± 1 А.

Установлено, что характер протекания процессов микродугового оксидирования напыленных покрытий практически не отличался от описанных в научно-технической литературе и наблюдаемых при обработке литого и катанного алюминия. Этот вывод подтвердили исследования микротвердости покрытий по глубине оксидированного слоя и оценка их состава. Напыленные и обработанные методом микродугового оксидирования покрытия, имели неоднородное по глубине строение и состав (рисунок 7).

В покрытии четко выделяются четыре зоны: слой напыленного алюминия, который не изменил своего состава после микродугового оксидирования; зона перехода между оксидированным слоем и алюминием; основной оксидированный слой; рыхлый поверхностный слой. Область с наивысшей твердостью 8,6–10,5 ГПа, косвенно свидетельствующая о наличии в ней твердофазных растворов компонентов алюминиевого сплава с оксидами α - Al_2O_3 и γ - Al_2O_3 , находилась на расстоянии 45–55 мкм от зоны перехода к неоксидированному материалу покрытия и снижалась до 3,7–5,6 ГПа при переходе к поверхности.

В процессе исследований было отмечено уменьшение времени оксидирования на 8–15% при увеличении поверхностной пористости напыленного слоя. Однако при этом снижалась максимальная твердость оксидированного покрытия. Повышение объемной пористости покрытий, полученной в процессе напыления, позволяло значительно увеличить толщину оксидированного слоя. Обратный эффект возникал при увеличении содержания кислорода (количества окислов) в покрытиях.

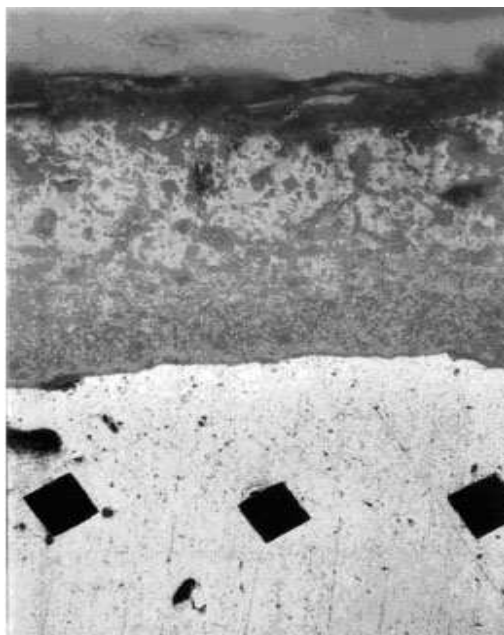


Рисунок 7. – Напыленное покрытие с оксидированным слоем (x500)

Результаты триботехнических испытаний. Триботехнические испытания проводили в условиях без смазки на установке, воспроизводящей схему трения при возвратно-поступательном движении прямоугольного образца по неподвижно закрепленной стальной пластине (машина трения АТВП). Скорость скольжения при этом изменялась от 0,1 до 0,45 м/с, нагрузка – 10 Н. Контртело изготавливалось из стали 45 твердостью 45–50 HRC. Шероховатость контртела составляла $Ra = 0,63–0,32$.

На первом этапе триботехнических испытаний оценивалась износостойкость оксидированных напыленных покрытий в условиях сухого трения скольжения при нормально приложенной нагрузке на образцы величиной в 10 Н и скорости скольжения 0,2 м/с (рисунок 8).

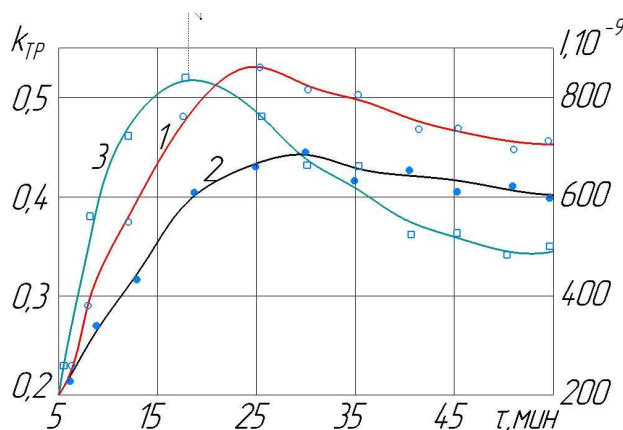


Рисунок 8 – Кинетика изменения коэффициента трения (1, 2) и интенсивности изнашивания (3) оксидированных покрытий при сухом трении на воздухе (2, 3) при влажности 67% и в термостате (1) при влажности 20%

Установлено (см. Рисунок 8), что на коэффициент сухого трения оказывает влияние влажность окружающего воздуха. Термостатируя узел трения путем помещения его под стеклянный колпак и прогрева заключенного под колпаком объема воздуха в течение 3 ч при температуре 300–305 К, была достигнута влажность 20–23 %. При этих условиях коэффициент сухого трения составил 0,48–0,53. Исследования при комнатной температуре и влажности воздуха 60–65% показали, что коэффициент сухого трения снизился до 0,40. Смочив поверхность контртела дистиллированной водой, получили снижение коэффициента трения до 0,12, а маслом И-50 – до 0,065.

Как правило, в начальный момент времени при сухом трении коэффициент трения составлял 0,2, затем в течение 10–15 мин. наблюдалось его резкое возрастание до максимальных значений, и после 25–35 мин. – небольшое снижение до стационарных величин. Смачивание водой и маслом обеспечивало работу узла в режиме граничного трения, стабилизация коэффициента трения происходит в течение 20–60 с.

Для сравнительной оценки износостойкости оксидированных слоев были испытаны образцы из высокопрочного чугуна марки ВЧ50-7, закаленные путем нагрева газовым пламенем и охлаждением в масле до твердости 50–55 HRC. Интенсивность изнашивания образцов при сухом трении составила от 320 до 400 мкм/км, что в 2 и более раз превышает интенсивность изнашивания зоны 3 оксидированного напыленного покрытия.

Выводы. В результате выполненных исследований было установлено, что при напылении алюминиевого покрытия методом гиперзвуковой металлизации на термопластичные полимеры наибольшую прочность сцепления (до 7,5 МПа) можно обеспечить, используя в качестве подслоя никель, при этом дробеструйную подготовку необходимо осуществлять дробью грануляцией 250 мкм.

Разработана установка МДО, позволяющая формировать оксидокерамические покрытия на поверхности газотермических покрытий из алюминия, нанесенных на полимерные материалы методом гиперзвуковой металлизации.

Показано, что коэффициент сухого трения оксидированных алюминиевых покрытий зависит от влажности окружающего воздуха, составляя 0,5 при влажности 20%, и снижаясь до 0,4 при влажности 65%. Установлено, что износостойкость оксидированных поверхностей алюминиевых покрытий при сухом трении в 2 и более раз превышает износостойкость высокопрочного чугуна марки ВЧ50-7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение полимеров в машиностроении [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mplast.by/encyklopedia/primenenie-polimerov-v-mashinostroenii/>. — Дата доступа: 13.03.2018.
2. Оценка возможности использования гиперзвуковой металлизации при восстановлении элементов гидросистем / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета, Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 36 – 42.
3. Витязь, П.А. Упрочнение газотермических покрытий / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский. – Минск : Бестпринт. – 2004 г. – 192 с.
4. Белоцерковский, М.А. Газотермическое нанесение металлических покрытий на полимерные материалы / М.А. Белоцерковский, И.И. Таран, О.О. Мосейчук // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : междун. науч.-техн. конф., Минск, 5 апр. 2017 г. : тез. докл. / редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2017. – С. 30–32.

Поступила 16.05.2019

TECHNOLOGY FOR OBTAINING AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF OXIDIZED ALUMINUM COATINGS APPLIED TO POLYMERS

M. BELOTSERKOVSKY, I. TARAN, P. KOT

The modes of hypersonic metallization of aluminum coatings on a base of thermo-plastic polymers are determined, which allow ensuring the adhesion strength of coatings up to 7.5 MPa. MDO equipment has been developed for the formation of oxide-ceramic layers on the surface of gas-thermal coatings made of Al deposited on polymer materials. It is shown that the wear resistance of oxidized surfaces of aluminum coatings under dry friction is 2 or more times higher than the wear resistance of high-strength cast iron of the VCH50-7 brand.

Keywords: metal coatings on polymers, hypersonic metallization, micro-arc oxidation, wear intensity, coefficient of friction.

УДК 621.791

К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОХИРУРГИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

канд. техн. наук А.Г. ДУБКО,
канд. техн. наук Н.А. ЧВЕРТКО

(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев)

д-р техн. наук А.В. ЛЕБЕДЕВ

(Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского)

Использование в хирургии аппаратуры и инструментов, разработанных в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, требует повышенного внимания к вопросам электробезопасности оперирующего хирурга и пациента. Диэлектрическое покрытие токоведущих частей электрохирургического инструмента должно защищать прилегающие к ним ткани от воздействия тока, который приводит к нежелательному нагреву и повышенной опасности возникновения пробоя. Поэтому защита электрохирургического инструмента от пробоя изоляции является актуальной задачей. Для биполярного электрохирургического лапароскопического инструмента определены зоны возможного пробоя изоляции, связанные с условиями его эксплуатации. Предварительно проведенные эксперименты подтверждают, что существенное влияние на электробезопасность использования электрохирургических инструментов оказывает действие агрессивных сред (при обязательной их дезинфекции и стерилизации перед проведением хирургического вмешательства). Экспериментально определены оптимальные толщины изоляционного покрытия на основе эпоксидных смол, необходимые для обеспечения его электрической прочности. Испытания на пробой напряжением 1500 В электрохирургические инструменты с покрытием толщиной 250 мкм выдержали в полном объеме, что соответствует требованиям нормативных документов на разработку медицинских изделий.

Ключевые слова: электрохирургические инструменты, изоляционные покрытия, электрическая прочность, стерилизация, пробой.

Введение. В настоящее время одним из приоритетных направлений Института электросварки (ИЭС) им. Е.О. Патона НАН Украины является разработка и внедрение передовых электрохирургических технологий и аппаратуры в медицинскую практику [1]. Разработан медицинский комплекс для биполярной высокочастотной коагуляции, сварки и резки биологических тканей, который состоит из аппарата «Электрокоагулятор высокочастотный сварочный ЕКВЗ-300» и набора электрохирургических инструментов [2]. При разработке хирургических аппаратов и инструментов в ИЭС, повышенное внимание было уделено вопросам электробезопасности оперирующего хирурга и пациента.

Изоляционное покрытие токоведущих частей электрохирургического инструмента необходимо для защиты прилегающих к нему тканей от воздействия тока, который приводит к нежелательному нагреву и возможному его пробое. Поэтому защита электрохирургического инструмента от пробоя изоляции является актуальной задачей.

Для прогнозирования условий возникновения пробоя покрытия и определения срока службы электрохирургических инструментов, необходимо знать причины, которые вызывают снижение электрической прочности твердой изоляции. Твердая изоляция включает в себя все виды твердых диэлектриков – от пленок до толстой монолитной. Наиболее сильное влияние на электрическую прочность твердой изоляции оказывают температура нагрева и толщина, длительность воздействия напряжения. Кроме того, электрическая прочность твердой изоляции зависит от: формы электрического поля; вида напряжения и полярности; однородности диэлектрика; электрофизических характеристик. Известны три вида пробоя твердого диэлектрика: электрический; тепловой; старение [3–7]. Для создания изоляционных конструкций применяются разнообразные твердые диэлектрические материалы, отличающиеся происхождением, структурой, физико-механическими свойствами и электрическими характеристиками.

Основная часть. Особенностью твердой изоляции является возможность ее теплового пробоя вследствие затрудненного теплоотвода. Поэтому твердые диэлектрики должны обладать малыми диэлектрическими потерями, высокой теплостойкостью и хорошей теплопроводностью. Даже небольшой, не видимый глазом дефект может привести к пробое изоляционного покрытия. Опасность нарушения изоляции зависит от расположения дефекта. Например, на рисунке 1 показан лапароскопический биполярный электрохирургический инструмент с зонами возможного расположения дефектов изоляции.

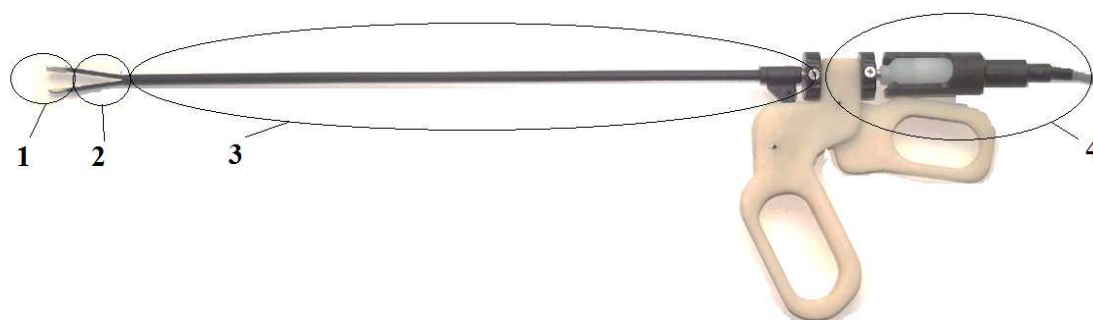


Рисунок 1. – Лапароскопический биполярный электрохирургический инструмент с зонами возможного расположения дефектов изоляции (1 – 4)

Зона 1 расположена в дистальной части электродов биполярного электрохирургического инструмента и находится в поле зрения хирурга. В этой зоне могут происходить нарушения изоляции инструмента из-за постоянного термического воздействия в рабочей зоне электродов. При этом термически повреждаются ткани органов, близко расположенные к дефекту, и происходит их высушивание с возрастанием электрического сопротивления, приводящее к образованию ожога и потере эффективности работы электрохирургического инструмента.

В зоне 2 повреждение изоляции браншей лапароскопа происходит из-за трения, возникающего в момент перемещения изолированных браншей через троакар.

В зоне 3, расположенной внутри троакара, нарушения изоляции в троакаре может также вызвать термические повреждения тканей органов. Дефекты изоляции, возникающие в месте подключения кабеля (зона 4) практически безопасны для пациента, но могут вызвать ожог кисти хирурга.

Известно, что полимерные материалы являются хорошими диэлектриками, поэтому используются в медицинской практике [8]. Широкое применение в электроизоляционной технике находят покрытия на основе эпоксидных смол, отличающихся высокой стойкостью к тепловому старению и повышенной влагостойкостью, которые также характеризуются высокой износостойкостью. Использование полимерных слоев в сочетании с формообразующим термостойким металлическим основанием позволяет создавать надежно работающие фрикционные сопряжения, которые могут применяться при производстве электрохирургических инструментов.

