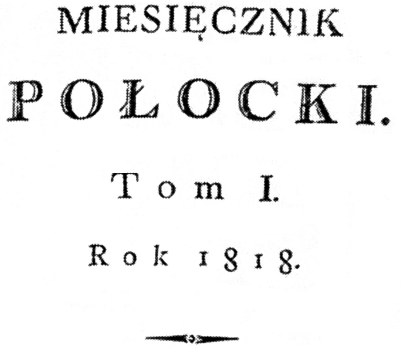

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.
Tom I.
Rok 1818.

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

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаванне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машынабудавання і машыназнаўства, матэрыялазнаўства і металургіі, хімічнай тэхнікі і тэхналогіі.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области машиностроения и машиноведения, материаловедения и металлургии, химической техники и технологии.

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.

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 *Р.Н. Авласенок.*

Подписано к печати 27.08.2015. Бумага офсетная 65 г/м^2. Формат 60×84$^1/_8$. Ризография.
Усл. печ. л. 16,27. Уч.-изд. л. 19,62. Тираж 100 экз. Заказ 1270.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.91.04

АНАЛИЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ МАКРОГЕОМЕТРИЕЙ СЛОЖНЫХ МНОГОГРАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ; А.А. ДАНИЛОВ
(Полоцкий государственный университет)

Объектом исследований являются схемы кинематического профилирования сложных многогранных поверхностей методом следа при непрерывном движении деления. Проанализированы кинематический, геометрический и комбинированный методы управления макрогеометрией указанных поверхностей с конгруэнтными и различными по форме гранями при обработке резцовыми головками по встречной и попутной схемам резания. Установлено влияние кинематического, конструктивного и компоновочного факторов на макрогеометрию многогранных поверхностей и количество формируемых граней при совмещении процессов формообразования и деления. Рассмотрены кинематическая структура и компоновка станка для обработки цилиндрических и конических многогранных поверхностей, а также многогранных поверхностей с винтовыми гранями, обеспечивающие реализацию различных методов управления макрогеометрией их профиля. Показана возможность комплексной обработки на таком станке изделий с многогранными, круглыми и другими поверхностями.

Введение. Управление формообразованием поверхностей при обработке резанием с целью повышения точности и производительности формообразования возможно геометрическим, кинематическим, цикловым и комбинированными методами [1].

Кинематические методы основаны на формировании траектории сложного исполнительного движения в соответствии с геометрией номинальной поверхности за счет согласования скоростей и направлений составляющих его элементарных движений, введения дополнительного движения для коррекции траектории исполнительного движения и т.д.

Геометрические методы обеспечивают управление характеристическим образом инструмента за счет количества и относительного расположения производящих элементов и придания им определенной формы, а также соответствующей ориентации инструмента относительно заготовки.

Цикловые методы позволяют управлять формообразованием за счет рациональной организации цикла обработки, например, путем совмещения в одном цикле двух процессов частичного формообразования или частичного и полного формообразования поверхности, что позволяет формировать требуемую топологию обработанной поверхности [2].

Кинематические, геометрические и цикловые методы являются основой синтеза комбинированных методов управления формообразованием, обеспечивающих комплексное решение задач управления. Например, кинематическим методом обеспечивается форма конгруэнтных участков обработанной некруглой поверхности, а геометрическим – их количество при совмещении процессов профилирования и деления.

Рассмотрим применение и реализацию кинематических и геометрических методов управления в технологиях формообразования сложных многогранных поверхностей.

Управление формообразованием многогранных поверхностей кинематическим методом. Формирование некруглого профиля, образованного несколькими равномерно расположенными по окружности конгруэнтными участками, возможно различными по структуре исполнительными движениями. В этой связи универсальным из кинематических методов управления формообразованием является сообщение дополнительного перемещения инструменту или его элементам для управления траекторией движения формообразования [3]. Однако в этом случае усложняется кинематическая схема обработки и соответственно конструкция станка, снижается его жесткость. Заслуживают внимания методы управления формообразованием, не требующие усложнения кинематической схемы обработки.

Рассмотрим рациональную с точки зрения реализации традиционную схему профилирования многогранных поверхностей с циклоидальным профилем методом следа, основанную на сообщении производящей точке двух согласованных вращательных движений вокруг параллельных осей [4]. Указанные движения могут сообщаться либо инструменту, либо заготовке, либо одновременно этим элементам. Последний вариант проще в реализации и обеспечивает более широкие технологические возможности станка, представленного на рисунке 1, для схем встречного (рис. 1, *а*) и попутного (рис. 1, *б*) резания. Обе схемы обработки многогранных поверхностей реализованы на широкоуниверсальном станке модели ВС 50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» [5].

В первом случае некруглый профиль, вписанный в окружность радиусом R_0, образуется при сообщении заготовке *1* и режущему инструменту *2* в виде резцовой головки с равномерно расположенными по окружности режущими зубьями *3* согласованных вращательных движений B_1 и B_2 с угловыми скоростями соответственно ω_1 и ω_2 вокруг параллельных осей L_1 и L_2. Расстояние между этими осями $l = R + r$ (R – расстояние от вершины C резца до оси L_2 вращения инструмента; r – радиус вписанной в профиль некруглой поверхности окружности).

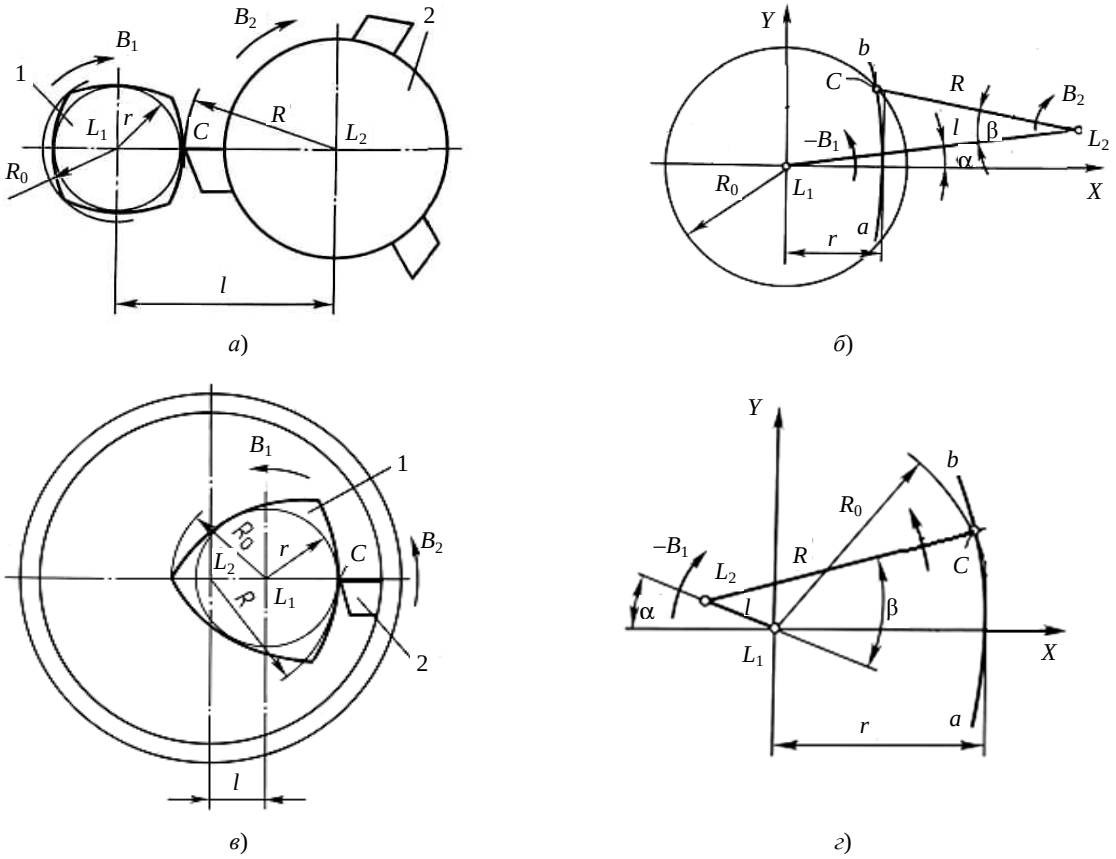


Рис. 1. Формирование профиля многогранной поверхности вращающимся многолезвийным инструментом по встречной (*а*, *б*) и попутной (*в*, *г*) схемам резания:
а, *в* – кинематические схемы обработки; *б*, *г* – схемы профилирования

Производящая точка C инструмента в относительном движении перемещается по траектории ab (рис. 1, *б*), параметрические уравнения которой имеют вид

$$\begin{cases} x = l\cos\alpha - R\cos(\beta - \alpha), \\ y = l\sin\alpha + R\sin(\beta - \alpha), \end{cases} \tag{1}$$

где β – угол поворота точки C вокруг оси L_2, соответствующий углу α поворота заготовки.

Из зависимости (1) следует, что форма траектории при одинаковых параметрах схемы профилирования l, R зависит от отношения угловых скоростей заготовки и инструмента, то есть от β/α.

Например, при $\beta = \alpha$ грани поверхности профилируются по окружности, так как в соответствии с (1) траектория производящей точки C описывается уравнением

$$(x + R)^2 + y^2 = l^2, \tag{2}$$

согласно которому радиус этой окружности равен межосевому расстоянию l.

При $\beta = 2\alpha$ траектория движения профилирования описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x = r\cos\alpha, \\ y = (r + 2R)\sin\alpha, \end{cases} \tag{3}$$

или

$$\frac{x^2}{r^2}+\frac{y^2}{\left(r+2R\right)^2}=1, \tag{4}$$

то есть представляет эллипс и т.д.

Таким образом, за счет параметра β/α обеспечивается управление профилем граней, что позволяет одним инструментом обрабатывать поверхности с выпуклыми, вогнутыми и приближающимися с определенной погрешностью к плоским гранями.

В частности, для образования плоских граней точка *C* должна перемещаться по прямой, что в соответствии с рисунком 1, *б* возможно при выполнении условия:

$$\left(R+r\right)\cos\alpha-R\cos\left(\beta-\alpha\right)-r=0. \tag{5}$$

При замене в уравнении (5) функции косинус двумя членами разложения ее в ряд справедлива следующая зависимость [4]:

$$\beta/\alpha=1+\sqrt{1+r/R.} \tag{6}$$

При меньших, чем по (6), значениях параметра β/α формируются выпуклые, а при больших – вогнутые грани, что позволяет управлять их формой путем настройки этого параметра.

Следует отметить, что при обработке некруглых поверхностей с равномерно расположенными по окружности конгруэнтными гранями отношение β/α должно обеспечивать одновременно с профилированием и процесс деления, то есть непрерывный переход к обработке следующей грани, что ограничивает множество возможных значений параметра β/α. Совмещение процессов формообразования и деления возможно, если

$$i=m/Pz\,, \tag{7}$$

где *m* – количество граней поверхности; *z* – число резцов в головке; *P* – целое число, задающее последовательность обработки граней.

Возможности кинематического метода управления формообразованием существенно расширяются за счет изменения порядка формирования граней, который может быть как последовательным, так и с пропуском определенного числа *P* граней. В первом случае *P* = 1, поэтому, например, участки *a*, *b*, *c*, *d*, *e* профиля пятигранной поверхности формируются в последовательности *a*-*b*-*c*-*d*-*e*. Во втором случае последовательность формирования граней зависит от числа пропускаемых граней, например, при *P* = 2 грани обрабатываются в последовательности *a*-*c*-*e*-*b*-*d*, а при *P* = 3 – *a*-*d*-*b*-*e*-*c* и т. д.

Как следует из (7), для заданного значения *z* каждой последовательности формирования граней соответствует определенное значение передаточного отношения *i*, а следовательно и профиль грани. Например, для рассмотренных вариантов обработки пятигранной поверхности (*m* = 5) двухрезцовой головкой (*z* = 2) при *P* = 1 обрабатываются вогнутые грани, так как *i* = 5/2, а при *P* = 2 – выпуклые грани, так как *i* = 5/4. Поэтому, задавая различную последовательность обработки граней, можно управлять их формой.

Зависимость (7) устанавливает связь между кинематическим *i* и конструктивными *z* и *m* параметрами схемы профилирования поверхности при принятой последовательности формирования ее граней. Например, профиль некруглой поверхности с 5 выпуклыми гранями, форма которых создается по схеме согласно рисунку 1 (*а*) при *i* = 5/4, может быть получен по трем вариантам: 1) *z* = 1, *p* = 4; 2) *z* = 2, *p* = 2; 3) *z* = 4, *p* = 1. Третий вариант обеспечивает максимальную производительность, так как за один оборот инструмента формируются 4 стороны профиля, тогда как в первом – только одна. Соответственно, технологическая производительность третьего варианта больше, чем первого, что позволяет интенсифицировать процесс обработки за счет кинематики схемы профилирования.

При обработке плоских граней одновременно должны выполняться условия (6) и (7), поэтому число резцов в головке и связь между геометрическими параметрами инструмента и заготовки выражаются зависимостями:

$$z=m\Big/\left(P\left(1+\sqrt{1+r/R}\right)\right), \tag{8}$$

$$r/R=m\left(mP^{-1}z^{-1}-2\right)\Big/\left(zP\right). \tag{9}$$

Переход к попутной схеме резания обеспечивается путем настройки расстояния между осями L_1 и L_2, равного разности значений *R* и *r*, то есть *l* = *R* – *r*, и применения охватывающего инструмента (см. рис. 1, *в*).