На качество выполнения хирургических вмешательств влияет «прилипание» биологических мягких тканей к поверхностям электрохирургических инструментов при их нагреве, что резко ухудшает технико-экономические показатели их работы. Использование полимерных материалов во многом способствует решению этой проблемы.

Модификация дисперсных материалов позволяет в широких пределах изменять электрические свойства формируемых покрытий. Электроизоляционные свойства некоторых покрытий приведены в таблице 1 [9].

Таблица 1. – Электрическая прочность покрытий на основе эпоксидных смол

Материал покрытия	Электрическая прочность, МВ/м
Эпоксидные составы	
П-ЭП-177	25...40
ЭП-49А	50...80
ЭП-49С	30
УП-2155	35...40
УП-280	35

При разделении проводников равномерным промежутком, электрическая прочность E_{np} изоляции, при которой происходит ее пробой, определяется как напряжение, приходящееся на единицу толщины изоляции и рассчитывается по формуле (1)

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d}, \quad (1)$$

где: U_{np} – напряжение пробоя между проводниками, В;
 d – толщина слоя диэлектрика, мкм.

На основании этой формулы, можно получить значение толщины изоляции, при которой наступит ее пробой. Определив это значение, можно выбрать оптимальную толщину электроизоляционных покрытий с запасом электрической прочности. С необоснованным увеличением толщины покрытий, вероятность образования пор и других включений возрастает, и электрическая прочность покрытий снижается [10; 11].

Поскольку электрохирургические инструменты (пинцеты, зажимы и др.) перед применением в операционной должны подвергаться обязательной промывке в проточной воде с последующей дезинфекцией и стерилизацией [12; 13], необходимо было провести испытания инструментов на пробой после воздействия агрессивных сред.

На первом предварительном этапе испытаний, которые проводили без воздействия агрессивных сред, было определено, что толщина покрытия на основе эпоксидных смол, при которой может наступить пробой (при испытательном напряжении 500 В) составляет 20 мкм для минимальной электрической прочности покрытия, равной 25 МВ/м (см. Таблица 1).

С учетом особенностей технологии нанесения покрытия и обеспечения его электрической прочности, были испытаны образцы покрытия толщиной 35 и 50 мкм. Результаты испытаний образцов электрохирургических инструментов на пробой изоляционных покрытий на основе эпоксидных смол приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний образцов электрохирургических инструментов на пробой

№ п/п	Напряжение, В	Толщина покрытия, мкм	Пробой
1	500	35	нет
2			нет
3			нет
4		50	нет
5			нет
6			нет

В таблице 3 приведены результаты испытаний образцов электрохирургических инструментов на пробой изоляционных покрытий после стерилизации методом погружения в агрессивную среду (муравьиная кислота) и выдержки в ней в течение 24 часов.

Таблица 3 – Результаты испытаний образцов электрохирургических инструментов на пробой после стерилизации

№ п/п	Напряжение, В	Толщина покрытия, мкм	Пробой
1	500	35	есть
2			есть
3			есть
4		50	есть
5			есть
6			есть

В результате проведенных испытаний видно, что агрессивная среда отрицательно влияет на электроизоляционные характеристики этих покрытий. Поскольку стерилизационные мероприятия являются обязательным условием применения электрохирургических инструментов в медицинской практике, необходимо было обеспечить электрическую прочность покрытия за счет увеличения толщины изоляции (75 мкм и 190 мкм).

В таблице 4 представлены результаты испытаний изоляционных покрытий толщиной 75 и 190 мкм.

Таблица 4 – Результаты испытаний изоляционных покрытий толщиной 75 и 190 мкм

№ п/п	Напряжение, В	Толщина покрытия, мкм	Пробой
1	500	75	нет
2			нет
3			нет
4		190	нет
5			нет
6			нет

На втором этапе работ экспериментальным путем, при испытательном напряжении 1500 В, была определена оптимальная толщина изоляционного покрытия электрохирургических инструментов, которая составляет 250 мкм. При этом покрытие сохраняет диэлектрические свойства после проведения стерилизации.

В таблице 5 представлены результаты испытаний покрытия при напряжении 1500 В.

Таблица 5 – Результаты испытаний покрытия при напряжении 1500 В

№ п/п	Напряжение, В	Толщина покрытия, мкм	Пробой
1	1500	250	нет
2			нет
3			нет
4			нет
5			нет
6			нет

Испытания на пробой напряжением 1500 В электрохирургические инструменты с покрытием толщиной 250 мкм выдержали в полном объеме, что соответствует требованиям нормативных документов на разработку медицинских изделий.

Заключение. Электробезопасность оперирующего хирурга и пациента лежит в основе разработки электрохирургического инструмента.

На примере биполярного электрохирургического инструмента определены зоны возможного пробоя изоляции, связанные с условиями его эксплуатации.

Проведены предварительные испытания электрохирургических инструментов на пробой (с изоляцией на основе эпоксидных смол). Определены оптимальные толщины изоляционного покрытия электрохирургического инструмента, которые выдерживают испытательные напряжения 500, 1500 В с учетом влияния агрессивных сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сварка, резка и термическая обработка живых тканей / Б.Е. Патон [и др.] // Автоматическая сварка. – 2013. – № 10–11. – С. 135–146.
2. Электрокоагулятор высокочастотный зварювальний ЕКВ3-300. Технічні умови : ТУ У 33.1 – 05416923 – 001: 2011 зміна 1.
3. Рез, И.С. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. / И.С. Рез, Ю.М. Поплавко. – М. : Радио и связь, 1989. – 288 с.
4. Поплавко, Ю.М. Физика диэлектриков / Ю.М. Поплавко. – Киев : Вища школа, 1980. – 400 с.
5. Вершинин, Ю.Н. Электрический пробой твердых диэлектриков. Основы феноменологической теории и ее технические приложения / Ю.Н. Вершинин. – Новосибирск : Наука, Сибир. отд-е., 1968. – 212 с.
6. Воробьев, А.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков / А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев. – М. : Высшая школа, 1966. – 224 с.
7. Воробьев, Г.А. Электрический пробой твердых диэлектриков / Г.А. Воробьев, С.Г. Еханин, Н.С. Несмелов // Физика твердого тела. – 2005. – № 6. – С. 1048–1052.
8. Дубко, А.Г. Особенности применения покрытий при изготовлении электрохирургических инструментов для биполярной высокочастотной сварки / А.Г. Дубко, Н.А. Четвертко, А.В. Лебедев // Вестник Полоцкого государственного университета, Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 88–94.
9. Металлополимерные материалы и изделия / Под ред. В.А. Белого. – М. : Химия, 1979. – 312 с.
10. Лакокрасочные материалы и покрытия / Л.В. Семенова [и др.] // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 315–327.
11. Семенова, Л.В. Влияние шероховатости систем лакокрасочных покрытий на эксплуатационные свойства самолетов / Л.В. Семенова, Н.Д. Родина, Н.И. Нефедов // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 2. – С. 37–40.

12. Изделия медицинские электрические : ГОСТ 30324.2 (МЭК 601-2-2-91). – Ч. 1. Общие требования безопасности. – Введ. 07.01.1993.
13. Стерилизация и дезинфекция изделий медицинского назначения. Методы, средства и режимы : ОСТ 42-21-2-85. – Введ. 01.01.1986.

Поступила 01.07.2019

TO THE QUESTION ABOUT THE ELECTRIC STRENGTH COATING ELECTROSURGICAL INSTRUMENTS

A. DUBKO, N. CHVERTKO, A. LEBEDEV

Use in surgery equipment and tools, developed at the Paton Welding Institute, requires increased attention to the electrical safety of the operating surgeon and the patient. The dielectric coating of the current-carrying parts of the electrosurgical instrument should protect the adjacent tissues from the effects of current, which leads to unwanted heating and increased risk of breakdown. Therefore, the protection of an electrosurgical instrument from insulation breakdown is an urgent task. Zones of possible breakdown of the insulation associated with its operating conditions are determined for a bipolar electrosurgical laparoscopic instrument. Previously conducted experiments confirm that a significant impact on the electrical safety of the use of electrosurgical instruments has the effect of aggressive media (with mandatory disinfection and sterilization before surgery). The optimal thickness of the epoxy-based insulation coating required to ensure its electrical strength was determined experimentally. The tests for the breakdown voltage of 1500 V electrosurgical instruments with a coating thickness of 250 mkm were fully sustained, taking into account the requirements of regulatory documents for the development of medical devices.

Keywords: *electrosurgical instruments, insulation coatings, electrical strength, sterilization, breakdown.*

УДК 536.12:621.891

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕМОНТНЫХ ПОКРЫТИЙ
ВАЛОВ ПОД ПОСАДКУ ПОДШИПНИКОВ**

*канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО,
канд. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ, М.В. КОНОН
(Полоцкий государственный университет)*

Приведены результаты экспериментального исследования тепловых процессов в ремонтных покрытиях. Установлена и объяснена взаимосвязь между тепловыделением, температуропроводностью и структурой покрытия. Показано, что покрытия с преобладанием эвтектики имеют наименьшую температуропроводность по сравнению с доэвтектическими и заэвтектическими покрытиями и соответственно высокие значения тепловыделения. Максимальная температуропроводность характерна для покрытий с доэвтектической концентрацией бора с преобладанием в покрытии бористого феррита.

Ключевые слова: боридная эвтектика, температуропроводность, тепловыделение, средняя объемная температура.

Введение. Серые чугуны обладают широким спектром функциональных возможностей [1]. Гетерогенизация структуры, обеспечивающая высокий комплекс эксплуатационных свойств возможна не только традиционными металлургическими приемами, но и при получении ремонтных покрытий из материалов, отходов производства [2; 3].

Известно, что эвтектические структуры в системе Fe-C-X, обладая максимальной гетерогенностью, являются наиболее температуропроводными [4]. Очевидна необходимость учета теплофизических свойств эвтектических сплавов, предназначенных для работы в качестве теплопроводящих покрытий. Широкие возможности управления структурой покрытий из порошков, позволяют изучить влияние различных легирующих элементов на теплофизические свойства покрытий и «сконструировать» покрытие, обладающее высоким комплексом эксплуатационных свойств.

Цель работы – изучение взаимосвязи между структурой и температуропроводностью гетерогенных эвтектических покрытий из стружечного материала, дополнительно легированного материалами, необходимыми для данных условий эксплуатации.

Материалы и методики исследования. Сырьем для получения диффузионно легированных (ДЛ) порошков служила измельченная стружка серого чугуна. В качестве легирующих элементов были выбраны бор и медь, создающие структуры Шарпи, максимально отвечающие эксплуатационным требованиям [5].

Газотермические покрытия из ДЛ-порошков получали плазменным напылением на стальную подложку на установке УПУ-3Д в струе азотной плазмы [6]. Покрытия изучали традиционными методами: металлографическим (ГОСТ 9.302), дюрOMETрическим (ГОСТ 200017, ГОСТ 299999), микродюрOMETрическим (ГОСТ 9450), фазовым рентгеноструктурным полуколичественным анализом.

Измеряли также объемную температуру в зоне нагрева контактным методом [5]. Тепловые процессы, как известно, отличаются высокой степенью неравновесности. Поэтому для анализа теплового процесса целесообразно знать температуропроводность покрытия. Для этого был разработан метод определения коэффициента температуропроводности, относящийся к классу инверсных задач [7].

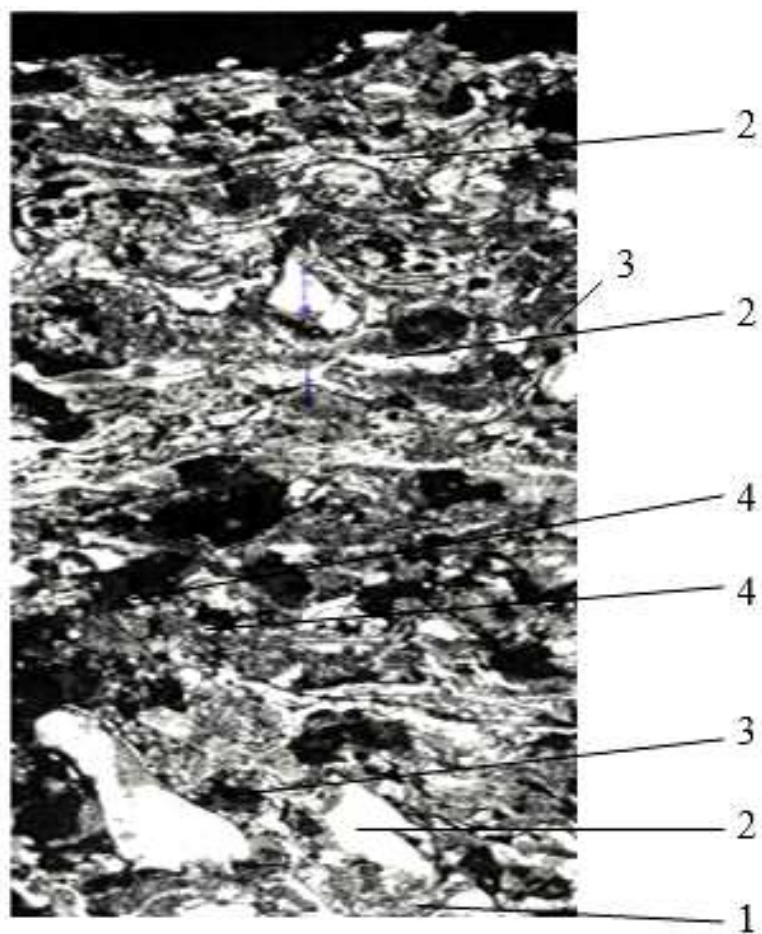
Результаты исследования и их обсуждение. Анализируемые газотермические покрытия имеют характерное гетерогенное строение (рисунок 1).

Структура и свойства исходного материала приводилась в работе [8]. Анализ многообразия полученных покрытий позволил сформулировать закономерности структурообразования материалов [9]. Доказано, что материал, полученный в результате проведенных технологических операций, имеет повышенные физико-механические свойства, по сравнению с известными материалами [10; 11].

Комплекс выполненных исследований позволяет сформулировать некоторые закономерности структурообразования плазменных покрытий из легированной бором и медью чугунной стружки. ДЛ-порошок из чугунной стружки представляет собой частицы, имеющие боридную и бороцементитную оболочку с локальными медными фрагментами на поверхности. В результате плазменного напыления происходят определенные изменения в фазовом составе, приводящие к некоторому повышению физико-химической равновесности материала (таблица 1).

Таблица 1. – Фазовый состав боромедненной чугунной стружки и плазменного покрытия из нее (полуколичественный фазовый рентгеноструктурный анализ)

Фаза	ДЛ-порошок	Плазменное покрытие
	Содержание фазы % объемн.	Содержание фазы, % объемн.
$Fe_{\alpha}(C)$	16	8
Cu	21	18
Графит	2,5	–
Fe_2B	9	13
FeB	16	15
CuO	10	–
Fe_2O_3	12	–
Fe_3C , $Fe_3(BC)$	2,5	23



1 – участки мелкодисперсной бористой эвтектики; 2 – ламели α - фазы с фрагментами перлита; 3 – медистые включения; 4 – боридные, бороцементитные включения

Рисунок 1. – Микроструктура плазменного покрытия из диффузионно-легированной бором и медью стружки серого чугуна ($\times 300$)

Анализ микроструктуры свидетельствует о наличии перлитной матрицы, медной фазы и боридов железа. В покрытии не обнаружено графитных включений. Это, скорее всего, связано, во-первых, с механическим способом приготовления шлифа, при котором возможно механическое выкрашивание мягких составляющих, и во-вторых – с растворением графита расплавленными частицами и возможным его выгоранием.

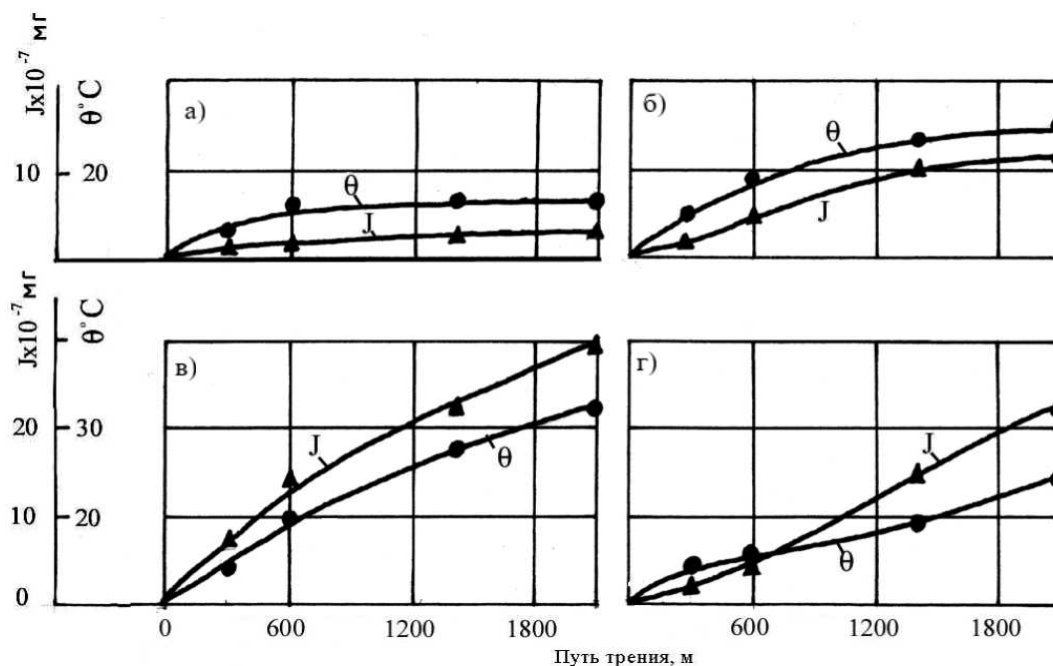
В структуре материала заметно увеличивается процентное содержание легкоплавких эвтектик: с 15 – 18% в исходном составе до 26 – 32% в составах с содержанием бора. Средняя разность между микротвердостями структурных составляющих материала составляет $\Delta H_{\mu} = 500$ ($H_{\mu} = 1300\text{--}1800$). На периферии присутствуют мелкодисперсные локальные частицы меди, переходящие к центру в средние и крупные локальные группировки. Количественный процент эвтектик остался без изменения. Средняя разность между микротвердостями структурных составляющих материала составляет $\Delta H_{\mu} = 300$ ($H_{\mu} = 1500\text{--}1800$).

В результате исследований выявлено увеличение легированности твердого раствора углеродом, бором и медью, уменьшение количества высокобористых фаз, образование локальных участков эвтектики $\text{Fe}_3(\text{BC})$, $\text{Fe}_2\text{B} + \text{Fe}_\alpha(\text{C}, \text{B})$. Следует отметить изолированное расположение медных фрагментов между ламелями покрытия, что играет важную роль в теплофизических свойствах покрытий.

Определяющим фактором структурообразования покрытия наряду с режимами напыления, является химический состав ДЛ-порошка. Пропорционально увеличению содержания меди в ДЛ-порошке происходит увеличение количества «медных» участков в покрытии. Для содержания меди менее 15% масс. характерно наличие мелкодисперсных включений по всему объему покрытия. При большем содержании меди происходит дифференциация медистой фазы по объему покрытия и формирование отдельных крупных включений (80...120 мкм). Бор, являясь химически активным элементом, оказывает более существенное влияние на структурообразование покрытий. Значительную часть объема покрытия занимает мелкодисперсная боридная эвтектика. Следует отметить, что эвтектическая концентрация смещена в сторону меньших содержаний бора, что обусловлено повышенной скоростью охлаждения расплава, неравновесной кристаллизацией и получением квазиэвтектики. Поэтому первичные высокотвердые боридные и бороцементитные фазы в покрытии присутствуют уже при доэвтектической концентрации бора в покрытии.

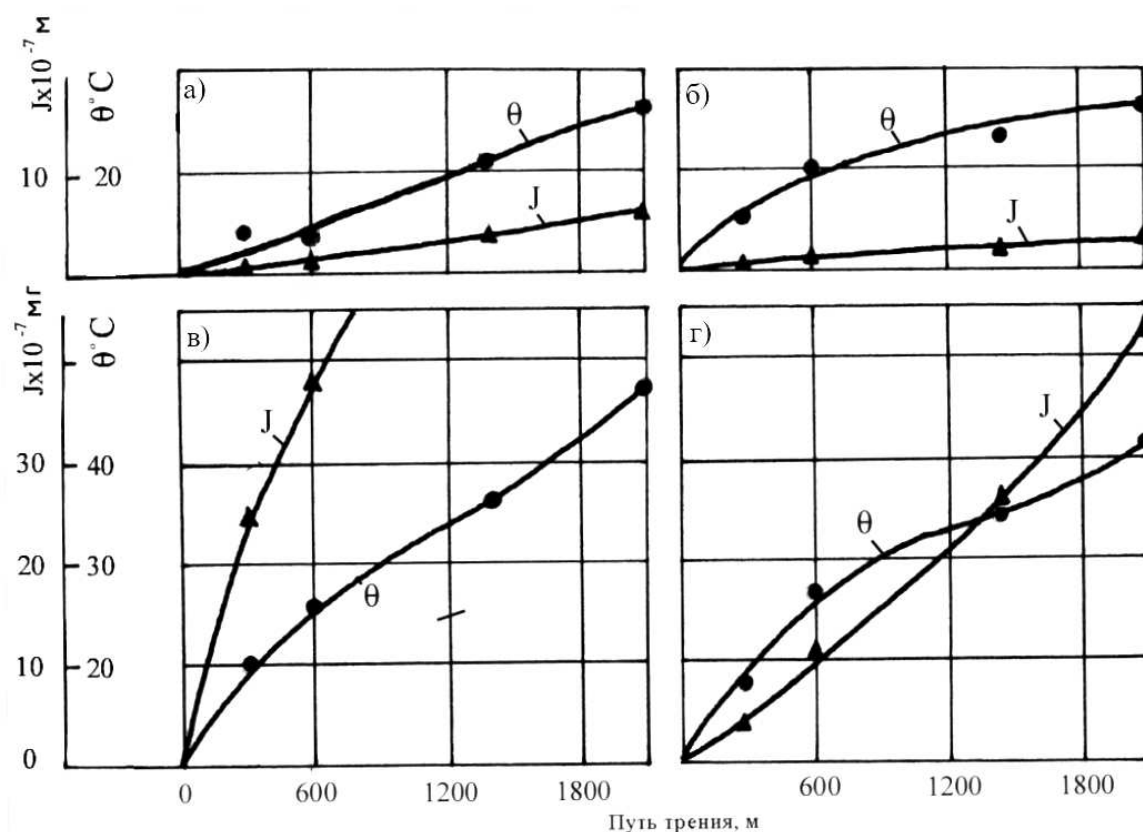
Следующим этапом исследований стало изучение теплового режима работы разработанных покрытий. Установлено влияние структуры материала на установление теплового режима (рисунки 2, 3). При малых, доэвтектических концентрациях бора, нагрев материала невелик. Важна также тенденция к стабилизации этих параметров.

Неожиданные результаты получены при анализе эвтектических покрытий, традиционно считающихся наиболее температуропроводными. Прогрессирующий характер повышения температуры свидетельствуют о крайне нестабильных условиях теплопередачи. Наиболее ярко обнаруженные закономерности проявляются в условиях переменного нагрева, что подтверждает важность анализа теплового режима трения (рис. 3).



Содержание бора, % по массе: а) 0,5–1,5; б) 1,5–2,0; в) 2,0–4,0; г) 4,0–6,0.

Рисунок 2. – Изменение температуры и износа вкладыша с газотермическим покрытием из боромеденной чугуновой стружки в процессе испытаний при постоянной нагрузке



Содержание бора, % по массе: а) 0,5–1,5; б) 1,5–2,0; в) 2,0–4,0; г) 4,0–6,0.

Рисунок 3. – Изменение температуры и износа вкладыша с газотермическим покрытием из боромеденной чугуновой стружки в процессе испытаний при переменной нагрузке

Объяснение полученных результатов потребовало изучения теплопроводности покрытий. Как известно, в общем случае, перенос тепла в многофазном, пористом дисперсном твердом теле, каким является анализируемое покрытие, осуществляется посредством: теплопроводности самих частиц материала, теплопроводности оксидных пленок, молекулярной теплопроводности газа, заполняющего поры, контактной теплопроводности межчастичных контактов, а также конвекцией газа в порах и излучением от частицы к частице [12]. Позднее было установлено, что преобладающая часть тепла в газотермическом слоистом покрытии передается в местах контакта между ламелями [13; 14].

В анализируемом покрытии контактные области между ламелями являются преимущественно бористым сплавом различной степени эвтектичности (см. Рисунок 1). Эвтектика мелкодисперсная, в ряде случаев зернистая. Именно через эти области проходит основной поток тепла. Полученные результаты определения коэффициента теплопроводности боросодержащих сплавов свидетельствуют об определяющем влиянии бора (таблица 2). Резкое снижение теплопроводности сплава при легировании бором обусловлено гетерогенизацией последнего и является известным фактом [14]. А вот обнаруженная экстремальность влияния бора на теплопроводность сплава требует объяснения. Установлено, что минимальной теплопроводностью обладают сплавы эвтектической концентрации, для которых характерна наибольшая степень гетерогенности вследствие преобладания мелкодисперсной механической смеси бористого феррита и бороцементита. Дальнейшее увеличение содержания бора формирует заэвтектическую структуру с преобладанием относительно крупных первичных боридов. Бориды железа Fe_2B обладают низкой теплопроводностью ($\lambda^{20^\circ\text{C}} = 0,3 \text{ Вт/см}\cdot\text{К}$), однако количество мелкодисперсной эвтектики и, следовательно, степень гетерогенности покрытия в этом случае снижается, поэтому происходит некоторое повышение теплопроводности. Наибольшая теплопроводность в анализируемой системе характерна для доэвтектических концентраций бора. Избыточной фазой в этом случае является бористый феррит, обладающий существенно большей теплопроводностью, а содержание эвтектики в покрытии невелико.

Таблица 2. – Влияние содержания бора на температуропроводность покрытий системы Fe – C – B

Содержание бора, % по массе	Коэффициент температуропроводности $\alpha \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ для интервала температур $^{\circ}\text{C}$					
	50–100	100–150	150–200	200–250	250–300	300–350
0	22,900	22,317	21,928	21,442	19,734	18,552
2,5–3,1	8,570	8,563	8,210	7,725	7,403	6,832
3,2–4,1	3,450	3,256	3,181	3,189	3,145	2,966
4,8–5,2	7,322	6,936	6,552	6,101	5,793	5,583

Установленные факторы влияния бора на температуропроводность покрытий позволяют предложить характер взаимосвязи теплофизических свойств газотермических бористых покрытий и его структуры. Тепловой режим покрытия, как известно, обусловлен протеканием конкурирующих процессов тепловыделения и теплопередачи. При относительно постоянных показателях тепловыделения решающее значение будет иметь теплопередача.

Покрытия, имеющие заэвтектическую концентрацию бора, обладают минимальным тепловыделением вследствие наличия в их структуре первичных боридных и бороцементитных фаз. Для этих покрытий характерна линейная зависимость роста температуры [15]. Покрытия с эвтектической концентрацией бора, как было показано выше, обладают наименьшей температуропроводностью, чем обусловлен параболический рост температуры покрытия. Покрытие с доэвтектической концентрацией бора обладает максимальной температуропроводностью в анализируемой системе [16].