В этом случае траектория вершины *C* резца *3* в относительном движении (рис. 1, *г*) описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x = -l\cos\alpha + R\cos(\beta - \alpha), \\ y = l\sin\alpha + R\sin(\beta - \alpha). \end{cases} \tag{10}$$

При $\beta = \alpha$ формируемая линия также представляет собой окружность, радиус которой отличается от радиуса окружности, образуемой при встречной схеме резания. При $\beta = 2\alpha$ грани профилируются по эллипсу

$$\frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{(2R - r)^2} = 1, \tag{11}$$

который по форме отличается от эллипса, описываемого уравнением (4).

Таким образом, макрогеометрия обработанной многогранной поверхности зависит от реализуемой схемы резания.

Рассмотренный кинематический метод позволяет управлять не только формой профиля, но и производительностью формообразования. При одинаково направленных движениях B_1 и B_2 скорость резания в средней точке грани (скорость перемещения производящей точки *C* относительно заготовки) определяется уравнением

$$v = 2\pi n_1 (Ri \pm r), \tag{12}$$

где знак «плюс» соответствует встречной, а «минус» – попутной схеме резания.

Поэтому частота вращения заготовки

$$n_1 = v / (2\pi(Ri \pm r)). \tag{13}$$

Из (13) следует, что при равной для обеих схем скорости резания *v* частота вращения заготовки и, соответственно, технологическая производительность в

$$(i + r/R) / (i - r/R) \tag{14}$$

раз больше при обработке по попутной схеме резания. При этом улучшаются условия резания и уменьшается динамическая нагрузка.

Формообразование многогранных поверхностей с винтовыми гранями возможно при согласовании движения профилирования $\Phi_v(B_1B_2)$ и движения формообразования поверхности по длине $\Phi_s(П_3)$ и совмещении их в одно исполнительное движение $\Phi(B_1B_2П_3)$ при условии, что перемещение инструмента за один оборот заготовки равно шагу формируемой винтовой поверхности. В этом случае дополнительно к рассмотренным методам управления профилем граней необходимо обеспечить заданную их форму по длине, что достигается при отношении частот вращательных движений инструмента и заготовки по зависимости

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{i}{1 \pm s/t}, \tag{15}$$

где n_2 – частота вращения резцовой головки, мин$^{-1}$; n_1 – частота вращения заготовки, мин$^{-1}$; *s* – перемещение инструмента за один оборот заготовки (подача), мм/об; *t* – шаг формируемой винтовой поверхности, мм; *i* – число, зависящее от профиля этой поверхности.

Управление формообразованием многогранных поверхностей геометрическим и комбинированным методами. Геометрические методы управления формообразованием многогранных поверхностей основаны на зависимости их профиля от конструктивных и установочных параметров инструмента. Применительно к обработке резцовыми головками (см. рис. 1) к первым относятся радиус *R* инструмента, число *z* его производящих элементов и их относительное расположение, а ко вторым – расстояние *l* между осями инструмента и заготовки и их взаимное расположение (оси могут быть параллельны, пересекаться или скрещиваться).

От радиуса инструмента и расстояния между осями инструмента и заготовки зависит, как следует из (1) и (10), форма образуемых линий, что позволяет, изменяя эти геометрические параметры схемы обработки, управлять макрогеометрией многогранной поверхности.

От числа производящих элементов z зависит количество m граней обработанной поверхности, которое в соответствии с зависимостью (7) составляет $m = iPz$. Так, если $i = 2$ и $P = 1$, то при $z = 1$ осуществляется обработка изделий с двумя противоположно расположенными лысками, при $z = 2$ – четырехгранных, а при $z = 3$ – шестигранных поверхностей.

От числа производящих элементов зависит не только количество, но и форма обработанных граней, так как в соответствии с (7) при постоянных значениях параметров m и P изменение числа режущих зубьев возможно лишь при ином значении i. Это обстоятельство указывает на возможность управления формообразованием одновременно кинематическим и геометрическим методами, то есть комбинированным методом за счет сочетания кинематического и конструктивного факторов.

Если производящие элементы расположены равномерно на одной окружности, обработанная поверхность имеет конгруэнтные грани. В противном случае они имеют разную форму. На рисунке 2 показана схема обработки шестигранной поверхности на заготовке *2* резцовой головкой *1* с тремя режущими зубьями *3*, которые расположены неравномерно по окружности на разных радиусах от оси вращения.

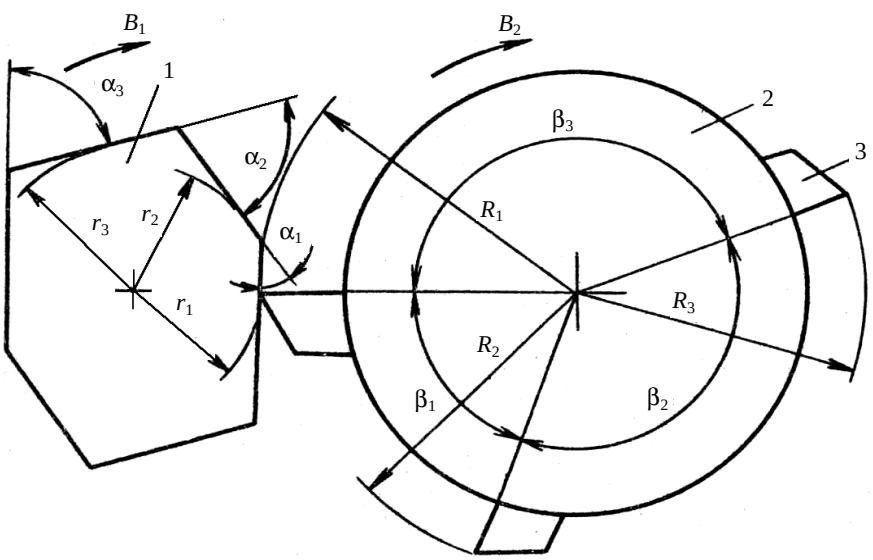


Рис. 2. Схема обработки сложной многогранной поверхности

При обработке по этой схеме многогранной поверхности центральный угол β между двумя любыми соседними режущими зубьями резцовой головки должен быть в i раз больше угла α между обрабатываемыми этими резцами гранями. В частном случае, при $i = 2$, поверхность, обработанная таким инструментом, имеет шесть граней трех различных форм, неравномерно расположенных по окружности. Указанное соотношение между углами β и α обусловлено необходимостью выполнения непрерывного деления в процессе обработки многогранной поверхности.

Разность между радиусами R_i окружностей, на которых расположены вершины режущих зубьев (производящие элементы), равна разности радиусов r_i окружностей, касательных к обработанным ими граням. Геометрические методы управления формообразованием многогранных поверхностей за счет относительного расположения осей вращательных движений инструмента и заготовки основаны на трансформации характеристического образа инструмента, форма которого может изменяться дискретно или непрерывно в процессе перемещения относительно заготовки.

Трансформация характеристического образа обусловлена его зависимостью от ориентации инструмента относительно направления движения формообразования. Например, положениям *а*, *б*, *в*, *г* режущего инструмента с равномерно расположенными по окружности производящими элементами относительно направления движения формообразования v (рис. 3) соответствует его характеристический образ в виде прямолинейного отрезка *1*, окружности *2*, эллипсов *3* и *4*.