Заключение. На температуропроводность газотермических покрытий из боромедненной стружки серого чугуна оказывает существенное влияние их структура. Наименьшая температуропроводность и, соответственно, неудовлетворительные эксплуатационные свойства характерны для покрытий с эвтектической концентрацией бора. Это обусловлено крайне низкой температуропроводностью дисперсной эвтектической механической смеси бористого феррита и бороцементита. Поэтому количество боридной эвтектики в указанных покрытиях следует ограничивать. Увеличение температуропроводности покрытий с доэвтектической концентрацией бора, обусловленное уменьшением доли эвтектики за счет увеличения количества бористого феррита, обеспечивает повышение эксплуатационных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камынин, В.В. Разработка и использование антифрикционных чугунов для тяжело нагруженных узлов трения : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / В.В. Камынин. – Курск, 2000. – 18 с.
2. Восстановление деталей машин : справ. / Ф.И. Пантелеенко [и др.] ; под ред. В.П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003 – 672 с.
3. Ragutkin, A.V. Some aspects of antifriction coatings application efficiency by means of finishing nonabrasive antifriction treatment / A.V. Ragutkin, M.I. Sidorov, M.E. Stavrovskij // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 236. – P. 239–244.
4. Исследование графитных включений в микроструктурах чугуна тормозных локомотивных колодок / А.А. Климов [и др.] // Вестник ПНИПУ. – 2017. – Т. 19(№ 3). – С. 19–32.
5. Штемпель, О.П. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / О.П. Штемпель ; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк : ПГУ, 2003. – 24 с.
6. Авсиевич, А.М. Технология формирования износостойких газотермических покрытий из диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков на железной основе : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.М. Авсиевич ; Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2003. – 24 с.
7. Лысенко, Ю.В. Экспериментальные исследования температуры в теплонагруженных узлах трения / Ю.В. Лысенко, В.А. Балакин // Трение и износ. – 2003. – Т. 24(№ 2). – С. 179–185.
8. Сороговец, В.И. Получение износостойких покрытий плазменной наплавкой диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / В.И. Сороговец. – Новополоцк, 2001. – 24 с.
9. Константинов, В.М. Газотермические покрытия из диффузионно-легированной стружки как альтернатива антифрикционным бронзам / В.М. Константинов, В.А. Фруцкий // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 6. – С. 36–39.
10. Константинов, В.М. Взаимосвязь структуры и свойств антифрикционных газотермических покрытий из боромедненной чугунной стружки / В.М. Константинов, В.А. Фруцкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2003. – № 3. – С. 7–11.

11. Пилипенко, С.В. Альтернативные материалы для ремонта роторной группы насос-моторов / С.В. Пилипенко, В.А. Фруцкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 3. – С. 102–106.
12. Ярошевич, В.К. Антифрикционные покрытия из металлических порошков / В.К. Ярошевич, М.А. Белоцерковский. – Минск : Наука и техника, 1981. – 174 с.
13. Ворошнин, Л.Г. Влияние структуры защитных покрытий на их износостойкость / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, С.Н. Любецкий // Трение и износ. – 1991. – Т. 12(№ 2). – С. 310–314.
14. Смирнов, Е.В. Виды переноса тепловой энергии в металлически плазменно-напыленных покрытиях и некоторая качественная оценка их теплопроводности / Е.В. Смирнов, В.Е. Ионин // Инженерно-физический журн. – 1970. – Т. 18(№ 4). – С. 17–20.
15. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением: Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М. : Металлургия, 1992. – 432 с.
16. Туник, А.Ю. Структурные особенности антифрикционных покрытий с добавками твердых смазок, полученных различными методами напыления / А.Ю. Туник // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2012. – № 25. – С. 163–170.

Поступила 18.06.2019

THERMAL PROPERTIES OF GAS-THERMAL REPAIR COATINGS SHAFTS TO FIT BEARINGS

S. PILIPENKO, V. FRUCCI, M. KONON

The results of an experimental study of thermal processes in repair coatings are presented. The relationship between heat release, thermal diffusivity and coating structure has been established and explained. It was shown that coatings with a predominance of eutectic have the lowest thermal diffusivity compared to pre-eutectic and hypereutectic coatings and, accordingly, high heat release values. Maximum thermal diffusivity is characteristic for coatings with a hypereutectic concentration of boron with a predominance of boron ferrite in the coating.

Keywords: boride eutectic, thermal conductivity, heat generation, average volume temperature.

УДК 669.7: 624.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО,
канд. техн. наук, доц. О.В. ШУМОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

В работе было выполнено компьютерное моделирование процессов изготовления сварных конструкций из тонколистовых заготовок. Результаты моделирования были использованы для уменьшения остаточных напряжений и деформаций сварных соединений. Было проведено моделирование процесса получения дуговой сваркой стыковых соединений из алюминиевого сплава. В процессе исследований были определены напряжения и деформации при использовании различных методов дуговой сварки – традиционной дуговой сварки и дуговой сварки с принудительным охлаждением высокотемпературной области сварного соединения. Значения температур в свариваемых деталях были получены в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности с движущимся источником тепла. Величины напряжений и деформаций соединяемых деталей были определены в результате решения уравнений термоупругости. Установлено, что продольные деформации в детали при сварке с принудительным охлаждением в 1,2 раза меньше, чем при традиционной дуговой сварке.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварное соединение, остаточные деформации, остаточные напряжения, уменьшение деформаций.

Введение. Алюминиевые сплавы являются одними из наиболее распространенных конструкционных сплавов, которые применяются в машиностроении, энергетике, химической промышленности и ряде других отраслей производства, благодаря коррозионной стойкости, высокой удельной прочности, пластичности и т.д. [1]. Широкое использование алюминиевых сплавов в различных областях обуславливает актуальность совершенствования технологий изготовления деталей и конструкций из них.

При изготовлении значительного количества деталей и узлов оборудования из алюминиевых сплавов (емкостей, трубопроводов и т.п.) одним из условий их надежной работы является обеспечение герметичности, исключение утечки активных веществ за счет плотного прилегания контактирующих поверхностей. Выполнить данное условие возможно при обеспечении высокого качества изготовления сварных конструкций и соблюдения требуемых размеров и формы, в том числе за счет повышения точности изготовления рабочих поверхностей.

Изготовление сварных конструкций из тонколистовых заготовок при помощи дуговой сварки сопровождается образованием остаточных напряжений и деформаций, которые могут привести к изменению размеров и формы, потере устойчивости, снижению усталостной прочности и ухудшению других эксплуатационных свойств, сокращению срока службы изделия [2]. Существуют различные методы уменьшения остаточных напряжений и деформаций при изготовлении конструкций с использованием дуговой сварки, например, термическая обработка сварной конструкции (предварительная или заключительная), изменение напряженно-деформированного состояния элементов конструкции в результате поверхностной механической обработки, выполнение сварных швов в рациональной последовательности и т.д. [3; 4].

Эффективная реализация некоторых методов уменьшения остаточных напряжений и деформаций в конструкции, например, метода термического растяжения [5], возможна в результате применения такого современного инструмента, как моделирование процессов сварки. Моделирование сварки позволяет определить оптимальные режимы технологического процесса, при которых обеспечиваются минимальные значения сварочных напряжений и деформаций.

В работе были поставлены следующие задачи:

- а) определить остаточные напряжения и деформации сварных соединений посредством моделирования процессов, протекающих при различных способах сварки;
- б) на основании данных, полученных при моделировании сварочных процессов, выполнить оценку эффективности мероприятий по уменьшению остаточных напряжений и деформаций сварных соединений.

Основная часть. В работе было выполнено моделирование процессов, протекающих при изготовлении с помощью дуговой сварки стыковых соединений листовых заготовок алюминиевого сплава марки АМг. Для исследований были использованы образцы сварного соединения, изготовленные из пластин размером 150×75×3 мм. Сварное соединение было выполнено путем сварки встык за один проход в среде аргона. Сварка была проведена при жестком закреплении образцов в нижнем положении на подкладке из нержавеющей стали, с использованием проволоки диаметром 1 мм. Режимы сварки следующие: ток – 100 А; напряжение на дуге – 18 В; скорость сварки – 2 мм/с.

В процессе были использованы технологические методы уменьшения возникающих в металле образцов напряжений и деформаций. В частности, было предусмотрено применение твердого порошкового охладителя с подачей его в околошовную область сварного соединения в процессе выполнения сварки.

Для определения параметров технологического процесса изготовления сварной конструкции были проведены следующие операции: 1) моделирование процесса распространения тепла от движущейся сварочной дуги к собираемой конструкции и в окружающее пространство; 2) определение закономерностей изменения температурных значений в узловых точках пространственной модели; 3) определение значений остаточных напряжений в металле соединяемых образцов, а также определение значений остаточных деформаций элементов сварного соединения.

1. Для моделирования процессов распространения тепла от движущейся сварочной дуги источник тепла был представлен в форме двойного эллипсоида, в котором плотность теплового потока была определена в соответствии с законом Гаусса [6].

Величина теплового потока от сварочной дуги была определена по следующей формуле:

$$Q = \eta U \cdot I,$$

где: η – к.п.д. теплового воздействия сварочной дуги;

U – напряжение на дуге, В;

I – ток дуги, А.

2. Закономерности изменения температуры нагрева металла были определены в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных:

$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial x) / \partial x + \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial y) / \partial y + \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial z) / \partial z + Q,$$

где: ρ – плотность материала, кг/м³;

C_p – удельная теплоемкость, Дж/кг·С;

T – температура, °С;

λ – теплопроводность, Вт/м·С;

Q – входящий тепловой поток, Вт/м³.

При определении начальных и граничных условий нагрев соединяемых деталей от действия сварочной дуги рассматривался в виде распределения внешнего теплового потока, а потери тепла за счет конвективного теплообмена и радиационного излучения – в виде границ, поглощающих тепло.

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности был использован метод конечных разностей [7]. При аппроксимации уравнения применялась координатная сетка со следующими координатами (рисунок 1):

$$x_i = (i - 1) \cdot h_x; y_j = (j - 1) \cdot h_y; z_k = (k - 1) \cdot h_z; t_n = n \cdot \tau,$$

где: h_x, h_y, h_z – шаги сетки по координатам x, y, z соответственно;

τ – шаг по времени;

$i = 1, 2, \dots, N_x; j = 1, 2, \dots, N_y;$

$k = 1, 2, \dots, N_z; n = 0, 1, \dots, K.$

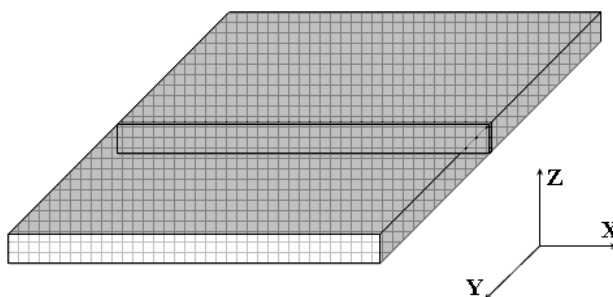


Рисунок 1. – Схема разбиения пространства координатной сеткой

Представление дифференциального уравнения в дискретном виде было выполнено с использованием локально одномерной схемы, которая является абсолютно устойчивой [8]. При этом трехмерное уравнение было разбито на одномерные уравнения в направлении каждой из координатных осей, в результате последовательного решения которых были определены значения температур для конкретного временного шага.

В соответствии с неявной четырехточечной разностной схемой дифференциальное уравнение было выражено системой алгебраических уравнений следующего вида:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1/2} - B_i \cdot T_i^{n+1/2} + C_i \cdot T_{i-1}^{n+1/2} = D_i,$$

где: $A_i = C_i = \lambda / h^2;$

$B_i = 2 \cdot \lambda / h^2 + \kappa / h + \rho \cdot c / \tau;$

$D_i = -\rho \cdot c \cdot T_i^n / \tau - \kappa \cdot T_{oc} / h - \epsilon \cdot \sigma \cdot ((T_i^n)^4 - T_c^4) / h + Q, n+1/2 = 0,5 (n + n + 1).$

Система уравнений была сведена к стандартному виду и решена методом прогонки [9]. Для решения системы уравнений, нелинейных относительно искомой величины, был использован метод простой итерации. Был организован итерационный процесс по решению системы уравнений на каждом временном шаге. Количество итераций было найдено из условия достижения установленной погрешности определения температуры на текущем временном шаге.

3. Для определения остаточных напряжений и деформаций образцов в процессе сварки были решены уравнения термоупругости, что позволило найти значения линейных деформаций $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$, угловых деформаций $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$, нормальных и касательных напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ [10]. При расчетах остаточных напряжений и деформаций был использован алгоритм вычислений, аналогичный алгоритму, который был применен при определении температуры нагрева металла заготовок.

Линейные и угловые деформации образцов были найдены по формулам:

$$\varepsilon_x = \partial U / \partial x; \quad \varepsilon_y = \partial V / \partial y; \quad \varepsilon_z = \partial W / \partial z; \quad \gamma_{xy} = \partial U / \partial y + \partial V / \partial x; \quad \gamma_{yz} = \partial V / \partial z + \partial W / \partial y; \quad \gamma_{zx} = \partial W / \partial x + \partial U / \partial z,$$

где U, V, W – перемещения точек образца в направлении координатных осей x, y, z соответственно, м.

Нормальные напряжения в образцах были найдены по формулам:

$$\sigma_x = C11 \cdot \varepsilon_x + C12 \cdot \varepsilon_y + C13 \cdot \varepsilon_z - b \cdot T_p;$$

$$\sigma_y = C12 \cdot \varepsilon_x + C22 \cdot \varepsilon_y + C23 \cdot \varepsilon_z - b \cdot T_p;$$

$$\sigma_z = C13 \cdot \varepsilon_x + C23 \cdot \varepsilon_y + C33 \cdot \varepsilon_z - b \cdot T_p,$$

при этом

$$C11 = C22 = C33 = G \cdot (1 - \nu); \quad G = E \cdot ((1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu))^{-1}; \\ C12 = C13 = C23 = G \cdot \nu, \quad C44 = G \cdot (1 - \nu) \cdot 0,5, \quad b = G \cdot \alpha \cdot (1 + \nu),$$

где: T_p – температура деталей, °C;

E – модуль Юнга, МПа;

ν – коэффициент Пуассона;

α – коэффициент термического расширения материала образца, °C⁻¹.

Данные, полученные при моделировании остаточных напряжений сварных соединений, выполненных методом обычной дуговой сварки и сварки с охлаждением, приведены на рисунке 2.

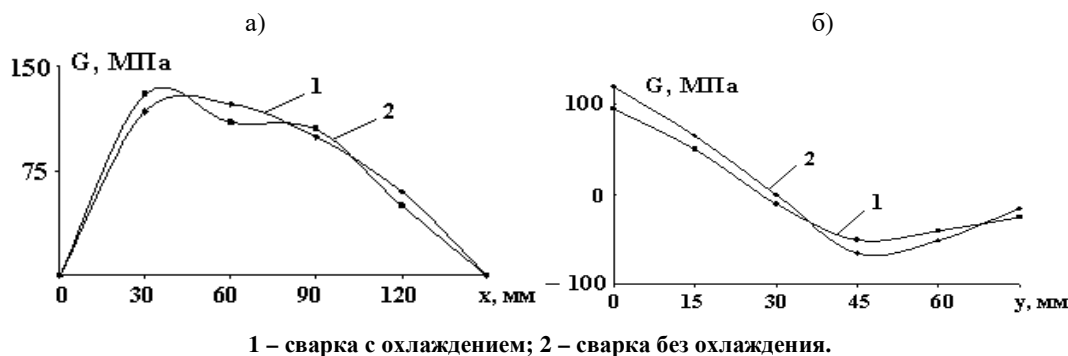


Рисунок 2. – Продольные (а) и поперечные (б) остаточные напряжения (G) в сварных соединениях

На основании данных, приведенных на рисунке 2, можно сделать следующие выводы: 1) при использовании охлаждения в процессе дуговой сварки стыкового соединения ширина зоны поперечных растягивающих остаточных напряжений в среднем в 1,18 раза меньше чем при обычной дуговой сварке; 2) максимальные значения продольных остаточных напряжений при обычной дуговой сварке на 10% превышают аналогичные значения при дуговой сварке с охлаждением; 3) при дуговой сварке с использованием твердого диоксида углерода остаточные поперечные напряжения в сварном соединении собираемой конструкции в 1,24 раза ниже, чем при сварке без охлаждения.