В первом случае при прямолинейном движении характеристического образа образуется плоская, а в остальных – цилиндрическая (круговая или эллиптическая) поверхности. Изменением формы характеристического образа инструмента за счет управления его ориентацией можно управлять макрогеометрией поверхности, например, с целью повышения ее точности.

Применительно к обработке многогранных поверхностей задача решается путем определенной ориентации оси вращения инструмента относительно оси вращения заготовки, то есть за счет компоно-

вочного фактора. Оси инструмента и заготовки могут быть параллельны друг другу, пересекаться или скрещиваться, что должно учитываться при разработке компоновки станка.

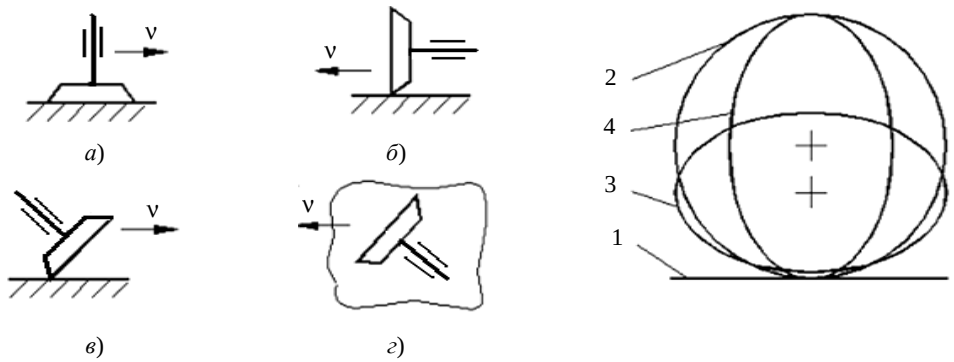


Рис. 3. Схемы *а – в* ориентации режущего инструмента относительно направления движения формообразования и соответствующие им формы 1–4 его характеристического образа

При параллельных осях инструмента и заготовки грани поверхности профилируются по циклоидальным кривым в соответствии с уравнениями (1). Если указанные оси пересекаются под углом φ, то проекция траектории вершины резцов на плоскость её вращения представляет собой не окружность радиусом *R*, а эллипс *4* (см. рис. 3), уравнение которого в системе координат X_1Y_1, связанной с инструментом, имеет вид [5]:

$$x_1^2 \big/ \left(R\cos\varphi\right)^2 + y_1^2 \big/ R^2 = 1. \tag{16}$$

Кривизна эллипса во всех точках в зоне контакта с формируемым профилем меньше кривизны окружности *3*, поворотом которой он образуется. В результате кривизна формируемого профиля граней больше, чем при параллельных осях инструмента и заготовки. Напротив, если оси инструмента и заготовки скрещиваются под некоторым углом γ, проекция траектории вершин резцов на плоскость вращения заготовки представляет собой эллипс *3* (см. рис. 3), который описывается уравнением

$$x_1^2 \big/ R^2 + y_1^2 \big/ \left(R\cos\gamma\right)^2 = 1. \tag{17}$$

С увеличением угла γ кривизна профиля уменьшается, что позволяет управлять профилем обработанных граней, например, минимизировать их отклонение от плоских без сообщения производящим элементам корректирующего движения, как это предусмотрено в известной схеме обработки многогранных поверхностей методом кинематического профилирования, согласно которой резцам кроме вращательного движения сообщается согласованное с ним перемещение в радиальном направлении [2], что усложняет обрабатывающую систему станка.

Рассмотренные выше методы модификации некруглых поверхностей обеспечивает формообразующая система станка (рис. 4) с мехатронными кинематическими связями между исполнительными органами.

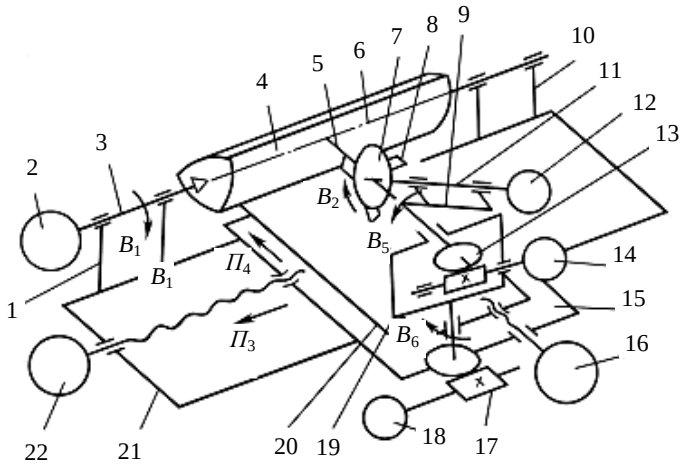


Рис. 4. Кинематическая схема станка для обработки сложных многогранных поверхностей

На станине *21* расположены передняя бабка *1*, задняя бабка *10* и продольный суппорт *15*. Шпиндель *3* несет заготовку *4*, геометрическая ось которого совмещена с осью *6* центров станка. На поперечном суппорте *20* смонтированы стойка *19* и механизм *17* ее поворота B_6 с двигателем *18*. Шпиндель *11* инструментальной бабки *9* оснащен резцовой головкой *7*, вершины зубьев *8* которой расположены в одной плоскости. Инструментальная бабка установлена на стойке с возможностью поворота B_5 вокруг оси *5*, которая пересекается с осью *6* центров станка. Этот поворот выполняется механизмом *13* от двигателя *14*.

Движения B_1, B_2, $П_3$ и $П_4$ осуществляются соответственно двигателями *2*, *12*, *16* и *22*, которые вместе с приводами *14* и *18* связаны с системой программного управления (на рисунке не показана). Двигатели *14* и *18* обеспечивают изменение углового положения шпинделей *3* и *11* как при настройке, так и в процессе обработки с целью управления формообразованием. Профиль изделия образуется согласованными системой управления движениями B_1 и B_2, а формообразование по длине обеспечивается движением $П_3$ или сочетанием движений $П_3$ и $П_4$. При переменной вдоль оси изделия кривизне профиля бабке *9* сообщается непрерывный поворот B_5 вокруг оси *5*.

Станок оснащен регулируемыми в широком диапазоне двигателями, что исключает необходимость в дополнительных механических передачах и присущие им погрешности. Для поступательных перемещений и поворотов исполнительных органов служат высокомоментные электродвигатели, для вращения инструментального шпинделя *11* – асинхронный электродвигатель с частотным регулированием, а для вращения шпинделя *3* – встраиваемый моментный двигатель, например типа 1FW6 фирмы SIEMENS, ротор которого установлен непосредственно на шпинделе.

Обрабатывающая система станка обеспечивает формообразование цилиндрических, конических и фасонных поверхностей вращения, профильных и винтовых поверхностей, что позволяет выполнять на нем комплексную обработку за одну установку сложных по конструкции деталей. Необходимое согласование движений инструмента и заготовки обеспечивается системой управления, а их взаимное расположение – компоновкой станка.

Рассмотрим примеры настройки и работы станка. Обработка многогранных поверхностей осуществляется сменной резцовой головкой с определенным числом режущих зубьев, количество и расположение которых относительно друг друга и оси вращения определяется реализуемой схемой профилирования и параметрами обработанной поверхности в соответствии с приведенными выше зависимостями и схемами обработки.

При обработке цилиндрических и конических многогранных поверхностей при профилировании по схеме, изображенной на рисунке 1, *а*, шпиндели *3* и *11* устанавливаются параллельно друг другу. Согласование движений B_1 и B_2 этих шпинделей в соответствии с зависимостью (7), образующих сложное движение профилирования $Ф_v(B_1B_2)$, обеспечивается системой управления. При обработке цилиндрических многогранных поверхностей резцовой головке *7* за счет перемещения продольного суппорта *15* сообщается простое движение подачи $Ф_s(П_3)$, а при обработке конических многогранных поверхностей – сложное движение $Ф_s(П_3П_4)$, образованное согласованными системой управления перемещениями продольного *15* и поперечного *20* суппортов. В первом случае по классификации [7] станок имеет комбинированную К23, а во втором сложную С24 структуру.

Формообразование многогранных поверхностей с винтовыми гранями осуществляется сложными формообразующими движениями $Ф(B_1B_2П_3)$ или $Ф(B_1B_2\ П_3П_4)$, частными кинематическими структурами станка соответственно типов С13 и С14.

Модификация профиля обработанных многогранных поверхностей обеспечивается поворотом B_6 стойки *19* вокруг вертикальной оси или поворотом B_5 инструментальной бабки *9* вокруг горизонтальной оси. В первом случае оси шпинделей *3* и *11* пересекаются друг с другом, а во втором скрещиваются под определенным углом для трансформации характеристического образа инструмента.

Таким образом, кинематико-компоновочная структура станка позволяет реализовать все рассмотренные выше методы управления формообразованием многогранных поверхностей. Она обеспечивает также возможность обработки других поверхностей. Например, при неподвижной резцовой головке на станке может производиться точение цилиндрической, конической или фасонной поверхности. При установке на шпинделе *11* дисковой фрезы или инструмента для вихревого точения осуществляется обработка резьбы, шаг которой задается системой управления. Благодаря этому на станке возможна комплексная обработка изделий с различными сочетаниями многогранных, круглых и резьбовых поверхностей. На базе рассмотренного станка могут быть созданы специальные станки для обработки различных поверхностей.

Заключение. Требуемая макрогеометрия многогранных поверхностей, профилируемых при обработке резцовыми головками по встречной и попутной схемам резания, обеспечивается кинематическим, геометрическим и комбинированным методами управления, что необходимо учитывать при проектировании кинематики и компоновки станка. Кинематический метод управления позволяет за счет соответст-

вующей настройки станка получать многогранные поверхности с выпуклым или вогнутым профилем граней, с прямолинейной или винтовой их формой по длине, а в сочетании с геометрическим методом управления обрабатывать изделия с заданным числом граней. Модификация их профиля возможна за счет компоновочного фактора путем изменения относительного положения инструмента и заготовки. Возможность реализации рассмотренных методов управления обеспечивается кинематикой и компоновкой станка для обработки сложных многогранных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, В.А. Общие принципы управления формообразованием при обработке резанием / В.А. Данилов, В.А. Терентьев // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр.: в 2-х т.; под ред. И.П. Филонова. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – Т. 1, вып. 20. – С. 21–26.
2. Данилов, В.А. Управление топологией некруглых поверхностей, обработанных по схемам неполного формообразования / В.А. Данилов, А.А. Данилов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 4. – С. 2–9.
3. Грановский, Г.И. Кинематика резания / Г.И. Грановский. – М.: Машгаз, 1948. – 200 с.
4. Карелин Н.М. Бескопирная обработка цилиндрических деталей / Н.М. Карелин. – М.: Машиностроение, 1966. – 187 с.
5. Данилов, В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер-механик. – 2003. – № 3(20). – С. 26–31.
6. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 264 с.
7. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.

Поступила 07.07.2015

ANALYSIS AND REALIZATION OF CONTROL METHOD OF COMPLEX MULTI-FACETED SURFACE MACROGEOMETRY IN METAL-CUTTING TECHNOLOGY

V. DANILOV, A. DANILOV

The object of research is the diagrams of the kinematic profiling of complex multi-faceted surfaces by the trace method with continuous motion of pressure. Kinematic, geometry and combined control methods of macrogeometry of the mentioned surfaces with congruent and different shaped faces in the processing of cutting heads according to counter and climb cutting schemes are analyzed. The effect of the kinematic, constructive and configuration factors on macrogeometry of multi-faceted surfaces and the number of formed facets during the combining of the processes of formation and division is established. Kinematic structure and layout of the machine for the processing of cylindrical and conical multi-faceted surfaces and also multi-faceted surfaces with screw faces are considered. The possibility of complete machining of products with multi-faceted, circular and other surfaces on this machine are shown.

УДК 631.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЗА СЧЕТ ИХ КЛАССИФИКАЦИИ

канд. техн. наук, доц. А.П. КАСТРЮК; канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН;
канд. техн. наук Т.В. ВИГЕРИНА
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается вопрос о необходимости классификации деталей ремонтного фонда, использование которой значительно сократит объем технологической и организационной подготовки. При определении маршрутов восстановления деталей используется не несколько маршрутов для устранения каждого из дефектов, а создаются типовые маршрутные технологии для групп деталей. Для классификации деталей используют различные признаки, которыми могут быть: геометрическая форма детали и ее отдельных элементов, масса, размеры, функции, выполняемые деталью, материал, показатели точности и др. Приведена классификация основных деталей двигателя внутреннего сгорания, составлена таблица основных элементов деталей, видов нагрузок и повреждений, восстанавливаемых параметров и свойств.

Введение. Существующий парк машин формирует потребность в поддержании их исправного состояния. В настоящее время в народном хозяйстве Республики Беларусь капитально отремонтированных машин находится больше, чем новых, поэтому актуальным является совершенствование процессов и средств ремонта, которые обеспечивают повышение работоспособности машин и двигателей со снижением расхода энергетических ресурсов. Большие объемы ремонтного фонда деталей и значительная его доля, требующая восстановления, определяют целесообразность организации производства по восстановлению деталей.

Изучение деталей ремонтного фонда требует их классификации. Разделение восстанавливаемых деталей на группы с одинаковыми признаками (классификация) сокращает объем технологической и организационной подготовки производства путем приведения его к типовому или модульному видам как наиболее прогрессивным в техническом и экономическом отношениях. В ремонтном производстве применяют классификации деталей К.Т. Кошкина и Г.А. Малышева. Известно, что детали, требующие восстановления, имеют, как правило, не один дефект, а несколько. Их количество зависит от конструкции детали. Чем сложнее деталь, тем количество возможных дефектов на ней будет больше. При организации восстановления деталей ранее применялась так называемая подефектная технология, при которой технологические процессы разрабатывались на устранение каждого дефекта в отдельности, приходилось разрабатывать большое количество технологических процессов для восстановления одной и той же детали. Подефектная технология значительно усложняла организацию восстановления деталей, так как при устранении на детали нескольких дефектов необходимо было пользоваться несколькими технологическими процессами, что приводило к снижению качества ремонта.