Результаты, полученные при моделировании остаточных деформаций сварных соединений, выполненных при помощи обычной дуговой сварки и сварки с охлаждением, приведены в таблице.

Таблица. – Величина остаточных деформаций сварных соединений

Вид сварки	Величина деформации (по координатам x), мм					
	0 мм	30 мм	60 мм	90 мм	120 мм	150 мм
С охлаждением	0	1,01	2,02	3,05	4,09	5,10
Без охлаждения	0	1,20	2,41	3,65	4,90	6,10

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наименьшие остаточные деформации – 5,1 мкм – возникают при изготовлении детали посредством дуговой сварки с охлаждением. Остаточные деформации при изготовлении детали при помощи традиционной дуговой сварки составляют 6,1 мкм или в 1,2 раза превышают данный показатель при сварке с охлаждением.

Таким образом, результаты исследований показывают, что использование принудительного охлаждения в процессе дуговой сварки при изготовлении конструкции из тонколистовых заготовок алюминиевого сплава позволяет существенно уменьшить остаточные напряжения и деформации по сравнению со сваркой без охлаждения. Очевидно, это достигается за счет уменьшения тепловложений в элементы собираемой конструкции, ограничения размеров области высокотемпературного нагрева металла, сокращения времени пребывания металла заготовок при высоких температурах.

Закключение. Было проведено исследование процесса дуговой сварки в среде аргона при изготовлении стыкового сварного соединения заготовок алюминиевых сплавов. При этом, чтобы установить оптимальные режимы дуговой сварки, было проведено моделирование процессов (распределения тепла, изменения значений температур, тепловой деформации заготовок), которые протекают при изготовлении сварного соединения. Также была дана оценка эффективности метода уменьшения остаточных напряжений и деформаций при проведении дуговой сварки в среде защитных газов. Для этого были оценены два способа дугой сварки конструкции из тонколистовых заготовок в среде аргона – традиционный способ и способ с охлаждением высокотемпературной области сварного шва при помощи твердого охладителя.

Было установлено, что дуговая сварка в среде аргона с охлаждением стыковых соединений заготовок алюминиевых сплавов обеспечивает уменьшение остаточных поперечных напряжений в 1,18 раза и продольных остаточных напряжений – в 1,12 раза по сравнению с традиционной дуговой сваркой в среде аргона. Остаточные деформации сварного соединения при дуговой сварке с охлаждением в 1,2 раза меньше, чем при традиционной дуговой сварке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер, И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы / И.Н. Фридляндер. – М. : Металлургия, 1978. – 208 с.
2. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
3. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. – М. : Машиностроение, 1996. – 576 с.
4. Сагалевиц, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевиц. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
5. Цяо, Г. Бездеформационная сварка с использованием эффектов термического растяжения для соединения материалов малой толщины / Г. Цяо // Автоматическая сварка. – 2006. – № 12. – С. 3–13.
6. Goldak, J.A. Computational Welding Mechanics / J.A. Goldak, M. Akhlaghi. – Springer, 2005. – 321 p.
7. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М. : Высшая школа, 2002. – 840 с.
8. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 656 с.
9. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
10. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Д. Гудьер. – М. : Наука, 1979. – 560 с.

Поступила 14.06.2019

SIMULATING DEFORMATION OF WELDING JOINTS

F. PANTELEENKO, A. SHUMAV

The arc welding simulation of welding constructions of the thin sheet pieces has been produced in this work. The results of simulation had been used to decrease the residual stresses and deformation of welding joints. It was accomplished the arc welding simulation of the beam welds of aluminum alloy. In the course of research it had been estimated the stresses and deformation of various methods of arc welding, for example, traditional arc welding and force-cooling welding. The values of temperature of welded pieces had been evaluated by solution of partial differential equation of heat transfer with the moving heat source. The values of stresses and deformation of welded pieces had been evaluated by solution of the thermal elasticity equations. It was found that the longitudinal deformation of piece welded by force-cooling welding is smaller by a factor of 1.2 than it welded by traditional arc welding.

Keywords: arc welding, welding joint, residual deformation, residual stresses, decreasing deformation.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 628.336.515

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ РАБОТЫ РЕАКТОРОВ АНАЭРОБНОГО СБРАЖИВАНИЯ ОРГАНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ БИОГАЗА

Л.П. ШЕВЧЕНКО*(Полоцкий государственный университет)*

Изучены способы расчета режима работы реакторов анаэробного сбраживания органосодержащих отходов на примере отходов нефтепереработки с получением биогаза. Также рассмотрено математическое моделирование и процесс оптимизации сбраживания разных отходов нефтепереработки на основе расчета времени пребывания, обеспечивающего требуемую величину конверсии органического вещества отходов.

Ключевые слова: *органосодержащие отходы, биогаз, метаногенез, математическое моделирование, время пребывания в реакторе.*

Введение. Получение биогаза из органосодержащих отходов приводит к совместному решению двух современных проблем: поиск энергоресурсов и защита окружающей среды. С одной стороны, решается проблема утилизации отходов нефтехимической промышленности, с другой – получение альтернативного источника энергии. Для Беларуси данный вопрос весьма актуален, так как наша страна не имеет достаточного количества энергоресурсов, а химическое производство занимает немалую долю промышленности республики, следовательно, и отходов от данного вида деятельности накапливается немало. До сегодняшнего дня в нашей стране не существует опробованной эффективной технологии утилизации жидких органосодержащих отходов нефтеперерабатывающих производств. Существующие технологии отличаются низкой эффективностью и высокой энергозатратностью. Большая часть отходов нефтепереработки вообще нигде не используется и отводится в шламонакопители или подвергается естественному разложению на полях фильтрации, что неприемлемо из-за отчуждения больших территорий лугов и полей. Другим аспектом проблемы является потребность в изыскании эффективных возможностей использования биомассы для получения альтернативного источника энергии, что очень важно для нашей страны. Нами рассматривается возможность использования отходов нефтеперерабатывающего завода как сырья для микробиологической анаэробной конверсии ее в биогаз.

Процесс получения биогаза известен очень давно. Современные биогазовые технологии широко используются как в развитых, так и развивающихся странах. Процесс образования биогаза осуществляется в специальных реакторах-метантенках. К недостаткам оборудования этого типа можно отнести: низкую производительность, металлоемкость, увеличенное время протекания процесса из-за отсутствия перемешивания, сложность подачи исходного материала и невозможность повторного использования активного ила [1]. Общий принцип технологии заключается в следующем. Органосодержащие отходы (биомасса) загружаются в реактор, где происходит сбраживание и выделение метана, что является целевым продуктом в данном процессе.

Цель данной работы – выявление оптимального режима работы реактора, а также определение вида отходов, дающих максимальный выход биогаза.

Основная часть. Как известно, реакторы могут работать в трех основных гидродинамических режимах: реактор идеального вытеснения (РИВ), реактор идеального смешения (РИС) и каскад реакторов [2].

Реактор идеального вытеснения характеризуется переменной концентрацией реагирующих веществ по длине аппарата, наибольшей разницей концентраций на входе и выходе из реактора и, следовательно, наибольшей средней движущей силой процесса. Изменение концентрации в реакционном объеме носит плавный характер, так как последующие реакционные объемы реагирующих веществ не смешиваются с предыдущим, а полностью вытесняются. Практически к режиму идеального вытеснения можно приблизиться в реакторе с малым диаметром и большой длиной при относительно высоких скоростях движения реагирующих веществ.

Реактор полного смешения обычно снабжен каким-либо перемешивающим устройством и характеризуется постоянством концентрации реагирующих веществ во всем объеме реактора в данный момент времени, вследствие практически мгновенного смешения реагирующих веществ в реакционном объеме (рисунок 1).

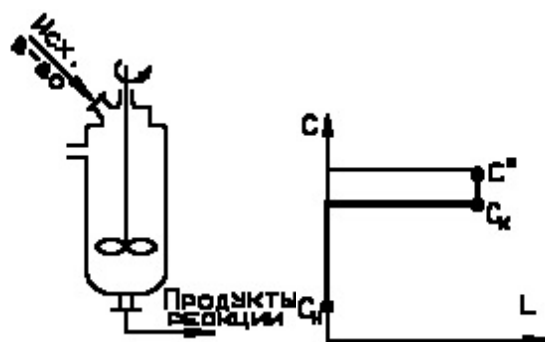


Рисунок 1. - Изменение концентрации реагирующих веществ в реакционном объеме реактор идеального смешения

Поэтому изменение концентрации реагирующих веществ на входе в реактор носит скачкообразный характер. Средняя движущая сила процесса в таком аппарате будет меньше, чем в аппарате полного вытеснения. В некоторых случаях процесс химического превращения вещества проводится не в одном аппарате смешения, а в нескольких таких аппаратах, соединенных последовательно. Такая система, состоящая в некоторых случаях из 20 и более аппаратов, получила название каскада реакторов. В каскаде реакторов изменение концентрации реагирующих веществ носит ступенчатый характер, так как продукт реакции предыдущего аппарата является исходным реагирующим веществом в последующем аппарате (рисунок 2).

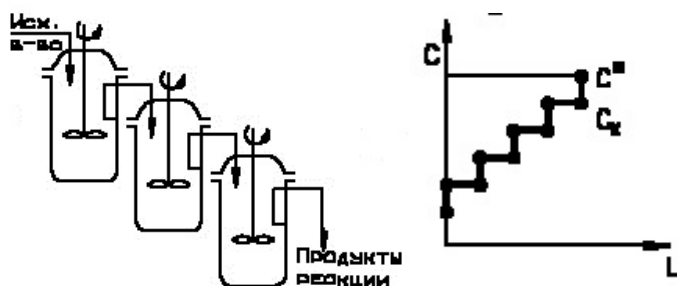


Рисунок 2. – Изменение концентрации реагирующих веществ в реакционном объеме каскада реакторов

Гидродинамический режим работы каскада реакторов является промежуточным и зависит от числа аппаратов; с увеличением числа реакторов в каскаде он приближается к режиму вытеснения, а при уменьшении – к режиму смешения. В каскаде увеличивается время пребывания реагирующих веществ по сравнению с одним реактором смешения, а также возрастает выход продукта реакции по сравнению с реактором вытеснения.

Таким образом, одним из ключевых факторов любого микробиологического процесса является время пребывания микроорганизмов в среде. Для обеспечения эффективного разложения сложных органических веществ до метана и CO_2 необходимо, чтобы микроорганизмы находились в достаточном количестве, а время их пребывания в среде было достаточным для обеспечения метаболизма субстрата и при этом не происходило вымывание бактерий. Следовательно, по этому параметру нужно рассчитывать объем реактора. Именно от времени пребывания зависит степень разложения органического вещества и, соответственно, выход биогаза. Тем не менее, путь регулирования выхода биогаза, заключающийся в изменении объема метантенков, в настоящее время вряд ли осуществим, так как большинство конструкций метантенков имеет неизменную геометрию и объем, а держать резервные метантенки экономически нецелесообразно. При проектировании новых сооружений заведомо определяют максимальную нагрузку метантенка по субстрату, что означает сокращение затрат на строительство метантенков меньшего объема. При этом уменьшаются и теплопотери через ограждающие конструкции метантенков.

Для различных конструкций реактора время пребывания сырья в реакторе будет определяться следующим образом:

$$t = \frac{V}{G_V} = C_{A,0} \int_0^{x_A} \frac{dx_A}{V_p},$$

где: $C_{A,0}$ – начальная концентрация вещества A в реакционной смеси;
 x_A – конверсия (степень превращения вещества A);

V_p – скорость протекания процесса;

t – время пребывания в реакторе;

Построив график зависимости величины обратной скорости от концентрации можно видеть, что время пребывания в РИВ будет меньше, чем в РИС [2].

Изучение кинетических закономерностей анаэробной переработки необходимо для определения оптимального значения начальной концентрации органического вещества в составе отходов, расчета времени пребывания и габаритов аппарата (метантенка), а также для оценки диффузионных ограничений и требований к перемешиванию. Поиск возможных способов интенсификации процесса анаэробной переработки является важной практической задачей.

Скорость протекания процесса метаногенеза определяется уравнением Моно – Герберта [4]:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{K_1 \cdot S}{1 + K_2 \cdot S} + K_3,$$

где: S – содержание органического вещества в отходах, г/г;

t – время, сутки;

K_1 – константа скорости превращения органического вещества, г/г сут;

K_2 – константа ингибирования процесса органическим веществом отходов, г/г;

K_3 – константа скорости торможения процесса за счет отмирания бактерий, г/г сут.

При этом имелась в виду возможность описания метаногенеза различных органосодержащих отходов единым уравнением с различными коэффициентами в каждом конкретном случае.

Проведенные исследования показали [3], что для описания метаногенеза органосодержащих отходов можно использовать модификацию уравнения Герберта с кинетическими коэффициентами, учитывающими индивидуальные характеристики отходов (S_0 , S_0/C_0 , O/H). Экспериментальные данные и результаты моделирования позволили получить формулу для расчета времени осуществления процесса до заданной величины конечной концентрации органического вещества в составе отходов:

$$t = \int_S^{S_0} \frac{S_0^{1.66} - 0.0646 \cdot S}{K_3 \cdot S_0^{1.66} + (0.033 \cdot S_0^{1.66} - K_3 \cdot 0.0646) \cdot S} dS.$$

Полученные результаты были использованы для расчета различных режимов работы реакторов. В результате расчетов были получены следующие зависимости (рисунок 3).

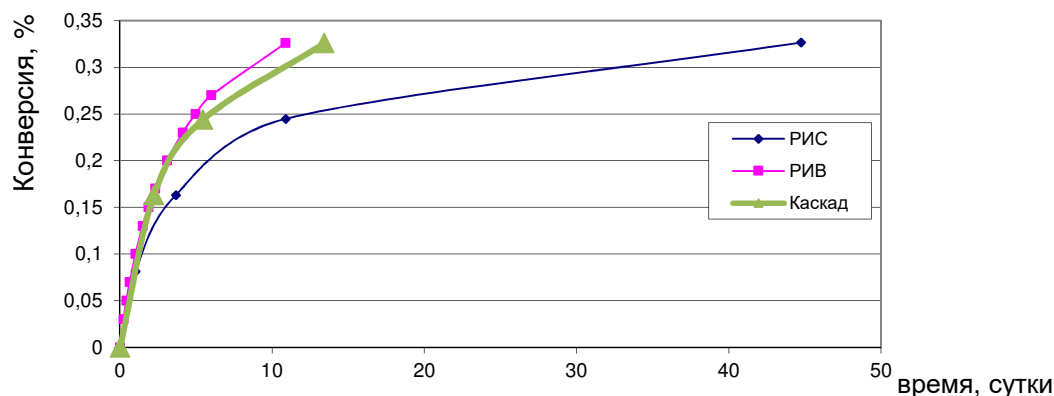


Рисунок 3. – Зависимость конверсии от времени пребывания

На приведенном графике (см. Рисунок 3) показана зависимость конверсии от времени пребывания в реакторах различного типа. Для конверсии ниже 10% разница в конструкциях незначительна, но при больших значениях она становится очевидна. При конверсии свыше 30% резко увеличивается время сбраживания только в реакторах идеального смешения, при этом прирост конверсии является незначительным. Поэтому в работе более детально рассматривается конверсия 20 – 30% (рисунок 4). Кроме того, по данным ряда исследователей, изменение количества воды в субстратах может непосредственно влиять на показатели анаэробного сбраживания. При чрезмерно низкой (менее 91%) и повышенной (более 97%) влажности в традиционном процессе сбраживания жидких осадков происходят нарушения, ведущие к снижению выхода биогаза. При применении традиционных конструкций метантенков низкая влажность осадков может привести к полному нарушению процесса сбраживания из-за ухудшения их текучести. По-

этому часть сброженного осадка возвращается обратно в процесс, что позволяет повысить эффективность утилизации жидких отходов, улучшить отделение биогаза и предотвратить вынос активного ила.

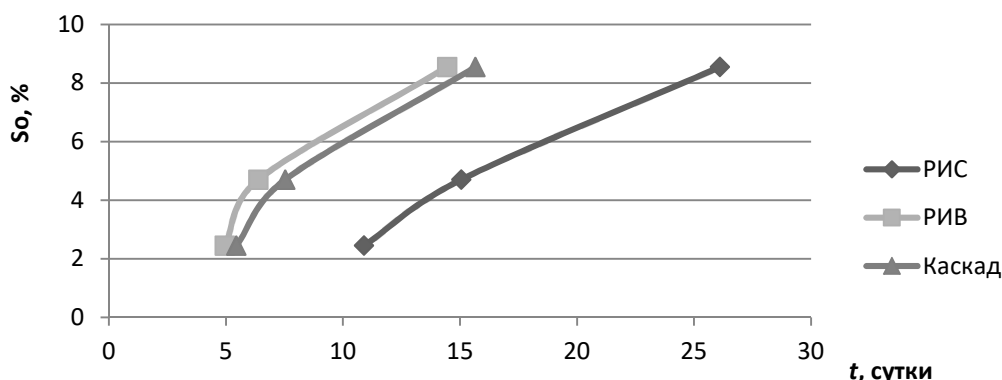


Рисунок 4. – Зависимость периода сбраживания от начальной загрузки для конверсии 25% для различных режимов работы

На графике (см. Рисунок 4) приведено сравнение времени сбраживания в реакторах различного типа для конверсии 25% при различных начальных концентрациях сырья. Отсюда видно, что режим РИВ является наиболее выгодным с точки зрения максимального выхода продукта. Но главным недостатком режима РИВ является периодичность процесса и неравномерность выхода биогаза. Эти недостатки могут быть устранены в каскаде реакторов. Режим каскада реакторов имеет близкие к РИВ показатели и дает возможность организации непрерывного процесса.

В таблице 1 приведены объемы выхода биогаза, получаемого в реакторе объемом 800 м³, в зависимости от массовых концентраций (в долях от единицы) содержания органики в отходах производства. Из таблицы видно, что выход биогаза в РИС в среднем на 20% ниже, чем в реакторах РИВ и каскаде реакторов.

Таблица 1. – Показатели работы реактора объемом 800 м³ для разных режимов работы

Тип отходов, его состав (орг. вещество, дол. ед.)	Режим работы	Конверсия на 10 суток	Выход биогаза, м ³
Отходы нефтепереработки, $S_0 = 0,0245$	РИС	24	3,904
	РИВ	31	5,043
	Каскад	30	4,88
Смесь отходов, $S_0 = 0,0471$	РИС	22	5,087
	РИВ	30	6,782
	Каскад	29	6,555
Отходы нефтепереработки, $S_0 = 0,0855$	РИС	16	9,083
	РИВ	20	11,350
	Каскад	19	10,782

Длительный перерыв между свежими загрузками сбраживаемых органических отходов, что подтверждено многолетним опытом, не приостанавливает процесс их сбраживания и отражается лишь на производительности метантенка, суточной выработке биогаза и его калорийности, тогда как прекращение подогрева сбраживаемой массы утепленного метантенка на длительное время также не приостанавливает процесс сбраживания, но снижает его производительность. Высокие энергозатраты, металлоёмкость и дороговизна конструкции ограничивают её применение.

Закключение. Таким образом, анализ приведенных режимов работы показывает, что проблема разработки новых технологий и оборудования для производства биогаза является актуальной. Требуется дальнейшее совершенствование существующих конструкций и создание математического аппарата для их проектирования и оптимизации.

Задачей настоящего исследования является создание такого метантенка для последовательного пофазного анаэробного сбраживания различных разжиженных органических отходов, который был бы наименее сложен и трудоемок в изготовлении, обладал бы высокой степенью надежной и стабильной работоспособности; не требовал длительного времени на какие-либо эксплуатационно-регулирующие и ремонтные мероприятия, прочисток и приостановок процесса последовательного пофазного анаэробного сбраживания различных разжиженных органических отходов.

Согласно поставленной задаче решение предлагается достигать тем, что разделить общий метантенк перегородками в зависимости от формы резервуара на разные зоны. В разных зонах осуществлять разные режимы (РИВ и РИС), достигая тем самым результаты сбраживания возможного каскада реакторов. Секции, предназначенные для разных зон, имеют разные объемы, рассчитанные на разное время пребывания в зависимости от органической составляющей отходов (рисунок 5).

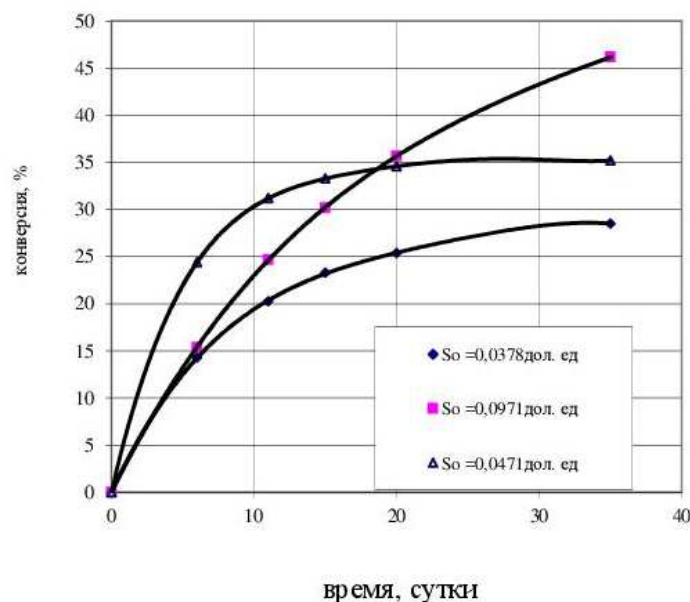


Рисунок 5. – Изменение расчётной конверсии органического вещества отходов очистных сооружений нефтепереработки ($S_0 = 0,0378$ и $0,091$ дол. ед.) и их смеси с растительной добавкой ($S_0 = 0,0471$ дол. ед.) во времени для термофильного режима сбраживания

Как следствие (см. Рисунок 5), уже на 11 сутки конверсия метаногенеза для смеси отходов достигает более 30%, а для отходов нефтепереработки – более 20%. Даже второй результат вполне удовлетворителен для технологии комплексной переработки органосодержащих отходов [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гюнтер, Л.И. Метантенки / Л.И. Гюнтер, Л.Л. Гольдфарб. – М. : Стройиздат, 1991. –127 с.
2. Кутепов, А.М. Общая химическая технология / А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.Г. Беренгартен. – М. : Высшая школа, 1990. – 514 с.
3. Шевченко, Л.П. Методика расчета кинетических констант анаэробного сбраживания некоторых органосодержащих отходов / Л.П. Шевченко, Р.А. Андреева, Г.Н. Абаев // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. – 2004.
4. Шевченко, Л.П. Исследование кинетики метаногенеза органосодержащих отходов нефтепереработки / Л.П. Шевченко, О.Е. Шестопалова // Труды БГТУ. Сер.: Химия, технология органических веществ и биотехнология. – Минск, 2012. – № 4. – С. 96–101.

Поступила 28.06.2019

MODELING OF VARIANTS OF ANAEROBIC DIGESTION OF ORGANIC WASTE REACTORS WITH BIOGAS PRODUCTION

L. SHEVCHENKO

The article studies the methods of calculating the mode of operation of anaerobic digestion reactors of organic waste on the example of waste oil refining to produce biogas. Mathematical modeling and the process of optimization of fermentation of various waste oil refining based on the calculation of residence time, providing the required amount of conversion of organic matter waste.

Keywords: organ-containing waste, biogas, methanogenesis, mathematical modeling, time spent in the reactor.

УДК 614.8.01:331.45:331.461

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИНТЕГРИРОВАННЫХ РЕШЕНИЙ
В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ ТРУДА**

канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА
(Полоцкий государственный университет)
В.Н. САМУСЕВИЧ

(Управление промышленной безопасности и энергосбережения концерна «Белнефтехим»)

Выполнен статистический анализ динамики несчастных случаев на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более в Республике Беларусь за период с 1990 по 2018 гг. С помощью методов корреляционного анализа подтверждена отрицательная линейная связь между коэффициентами частоты и тяжести травматизма на предприятиях Республики Беларусь за рассматриваемый период. Представлена динамика производственного травматизма в организациях концерна «Белнефтехим» за пятилетний период с 2004 по 2018 гг. Выполнен анализ используемых цифровых инструментов интегрированных решений для обеспечения охраны труда на производстве. Показано, что современные цифровые информационно-коммуникационные технологии имеют специфические особенности и берут на себя часть функций специалистов по охране труда, что позволяет соответствующим службам перейти на новый алгоритм обеспечения безопасности труда на производстве.

Ключевые слова: охрана труда, производственный травматизм, цифровые инструменты.

Введение. Эксперты Международной организации труда, анализируя мировой уровень производственного травматизма, сообщают, что каждый год регистрируется около 340 млн. несчастных случаев на производстве, из которых с летальным исходом – 2,3 млн., каждую минуту от травм и заболеваний, связанных с работой, умирает 4 человека. Только от воздействия вредных веществ в рабочей зоне регистрируются около 650 тыс. смертей в год. Потери общества от неблагоприятных и опасных условий труда составляют 4% мирового ВВП. При этом, общеизвестно, что один доллар средств, вложенных в улучшение условий труда на производстве, приносит прибыль в размере около 2,6 доллара США [1–10]. Разработка превентивных мер по снижению числа производственных травм и профессиональных заболеваний требует от специалистов в области охраны труда учета и системного изучения большого потока информации, умения анализировать сложные производственные ситуации, прогнозировать события и своевременно принимать обоснованные и взвешенные решения о целесообразности реализации тех, либо иных профилактических мероприятий. Данные обстоятельства обуславливают использование цифровых инструментов интегрированных решений для обеспечения охраны труда на производстве. анализ современного состояния данного вопроса определил цель настоящего исследования.

Индустриализация общества претерпела значительные преобразования, начиная с XVIII века, внедрение машин и оборудования, использующих энергию водяного пара, повысило степень механизации и уменьшило объем ручного труда, что способствовало наступлению промышленной революции 1.0. Следующим этапам (Индустрия 2.0), произошедшим в XIX веке считают широкое использование электричества и расширение массового производства, основанного на разделении труда. XX век принес мощные сборочные линии, что связано с развитием электроники, особенно активно – в период 1970 – 2000 гг.; промышленное производство стало все более автоматизированным. Наступление этапа «Индустрия 4.0» в развитии промышленного производства связывают с широким использованием цифровых технологий, охватывающих все сферы жизнедеятельности человека [11]. Несомненно, данные технологии будут активно развиваться и в сфере обеспечения трудовой безопасности.

Методы исследования. Выполнены количественный и качественный статистические анализы динамики несчастных случаев на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более в Республике Беларусь за период с 1990 по 2018 гг. по официальным данным Белстата. С помощью методов корреляционного анализа подтверждена отрицательная линейная связь между коэффициентами частоты и тяжести травматизма на предприятиях Республики Беларусь за рассматриваемый период. Проведен анализ используемых современных цифровых инструментов интегрированных решений для обеспечения охраны труда на производстве.

Основная часть. В Республике Беларусь наблюдается стабилизация общего уровня производственного травматизма. По данным Белстата общая численность потерпевших при несчастных случаях на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более в Республике Беларусь ежегодно снижается, данная тенденция прослеживается как по общему числу производственного травматизма (рисунок 1) по экспоненциальной зависимости, так и по количеству травм со смертельным исходом (рисунки 2, 3), при этом зависимость носит линейных характер.



Рисунок 1 – Общая численность потерпевших при несчастных случаях на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более в Республике Беларусь (по данным Белстата)



Рисунок 2 – Численность потерпевших при несчастных случаях на производстве со смертельным исходом в Республике Беларусь (по данным Белстата)

Исключение составляет 2018 год, в котором официально зарегистрировано на 280 случаев больше производственных травм, чем в предыдущем году.