Наиболее рациональной формой организации восстановления деталей является маршрутная технология. При определении маршрутов восстановления деталей необходимо руководствоваться следующими основными принципами, сформулированными профессором К.Т. Кошкиным [1]:

1) *сочетание дефектов в каждом маршруте должно быть присуще данной детали*, что устанавливается путем проведения специальных исследований, при которых определяют сочетания дефектов на большом количестве деталей одного наименования, выявляют повторяющиеся сочетания и частоту их наблюдения;

2) *минимальное количество маршрутов восстановления каждой детали*. Большое количество маршрутов усложняет организацию производства, увеличивает объем технологической документации, требует расширения складских помещений, затрудняет планирование и учет работы производственных участков. Поэтому количество маршрутов по каждой детали должно быть в пределах двух-трех, а для сложных деталей не более пяти. Уменьшить количество маршрутов можно за счет объединения сочетаний дефектов, отличающихся между собой незначительными по трудоемкости устранения дефектами, в одно. Значительного сокращения количества маршрутов можно достигнуть и за счет включения в них дефектов, расположенных на взаимосвязанных поверхностях детали. Количество маршрутов можно уменьшить также путем исключения маршрутов с редко встречающимися сочетаниями дефектов;

3) *при формировании маршрутов необходимо учитывать применяемый способ восстановления*. Если у чашки дифференциала изношено отверстие под шейку шестерни полуоси и принят способ восстановления гильзованием, при котором одновременно устраняют два дефекта (износ отверстия и износ торцовой поверхности), то в сочетание дефектов, подлежащих устранению, необходимо включить оба дефекта вне зависимости от того, имеется один из них или есть оба одновременно;

4) *экономическая целесообразность при восстановлении детали по выбранному маршруту*. Если затраты на восстановление детали, отнесенные к единице её наработки, будут меньше соответствующих удельных затрат на изготовление детали, то её восстановление по данному маршруту считается целесообразным.

При классификации деталей используют различные признаки [2; 3]. Наиболее значимые из них: геометрическая форма детали и ее отдельных элементов; масса; размеры; функции, выполняемые деталью; материал; показатели точности и др. В качестве классификационных признаков чаще выбирают виды и отношения рабочих поверхностей деталей, на которых создают припуски для последующей обработки резанием с сопутствующей термической обработкой. Рассматриваемое множество деталей представляют матрицей следующего вида:

$$\left\|C_{ij}\right\| = \begin{vmatrix} F_1F_2 & ... & F_n & \\ C_{11}C_{11} & ... & C_{1n} & a_1 \\ C_{21}C_{22} & ... & C_{2n} & a_2 \\ ..... & ... & .... & ... \\ C_{m1}C_{m1} & ... & C_{mn} & a_m \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $F = (F_1, F_2,\ldots, F_n)$ – множество классификационных признаков деталей; $A = (a_1, a_2, ..., a_m)$ – множество деталей; $i = 1, \ldots, n$; $j = 1, \ldots, m$; C_{ij} – переменная, принимающая значение 1, если деталь имеет признак F_i, или 0, если такой признак отсутствует.

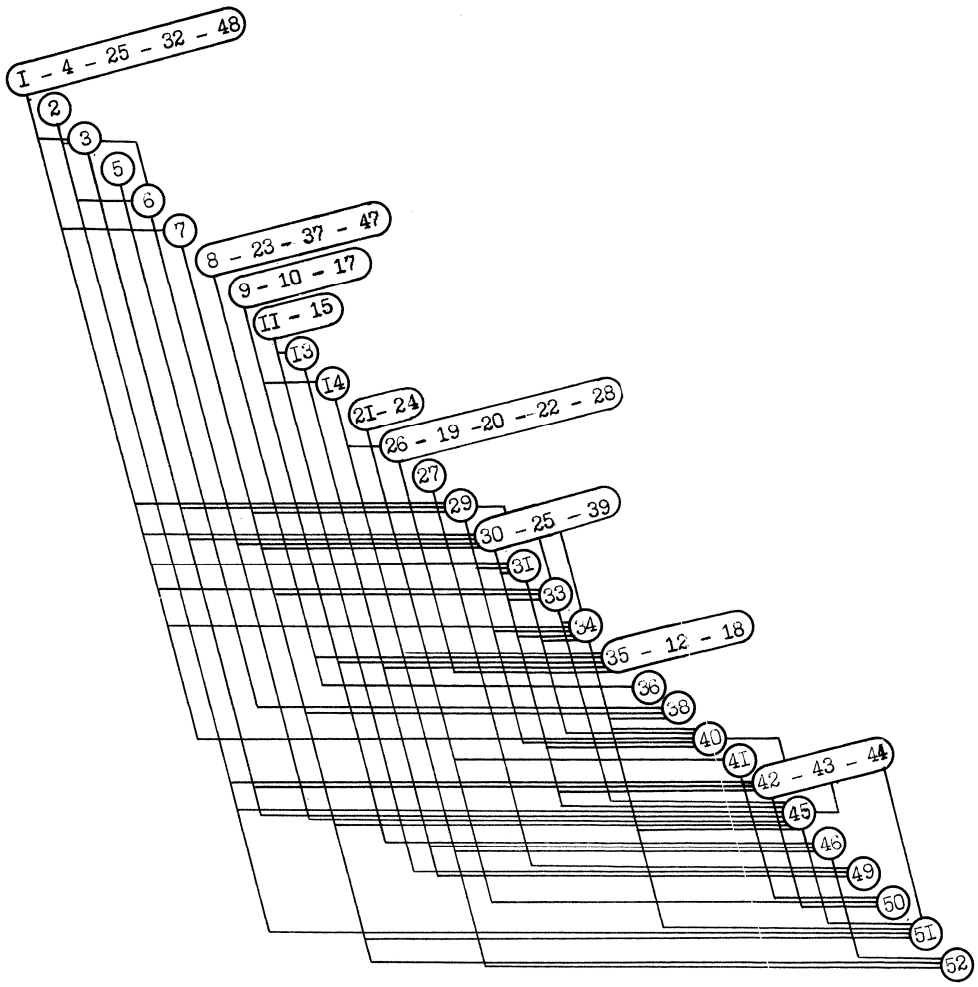
Объективная классификация деталей требует применения количественного критерия, в качестве которого принимают коэффициент подобия деталей K_n. Этот коэффициент определяют как отношение числа совпадающих признаков n_1 к общему числу признаков деталей этой пары n_2:

$$K_n = n_1 / n_2. \quad (2)$$

Вначале находят группы деталей с полным совпадением классификационных признаков, для которых $K_n = 1$. Затем эти группы дополняют деталями, совпадающими с каждой из ранее введенных групп не менее как половиной признаков. Если отдельную деталь можно отнести к нескольким группам, предпочтение отдают той, с которой данная деталь имеет наибольшее среднее арифметическое коэффициентов подобия. Из оставшихся деталей образуют новые группы с наиболее полным совпадением классификационных признаков.

Работы по классификации деталей в каждом случае выполняют для конкретных ремонтных предприятий. Основные детали двигателя внутреннего сгорания могут быть сведены в следующие группы, проиллюстрированные рисунком: 2 – 3 – 6 – 51; 1 – 4 – 25 – 29 – 30 – 31 – 32 – 33 – 34 – 39 – 40 – 42 – 43 – 44 – 45 – 48; 9 – 10 – 17; 8 – 23 – 36 – 37 – 47; 5 – 27 – 38; 11 – 14 – 15 – 46 – 49; 7 – 21 – 24 – 41 – 50 – 52; 19 – 20 – 22; 26 – 28; 12 – 18 – 35. Эти группы деталей определяются совокупностями признаков [4]:

- детали с цилиндрическими внутренними единичными и групповыми поверхностями с параллельными и перпендикулярными осями, плоскими торцами и стыками, внутренними резьбами: блок цилиндров, крышка распределительных шестерен, головка цилиндров, корпус бензонасоса, картер сцепления;
- детали с цилиндрическими внутренними единичными и групповыми поверхностями с параллельными осями, стыками, внутренними резьбами: труба впускная, крышка коробки толкателей, патрубок выпускной трубы, коллектор выпускной, кожух сцепления, картер масляный, головка бензонасоса, крышка коромысел, корпус масляного насоса, корпус водяного насоса, крышка масляного насоса, корпус карбюратора, крышка карбюратора, смесительная камера;
- детали – тела вращения с наружными соосными и несоосными цилиндрическими и профильными поверхностями, торцами, стыками и внутренними резьбами: вал коленчатый, вал распределительный, поршень;
- детали – тела вращения с наружными цилиндрическими поверхностями: поршневой палец, ось коромысел, валик водяного насоса, валик масляного насоса, плунжер масляного насоса;
- детали – тела вращения с наружными и внутренними соосными цилиндрическими поверхностями: гильза цилиндра, втулка клапана, корпус привода распределителя;
- детали – тела вращения с наружными и внутренними соосными цилиндрическими поверхностями, группами отверстий: шкив, маховик, ступица коленчатого вала;
- детали с ориентированными отверстиями, выполненными во втулках, торцами и стыками: шатун, стойка коромысел, коромысло;
- детали с цилиндрическими и сферическими поверхностями: толкатель, штанга;
- детали с цилиндрическими и коническими поверхностями: клапан, седло клапана;
- зубчатые колеса: шестерни коленчатого и распределительного валов, шестерни масляного насоса;
- остальные детали: шайба упорная, храповик и др.



Граф отношений деталей ремонтируемого двигателя (K_n > 0,5):
1 – кронштейн крепления двигателя; 2 – блок цилиндров; 3 – крышка распределительных шестерен;
4 – крышка коробки толкателей; 5 – гильза цилиндра; 6 – головка цилиндров; 7 – шатун; 8 – поршневой палец;
9 – поршень; 10 – вал коленчатый; 11 – маховик; 12 – шестерня; 13 – шайба упорная; 14 – ступица; 15 – шкив;
16 – храповик; 17 – вал распределительный; 18 – шестерня; 19 – толкатель; 20 – штанга; 21 – коромысло;
22 – винт коромысла; 23 – ось коромысел; 24 – стойка; 25 – крышка коромысел; 26 – клапан; 27 – втулка клапана;
28 – седло клапана; 29 – коллектор выпускной; 30 – труба впускная; 31 – патрубок выпускной водяной рубашки;
32 – картер масляный; 33, 34, 35, 36 и 37 – корпус, крышка, шестерня, вал и плунжер масляного насоса соответственно;
38 – корпус привода распределителя; 39, 40 и 41 – корпус, головка и рычаг бензонасоса соответственно;
42, 43 и 44 –корпус, крышка поплавковой камеры и смесительная камера карбюратора соответственно;
45, 46 и 47 – крышка, крыльчатка и валик водяного насоса соответственно;
48, 49, 50, 51 и 52 – кожух, диск нажимной, рычаг оттяжной, картер и вилка сцепления соответственно

Наибольшее количество поверхностей деталей двигателей внутреннего сгорания приходится на внутренние цилиндры (29,7 %). Наружные цилиндрические поверхности составляют 14,1 %, поверхности сложного профиля (конические и сферические) – 4,9 %. На резьбы внутренние и наружные приходится соответственно 11,6 и 1,7 % поверхностей. Внутренние полости трех процентов деталей должны быть герметичными. На трущиеся торцы приходится 14,9 %, на стыки – 18,2 % поверхностей.

Наибольшее влияние на надежность отремонтированных агрегатов оказывает качество восстановления групп деталей:

- *неподвижных*: станин, корпусов, картеров, гильз;
- *вращающихся*: валов, дисков, зубчатых колес, кулачков, эксцентриков;
- *движущихся* поступательно: поршней, штоков, ползунов, клапанов;
- *участвующих в преобразовании движений*: рычагов, шатунов, штанг.

Около 90 % трудоемкости и себестоимости работ приходится на восстановление приведенных групп деталей. Технологические процессы их восстановления могут быть организованы как типовые. Многообразие видов восстанавливаемых объектов сокращается при переходе от деталей к их элементам и классификации последних. Элементам деталей соответствуют характерные повреждения и совокупность восстанавливаемых свойств (таблица).

Основные элементы деталей, виды нагрузок и повреждений, восстанавливаемые параметры и свойства