Рисунок 3 – Численность потерпевших при несчастных случаях на производстве со смертельным исходом в Республике Беларусь на 1000 работающих (по данным Белстата)

Сравнительный анализ основных относительных статистических показателей в области охраны труда – коэффициентов частоты и тяжести травматизма на предприятии (динамика изменения данных показателей представлена на рисунках 4 и 5 соответственно, а методика расчета приведена в [1; 12]) показывает, что на фоне постоянного снижения коэффициента частоты, постоянно растет коэффициент тяжести производственного травматизма. Установлена высокая обратная корреляционная связь – парный коэффициент корреляции в целом по всем травмам составляет «минус» 0,8921, а по травмам с летальным исходом – «минус» 0,9776. Коэффициент частоты производственного травматизма в Республике Беларусь в 2018 году в 9,1 раза ниже, чем зафиксированный в 1990 году, а тяжесть травм в 2018 году выросла в 1,7 раза по сравнению с 1990 годом.



Рисунок 4 – Коэффициент частоты производственного травматизма в Республике Беларусь (общая численность потерпевших при несчастных случаях на производстве на 1000 работающих)



Рисунок 5 – Коэффициент тяжести производственного травматизма в Республике Беларусь (число человеко-дней нетрудоспособности у потерпевших на производстве на одного потерпевшего)

Распределение процента смертельно травмированных по возрастным группам в Республике Беларусь за пятилетний период с 2014 по 2018 гг. приведено на рисунке 6. Видно, что наибольший удельный вес по травмам с летальным исходом занимают работники в возрасте от 51 до 60 лет. Специалисты утверждают [13; 14], что в данной возрастной группе происходит не только адаптация к опасности (потеря остроты ощущения опасности, ухудшение скорости реакции, переоценка своих возможностей), но и привычка к нарушению правил охраны труда (пренебрежение правилами безопасности труда).

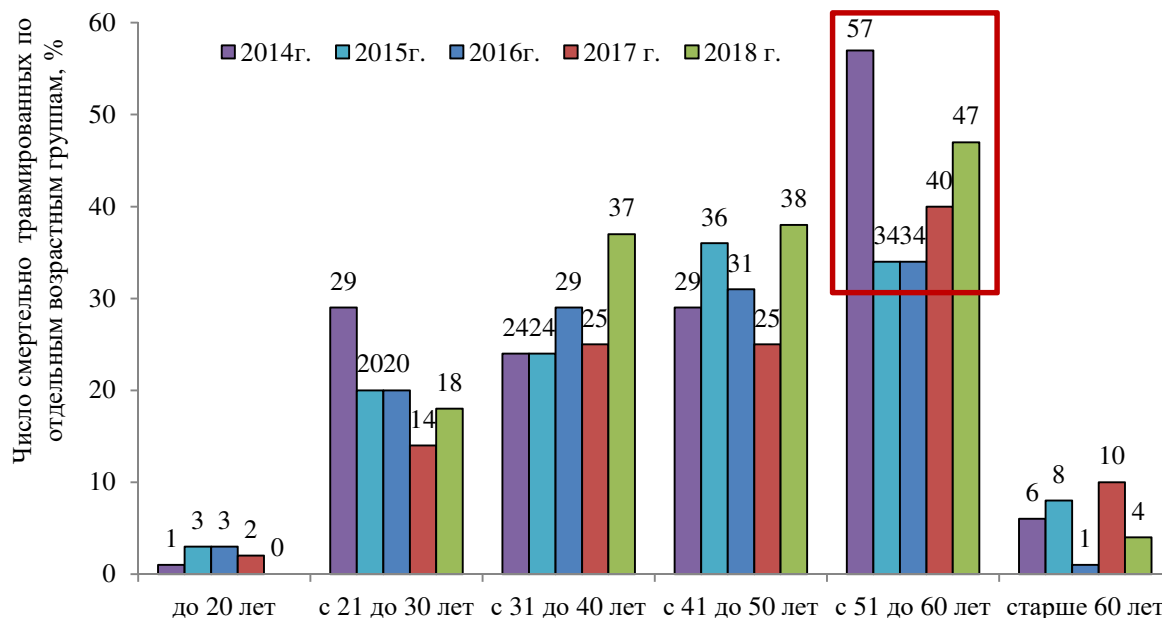


Рисунок 6. – Распределение процента смертельно травмированных по возрастным группам в Республике Беларусь

По данным Департамента государственной инспекции труда Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь чаще всех на производстве погибают работники, имеющие стаж работы по профессии менее 5 лет, при этом почти каждый четвертый погибший на момент травмирования имеет стаж работы по специальности менее 1 года. Что в большинстве случаев обусловлено неправильными, неточными, ошибочными, неосторожными либо несвоевременными действиями, опрометчивыми поступками либо пропуском необходимых операций.

На примере предприятий Минпрома Республики Беларусь определены часы с максимальной частотой травмирования в течение рабочего дня, на которые приходится более 70% всех случаев – это первый час работы, час после обеда и последний час работы [15].

Динамика производственного травматизма в организациях концерна «Белнефтехим», полученная согласно данным [15], приведена на рисунке 7. Основные причины несчастных случаев на производстве концерна «Белнефтехим» такие же, как и по всей республике, а именно: нарушение требований охраны труда самими потерпевшими; личная неосторожность; неудовлетворительная организация работ повышенной опасности; нарушение требований охраны труда другими работниками.



Рисунок 7 – Численность потерпевших при несчастных случаях на производстве в организациях концерна «Белнефтехим»

За последние три года наблюдения в организациях концерна «Белнефтехим» растет общая численность потерпевших при несчастных случаях на производстве, в т.ч. с летальным исходом, что обуславливает необходимость снижения рисков производственного травматизма путем разработки и внедрения более эффективных профилактических мероприятий.

Перспективным направлением повышения эффективности работы в области охраны труда является внедрение цифровых информационно-коммуникационных технологий, повышение вовлеченности работников в решение вопросов безопасности труда, применение инструментов риск-ориентированного подхода и формирование ценностей и поведенческих установок работников на безопасный труд.

Эпоха цифровой экономики, «Индустрии 4.0» и развитие сферы интернета вещей диктует необходимость развития IT и Smart-разработок («Умных технологий») в различных системах управления предприятием, в том числе и в системах управления охраной труда. Обзор цифровых инноваций в области по охране труда, выполненный по [16–26], приведен в таблице.

Следует отметить, что специализированных продуктов по автоматизированию рабочего места специалиста по охране труда, позволяющих сокращать время на планирование и организацию работы, быстрее выполнять обработку больших объемов информации и упростить трудоемкую монотонную работу, только на российском рынке более сотни. В таблице приведены цифровые инновации, получившие наиболее широкое распространение.

К цифровым средствам, традиционно используемым специалистами в области охраны труда, следует также отнести аналитические правовые системы онлайн доступа, такие как «КонсультантПлюс», «Бизнес-Инфо», информационно-поисковую систему «ЭТАЛОН» и прочие. Данные программные продукты содержат актуальные нормативные правовые акты, позволяют осуществлять их упрощенный поиск и анализ, при этом существенно сокращается время на выполнение основных задач по охране труда.

Цифровые симуляторы и двойники оборудования, технологии 3D виртуальной реальности по отработке навыков, внедряемые в процесс обучения работников по охране труда, позволяют значительно повысить эффективность подготовки персонала путем создания интерактивной обучающей среды, максимально приближенной к реальной. Замена традиционной формы проведения инструктажей на Smart-технологии целесообразна в связи с более высокой пропускной способностью зрительного анализатора, по сравнению со слуховым. При зрительном восприятии информации активизируется правое полушарие головного мозга, формирующее образное мышление, способствующее переводу информации в подсознательную память. А использование мобильных приложений позволяет независимо от места нахождения работника надлежащим образом подготовиться к проверке знаний по охране труда, проходя пробные тестирования даже в режиме офлайн.

Таблица. – Обзор современных цифровых средств в области по охране труда

Направление использования	Наименование цифрового инструмента	Характеристика и преимущества цифрового инструмента
1	2	3
Обучение охране труда	Система «Олимпокс» (ООО «А-П», Россия)	Онлайн платформа удаленного доступа, для проведения обучения и аттестации работников без отрыва от производства, как по охране труда, так и по промышленной, экологической, пожарной, радиационной безопасности и гражданской обороне. К преимуществам цифрового инструмента следует отнести отсутствие необходимости в организации локальной сети на предприятии; мобильность, без привязки к одному рабочему месту (возможность дистанционной предаттестационной подготовки в режиме самоподготовки); высокую эффективность обучения; постоянное пополнение курсов и актуализация на соответствие требованиям российских НПА и ТПНА
	Обучающе-контролирующая система «ОЛИМПОКС» и система «ОЛИМПОКС: Инструктаж» (ООО «ТЕРМИКА», Россия)	Автоматизируют процессы предэкзаменационной подготовки и проверки знаний в области охраны труда и безопасности на производстве, а также сопутствующие процессы: составление отчетности, планирование, уведомление сотрудников, проведение инструктажей. Система «ОЛИМПОКС» включает пять разделов: «Подготовка к экзамену», «Экзамен», «Соревнование», «Вводный инструктаж» и «Управление системой». К преимуществам программы следует отнести возможность фотоидентификации работников
	Онлайн-система обучения LMS (Learning Management System) и VR (Virtual Reality)-тренажеры (ЦВР «КРОК», Россия)	Обучающие курсы виртуальной реальности позволяют работнику отрабатывать основные производственные задачи на точной копии (цифровом двойнике) оборудования без ущерба имуществу предприятия, окружающей среды и своему здоровью. К преимуществам цифрового инструмента следует отнести использование цифрового сторителлинга, 3D-технологий, виртуальной и дополненной реальности, что позволяет повысить эффективность обучения и тренингов в области охраны труда за счет наглядного представления учебных материалов
	VR-обучение. Система обучения сотрудников с помощью виртуальной реальности (Cerevrum Inc., Россия и США)	Разработаны обучающие симуляторы, ориентированные на развитие и отработку навыков «soft skills» и исследование когнитивных и социально-поведенческих способностей человека в производственной среде. Несомненным преимуществом обучающего курса является возможность взаимодействия работника с цифровой копией оборудования и приобретения навыков безопасного управления им. Симуляторы в виртуальной реальности позволяют отрабатывать навыки по охране труда как при штатном режиме работы производства, так и в чрезвычайных ситуациях
	Программа «Экзамен» (Инновационный центр Надежды Бондаренко, Беларусь)	Программа позволяет осуществить контроль знаний и экзаменование работника путем вывода на экран компьютера вопросов и вариантов ответа, один из которых правильный. Обеспечивается объективность оценки знаний, исключается предвзятое отношение экзаменатора к экзаменуемому. Возможность одновременного проведения экзамена у большой группы людей. Основным достоинством программы является база вопросов, составленных на основании действующих в Республике Беларусь нормативных документов. Перечни вопросов по специальностям, подконтрольным Госпромнадзору Республики Беларусь, согласованы с ним.
Контроль соблюдения требований по охране труда	«Производственный контроль» интегрированная система обеспечения безопасности работ (ИСОБР) (компания «Визитек», Россия)	Представляет собой модульную интеллектуальную систему автоматизации процессов охраны труда, промышленной безопасности и охраны окружающей среды, обеспечивая координацию работ, управление рабочим процессом, безопасность людей, оборудования и промышленного объекта в целом. Использует опросные и маршрутные листы, выявляет риски, ведет учет всех происшествий, строит глобальную аналитику и оценивает эффективность выполнения профилактических и предупредительных мероприятий. Достоинством ИСОБР является допустимость изменения функциональных возможностей в зависимости от требований и запросов конкретного предприятия и сферы его деятельности, цифровой инструмент может интегрироваться с другими автоматизированными системами, используемыми предприятием, например ПАЗ и АСУ ТП.

Продолжение таблицы

1	2	3
Контроль соблюдения требований по охране труда	Приложение для мобильных телефонов «Я – инспектор» (Роструд, Россия)	Бесплатное приложение входит в систему электронных сервисов для работников и работодателей «Онлайнинспекция.рф», используется для фиксации нарушений требований трудового законодательства в сфере охраны труда. Любой свидетель нарушения требований может его сфотографировать на мобильный телефон и отправить в государственную инспекцию труда России, которой по факту нарушения проводится внеплановая проверка. К преимуществам цифрового инструмента можно отнести его доступность и наличие обратной связи
Организация работы по охране труда (автоматизированное рабочее место (АРМ) специалиста по охране труда)	«Охрана труда» для 1С: Предприятия 8 (Группа компаний «Информ Сервис», Россия)	Позволяет вести документооборот согласно российскому законодательству по специальной оценке условий труда; медицинским осмотрам; учету спецодежды и СИЗ; системам управления охраной труда; инструктажам; обучению и проверке знаний по охране труда; допускам к работе, предписаниям и разработке мероприятий, в т.ч. оценке и анализу профессиональных рисков; управлению инструкциями и документацией; расследованию несчастных случаев; расчету льгот, компенсаций, дополнительных дней отпуска, бюджета по охране труда (сметы расходов); дает возможность создавать электронные курсы, а также вести документацию по промышленной и пожарной безопасности. К преимуществам следует отнести то, что данный цифровой инструмент является прикладным решением на платформе 1С: Предприятие 8 для автоматизации всей (экономической, организационной и управленческой) деятельности предприятия
	«1С. Производственная безопасность. Охрана труда» (ИНТЕРС, Россия)	Предназначена для автоматизации задач охраны труда на предприятиях различных отраслей в соответствии с требованиями российского законодательства. Дает возможность выполнять оформление и учет нарядов-допусков на выполнение работ повышенной опасности; формирование норм выдачи и плана закупок, учет, контроль обеспеченности, расчет потребности и контроль выдачи СИЗ, а также смывающих и обезвреживающих средств; работать с данными по несчастным случаям на производстве, внешним и внутренним проверкам состояния охраны труда; планировать, вводить и хранить результаты проведения специальной оценки условий труда и прохождения медицинских осмотров; планировать и контролировать сроки выполнения мероприятий по устранению нарушений требований охраны труда и учебной деятельности в области охраны труда (обучение, инструктажи, стажировки, проверка знаний и аттестации). К достоинствам программы следует отнести то, что при разработке программного продукта учтен опыт консалтинговых проектов российских нефтегазовых компаний
	Онлайн-сервис «Абие» (Abie System, Россия)	Онлайн-сервис контроля состояния охраны труда на производстве, позволяет управлять обеспеченностью работников СИЗ, уровнем знаний, состоянием здоровья, допуском на опасное производство. Включает в себя сервисы «Электронная книга нарядов и предписаний», «Обеспечения СИЗ»; «Обучение»; «Медосмотры»; «Спецоценка»; «Труд-Знания-Безопасность». К преимуществам следует отнести онлайн работу сервиса, хранение данных индивидуально на каждого работника в виде личной профессиональной карты в облачном хранилище, при этом информация защищается подобно данным онлайн-банкингов. Работник может лично убедиться в уровне своей профессиональной подготовки и собственной безопасности на производстве. Система способна обрабатывать более миллиона одновременных запросов.
	Информационная система управления «Промышленная безопасность и охрана труда» (ООО «БРеаЛИТ», Россия)	Автоматизирует в соответствии с требованиями действующей российской и международной нормативно-правовой базы процессы управления промышленной и пожарной безопасности, охраны труда и окружающей среды. Содержит более 300 модулей в составе 19 блоков. Достоинство – комплексный подход охватывает большую часть направлений техносферной безопасности, WEB-интерфейс позволяет отказаться от установки дополнительного программного обеспечения.

Окончание таблицы

1	2	3
Организация работы по охране труда (автоматизированное рабочее место (АРМ) специалиста по охране труда)	Облачный сервис «MyObject» («Ливинг коре», Россия)	Информационная платформа по управлению и контролю безопасности на производстве, ведет электронный документооборот по охране труда согласно российскому законодательству, формирует базы данных опасных объектов, учитывает риски, контролирует выполнение предписаний. Достоинство системы – единое информационное пространство для сотрудников всех уровней, что существенно упрощает их взаимодействие.
	АРМ Охрана труда (ОДО «Экспертцентр», Республика Беларусь)	Предназначена для автоматизации основных процессов в области охраны труда на предприятиях всех форм собственности, позволяет автоматизировать организацию медицинских осмотров, обучение и проверку знаний работников в области охраны труда, проведение инструктажей, обеспечение работников СИЗ, ведение учета предписаний по охране труда. Главным преимуществом программы является то, что информационно-правовая система базируется на законодательстве Республики Беларусь
	Система Q ⁴ Safety (Engica, США)	Цифровая система обеспечивает управление процессом оценки профессиональных рисков, ведет контроль выдачи нарядов на выполнение работ, сертификатов, ограничений на допуск к самостоятельной работе и основных процедур по охране труда, позволяет осуществлять комплексное управление аудитом. Достоинство в том, что система международная и ориентирована на применение в нефтегазовой промышленности, электроэнергетике и химическом секторе
Профилактика и предотвращение происшествий	«Умная» видеоаналитика (российские КРОК, DSSL и другие компании)	Предполагают использование систем аудио- и видеофиксации для контроля соблюдения работниками требований охраны труда и ограничения доступа в опасные зоны. Могут использоваться сигнальные извещатели, к примеру, если работник не использует положенные СИЗ. Специалист по охране труда получает в онлайн-режиме оповещение о необходимости принятия незамедлительных мер. Для ограничения доступа в места с повышенным риском травмы (к примеру, в зонах работы станков с движущимися и вращающимися частями) внедряются системы лазерного и электронного машинного ограждения со световой и звуковой сигнализацией и автоматическим отключением работы оборудования
	«Электронная система медицинского осмотра» (EDISON, Россия)	Является диагностическим терминалом, выполняющим тестирование работника на алкоголь, измерение температуры тела, выполняет оценку состояния ЦНС для диагностики наркотического опьянения и измерение артериального давления. Преимущества – сокращает время на предсменный медосмотр и штат медперсонала
Средства индивидуальной защиты (СИЗ)	«Умная» каска» (ряд компаний Human, «РОСОМЗ», Softline и другие)	Через единую облачную платформу помогает контролировать ношение СИЗ, отслеживать местоположение работника, нетипичность поведения, оповещает (вибрацией или световой индикацией) об опасностях, угрожающих здоровью, в т.ч. удар, падение, экстремальная температура и прочее. К достоинствам продукта следует отнести то, что кроме решения ряда проблемных вопросов охраны труда, есть возможность контроля фактически отработанного работниками времени
	Другие носимые устройства (МТС и Мегафон, Россия)	Предлагаются телеметрические модули, вшиваемые в спецодежду (жилет, куртку, перчатки, обувь), браслеты, ремни, предохранительные пояса и прочие. Позволяют проводить диагностику жизненно важных показателей работников, их перемещение в режиме онлайн, выполнять идентификацию личности, могут оснащаться тревожной кнопкой, газоанализатором, контролировать падение и подкальзывание. Преимущества – адаптируются под запросы заказчика

Заключение. Анализ используемых цифровых инструментов интегрированных решений для обеспечения охраны труда на производстве показал, что данные технологии уже сегодня являются обязательным и необходимым инструментарием служб охраны труда. Цифровые инновации характеризуются

обширным функционалом и применяются в различных направлениях работы в области охраны труда, а именно: обучение, контроль соблюдения требований безопасности, автоматизация рабочего места специалиста по охране труда, профилактика и предотвращения происшествий и совершенствование средств индивидуальной защиты работников. Несмотря на достаточно высокую стоимость, решение Smart-технологиями широкого круга задач в области охраны труда (в особенности, в организациях концерна «Белнефтехим», где экономические потери от нежелательных событий наиболее значительны и, вместе с тем, в последние годы растет частота производственного травматизма) позволит сократить часть функциональных обязанностей специалистов по охране труда, а соответствующим службам – оперативнее реагировать на профессиональные риски, принимать более эффективные решения и предотвращать профессиональные заболевания и несчастные случаи на производстве. Разработка «умных» технологий, учитывающих специфические особенности деятельности организаций концерна «Белнефтехим» в настоящее время является перспективным направлением исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булавка, Ю.А. Анализ производственного травматизма на нефтеперерабатывающем предприятии / Ю.А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 130–137.
2. Булавка, Ю.А. Современное состояние и совершенствование методики экспертной оценки профессионального риска на рабочих местах / Ю.А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 156–163.
3. Булавка, Ю.А. Концептуальный подход к оценке профессионального риска на опасных производственных объектах / Ю.А. Булавка, О.О. Смиловенко // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2013. – Т. 8, № 1. – С. 125–131.
4. Булавка, Ю.А. Совершенствование технологии экспертной оценки профессионального риска на рабочих местах / Ю.А. Булавка // Безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 7. – С. 9–15.
5. Булавка, Ю.А. Развитие комплексной оценки профессионального риска путем учета суммарной вредности условий труда / Ю.А. Булавка // Гигиена и санитария. – 2013. – № 4. – С. 47–54.
6. Булавка, Ю.А. Нечетко-множественный подход к экспертной оценке профессиональных рисков на примере условий труда работников нефтеперерабатывающего завода / Ю.А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2013. – № 12. – С. 59–66.
7. Булавка, Ю.А. Анализ влияния экологически неблагоприятных условий труда на состояние здоровья работников производства смазочных масел и битумов / Ю.А. Булавка // Актуальные вопросы антропологии / Ин-т истории НАН Беларуси. – Минск : «Беларуская навука», 2014. – Вып. 9. – С. 349–360.
8. Булавка, Ю.А. Анализ последствий воздействия производственных факторов на состояние здоровья работающих на нефтеперерабатывающем предприятии / Ю.А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 144–149.
9. Kozhemyatov, K.Y. The improving of the safety level of the equipment working under excessive pressure / K.Y. Kozhemyatov, Y.A. Bulauka // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019 – London : Litvinenko (Ed), 2020 Taylor & Francis Group. – Vol. 2. – P. 546–552.
10. Методы оценки риска в системе управления охраной труда / И.Г. Старовойтов, В.А. Бирюк, Ю.А. Булавка // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Респ. Беларусь. – 2018. – Т. 2. № 1. – С. 5–17.
11. Badri, A. Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? / A. Badri, B. Boudreau-Trudel, A. Saâdeddine Souissi // Safety Science. – 2018. – № 109. – P. 403–411.
12. Сечко, Л.К. Учет и анализ производственного травматизма за рубежом и в Республике Беларусь / Л.К. Сечко, М.В. Бушуева // Охрана труда и социальная защита. – 2010. – № 9. – С. 49–54.
13. Шелемов, В.В. Психологические аспекты безопасности труда / В.В. Шелемов // Охрана труда и социальная защита. – 2010. – № 9. – С. 48–51.
14. Peng, Lu. A meta-analysis of the relationship between ageing and occupational safety and health / Lu Peng, Alan H.S. Chan // Safety Science. – 2019. – Vol. 112. – P. 162–172.
15. Рубан, И. Итоги работы семинара по вопросам предупреждения производственного травматизма в организациях концерна «Белнефтехим» и Министерства промышленности [Электронный ресурс] / И. Рубан // Нефтехимия. Новости. – 2019. – Режим доступа: <https://belchemoil.by/news/obshhestvo/v-centre-vnimanija-chelovek/dumaj-delaj-ne-vlezaj-itogi-raboty-seminara-po-preduprezhdeniy-proizvodstvennogo-travmatizma>. – Дата доступа: 28.07.2019.
16. Магид, К. «Умные технологии» в охране труда: новейшие тенденции [Электронный ресурс] / К. Магид // Профтруд. – 2018. – Режим доступа: <http://protrud.info/articles/oborudovanie-i-tehnologii/umnye-tehnologii-v-okhrane-truda-noveyshie-tendentsii.php>. – Дата доступа: 28.07.2019.

17. Кокурина, В. Развитие цифровых технологий в области охраны труда [Электронный ресурс] / В. Кокурина // Ассоциация эталон. – 2018. – Режим доступа: <https://www.aetalon.ru/single-post/2018/02/22>. – Дата доступа: 28.07.2019.
18. Кочнев, А.Д. Информационные и телекоммуникационные технологии в области производственной безопасности / А.Д. Кочнев, Е.В. Стасева // Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. с науч. шк. для молодежи : сб. науч. тр. / Мин-во образования и науки Российской Федерации ; ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» ; ред.-сост.: Н.М. Пузырев [и др.]. – Тверь : ТвГТУ ; Издатель А.Н. Кондрачев, 2016. – С. 48–50.
19. Маренчук, Ю.А. Цифровые образовательные ресурсы как средство обучения на уроках основ безопасности жизнедеятельности / Ю.А. Маренчук, С.Ю. Рожков, К.В. Зимин // Личность, семья и общество: вопросы педагогики и психологии. – 2014. – № 39-1. – С. 36–40.
20. Внедрение технологий цифрового обучения для повышения качества обучения работников охране труда / Г.Е. Седельников [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 1. – С. 62–66.
21. Михольский, О.П. Автоматизированное рабочее место инженера по охране труда / О.П. Михольский, В.М. Демидов, А.С. Курганская // Трубопроводный транспорт нефти. – 2008. – № S10. – С. 6–7.
22. Копелиович, Д.И. Классификация автоматизированных систем по охране труда / Д.И. Копелиович, М.С. Полякова // Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2019. – № 2 (7). – С. 15–19.
23. Seong-Kyu Kang. A Platform of People Who are Working for Workers' Health / Seong-Kyu Kang // Safety and Health at Work. – 2019. – Issue 1. – P. 1–2.
24. Towards a conceptual framework of OSH risk management in smart working environments based on smart PPE, ambient intelligence and the Internet of Things technologies / D. Podgorski [i in.] // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. – 2017. – Vol. 23. – Issue 1. – P. 1–20.
25. Nuvolari, A. Understanding successive industrial revolutions: A «development block» approach / A. Nuvolari // Environmental Innovation and Societal Transitions. – 2019. – Vol. 32. – P. 33–44.
26. Kurt, R. Industry 4.0 in Terms of Industrial Relations and Its Impacts on Labour Life / R. Kurt // Procedia Computer Science. – 2019. – Vol. 158. – P. 590–601.

Поступила 05.08.2019

USE OF DIGITAL TOOLS FOR INTEGRATED SOLUTIONS IN THE SPHERE OF LABOR PROTECTION

Y. BULAUKA, V. SAMUSEVICH

A statistical analysis of the dynamics of industrial accidents with the loss of ability to work for one working day or more in the Republic of Belarus for the period from 1990 to 2018 is performed. Using the methods of correlation analysis, a negative linear relationship between the coefficients of the frequency and severity of injuries at the enterprises of the Republic of Belarus for the observed period is confirmed. The dynamics of industrial injuries in the organizations of the «Belneftekhim» concern for the five-year period from 2004 to 2018 is presented. The analysis of the applied digital tools of integrated solutions for the purpose of ensuring labor protection at work is carried out. It is shown that modern digital information and communication technologies have specific features and assume part of the functions of labor protection specialists; and this fact allows the relevant services to switch to a new algorithm for ensuring labor safety at work.

Keywords: labor protection, industrial injuries, digital tools

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Голембиевский А.И. Кинематическая структура зубофрезерного станка с гибридными формообразующими группами для обработки цилиндрических колес с наклонными зубьями	2
Данилов В.А., Селицкий А.Н. Анализ схемы обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом	9
Линник, Д.А. Воронцов А.С. Влияние конструктивного исполнения системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора на развитие профессиональных заболеваний	15
Пилипенко С.В., Дудан А.В., Радулевич Д.О. Влияние радиуса гибки труб автомобильных трубопроводов на прочностные параметры	24

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Попок Н.Н., Анисимов В.С. Кинематика обработки поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом с касательным движением режущей кромки	31
Григорчик А.Н., Астрашаб Е.В., Белоцерковский М.А., Сосновский А.В., Дуадн А.В., Кукареко В.А. Износостойкость газотермических покрытий из псевдосплавов на основе меди, полученных методом высокоскоростной металлизации	39
Белоцерковский М.А., Таран И.И., Кот П.И., Дудан А.В. Технология получения и триботехнические характеристики оксидированных алюминиевых покрытий, нанесенных на полимер	45
Дубко А.Г., Четвертко Н.А., Лебедев А.В. К вопросу об электрической прочности покрытий электрохирургических инструментов	52
Пилипенко С.В., Фруцкий В.А., Конон М.В. Теплофизические свойства газотермических ремонтных покрытий валов под посадку подшипников	57
Пантелеенко Ф.И., Шумов О.В. Моделирование деформации сварных соединений	63

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Шевченко Л.П. Моделирование вариантов работы реакторов анаэробного сбраживания органосодержащих отходов с получением биогаза	67
Булавка Ю.А., Самусевич В.Н. Использование цифровых инструментов интегрированных решений в области охраны труда	72