Элементы (конструкторские модули)		Разрушающие факторы	Повреждения	Показатели	
наименование	*детали*			*геометрические параметры*	*эксплуатационные свойства*
стенки	корпусные детали	удары, гидростатическое давление, вибрации	пробоины, трещины	–	статическая прочность, герметичность
стыки плоские	корпусные детали, гильзы, маховики, шкивы	усилие смыкания деталей	деформации	плоскостность, расположение	–
поверхности цилиндрические внутренние трущиеся	корпусные детали, подшипники скольжения	силы трения, химически активная среда	деформации, износ	диаметр, цилиндричность, расположение, шероховатость	износостойкость
направляющие плоские	корпусные детали	силы трения, химически активная среда	деформации, износ	диаметр, плоскостность, расположение, шероховатость	износостойкость
поверхности отверстий под подшипники	корпусные детали, шатуны, коромысла	радиальные силы, переменные по величине и направлению	деформации, износ	диаметр, цилиндричность, расположение, шероховатость	износостойкость
поверхности отверстий под базирующие штифты	корпусные детали, валы	–	деформации	диаметр, цилиндричность, расположение, шероховатость	–
шейки трущиеся вращающиеся	валы, оси, пальцы	моменты и поперечные силы, переменные по величине и направлению	износ, усталостные трещины	диаметр, цилиндричность, расположение, шероховатость	износостойкость, усталостная прочность
щеки, цилиндрические элементы	валы	крутящие и изгибающие моменты	усталостные трещины	–	статическая и усталостная прочность
кулачки, эксцентрики	валы	радиальные силы	износ	размеры, форма, шероховатость	износостойкость
торцы трущиеся плоские	валы	осевые силы	износ	размеры, плоскостность, шероховатость	износостойкость
фланцы с центрирующими поясками	валы	радиальные силы	деформации	размеры, цилиндричность, расположение, шероховатость	–
отверстия центровые	валы, оси	–	–	расположение	–
отверстия центральные	зубчатые колеса, звездочки, шкивы, диски, маховики	поперечные силы, переменные по величине и направлению	деформации, износ	диаметр, цилиндричность, расположение, шероховатость	износостойкость
торцы трущиеся сферические	толкатели	осевые силы	износ	размеры, форма, шероховатость	износостойкость
резьбы внутренние	корпусные детали, валы	усилия затяжки, вибрации	деформации, износ, разрушение резьбы	размеры, форма, шероховатость	износостойкость
резьбы наружные	валы, оси	усилия затяжки, вибрации	деформации, износ, разрушение резьбы	размеры, форма, шероховатость	износостойкость

Окончание таблицы

Элементы (конструкторские модули)		Разрушающие факторы	Повреждения	Показатели	
наименование	*детали*			*геометрические параметры*	*эксплуатационные свойства*
шлицы наружные	валы			размеры, форма, шероховатость	износостойкость
шлицы внутренние	зубчатые колеса, шкивы	силы, нормальные к поверхностям	износ	размеры, форма, шероховатость	износостойкость
шпоночные пазы	зубчатые колеса, шкивы	силы, нормальные к поверхностям	износ	размеры, форма, шероховатость	износостойкость
наружные цилиндрические поверхности, движущиеся поступательно	поршни, плунжеры, штоки	силы трения, химически активная среда	износ	размеры, цилиндричность, расположение, шероховатость	износостойкость
внутренние цилиндрические поверхности, движущиеся поступательно	гильзы цилиндров	силы трения, химически активная среда	деформации, износ, трещины	размеры, цилиндричность, расположение, шероховатость	износостойкость
центрирующие пояски	гильзы цилиндров	радиальные силы	деформации	размеры, форма, шероховатость	–
канавки под клиновые ремни	шкивы	силы трения	износ, деформации	размеры, цилиндричность, расположение, шероховатость	износостойкость
тела шатунов	шатуны	продольные силы	деформации, трещины	–	усталостная прочность
плечи рычагов	рычаги	поперечные силы, моменты	деформации, трещины	–	усталостная прочность
бойки коромысел	коромысла	осевые силы, переменные по величине	износ, наклеп	размеры, форма, шероховатость	износостойкость
конические тарелки	клапаны	осевые силы, переменные по величине	износ, наклеп	размеры, форма, шероховатость	износостойкость
зубья эвольвентные и циклоидальные	зубчатые колеса	контактные нагрузки	питтинговый износ, разрушение	размеры, форма, шероховатость	износостойкость, усталостная прочность
упругие элементы	пружины, рессоры, торсионы	вибрационные нагрузки	изменение размеров, усталостные трещины, потеря жесткости	размеры	усталостная прочность, жесткость

Выводы

Организация процессов восстановления деталей, основанная на их классификации, уменьшает трудоемкость технологической подготовки восстановительного производства.

Благодаря классификации деталей снижается количество технологических документов и исполнительных агрегатов технологических машин.

Из технологических модулей восстановления одинаковых элементов разнотипных деталей составляют процессы восстановления конкретных деталей.

Ограниченное количество модульных операций восстановления элементов деталей позволяет формировать неограниченное количество технологических процессов восстановления различных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология авторемонтного производства: учебник / под общ. ред. К.Т. Кошкина. – М.: Транспорт, 1969. – 568 с.
2. Иванов, В.П. Ремонт машин. Технология, оборудование, организация: учебник / В.П. Иванов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2006. – 468 с.
3. Иванов, В.П. Ремонт автомобилей / В.П. Иванов, В.К. Ярошевич, А.С. Савич. – Минск: Выш. школа, 2009. – 383 с.
4. Кастрюк, А.П. Ресурсосбережение и качество ремонта агрегатов машин с восстановлением их деталей / А.П. Кастрюк, Т.В. Вигерина. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – 200 с.

Поступила 06.07.2015

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY TRAINING OF RECONSTRUCTION OF DETAILS DUE TO THEIR CLASSIFICATION

A. KASTRUK, A. DUDAN, T. VIGERINA

The question of the need to classify of the details of the repair fund is considered. The use of this classification will significantly reduce the amount of technological and organizational training. In determining the route of reconstruction of the details is not used several routes to eliminate each of the defects, but typical routing technology for groups of parts are made. For the classification of details a variety of characteristics are used such as a geometric shape of the detail and its individual elements, weight, dimensions, functions performed, precision factor and others. The classification of the main parts of internal combustion engine is given, a table of the main elements of detail, types of loads and damages, re-established parameters and properties is made.

УДК 621.833; 539.3

ПРОДОЛЬНАЯ МОДИФИКАЦИЯ И СЕЛЕКТИВНАЯ СБОРКА САТЕЛЛИТОВ ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ СХЕМЫ 2К-Н

д-р техн. наук В.Е. АНТОНЮК
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);
д-р техн. наук, проф. Э.М. ДЕЧКО
(Белорусский национальный технический университет, Минск);
В.Н. РУСЕЦКИЙ
(Минский автомобильный завод)

Исследуется продольная модификация и селективная сборка сателлитов планетарных передач схемы 2К-Н. Рассмотрен конкретный пример, иллюстрирующий возможность использования снижения контактных напряжений для изготовления таких сателлитов. Приведены рекомендации по селективной сборке комплектов сателлитов планетарных передач схемы 2К-Н с использованием устройств двухпрофильного контроля с числовым программным управлением. Показано, что достигаемый результат по уменьшению максимальных контактных и изгибных напряжений за счет селективного подбора может быть использован как для повышения ресурса планетарной передачи, так и для снижения затрат при её производстве.

Использование для контроля зубчатых колес современных приборов двухпрофильного контроля с записывающими устройствами позволяют с минимальными затратами и высокой точностью без участия квалифицированного оператора обеспечить производственный контроль точности зубчатых колес на различных стадиях изготовления, значительно повысить точность и объективность контроля, расширить информационную базу для оценки качества зубчатых колес [1].

Оснащение приборов двухпрофильного контроля дополнительными программами позволяет производить статистическую обработку результатов измерения зубчатых колес и целенаправленный их отбор с требуемыми свойствами.

Требования к параметрам сателлитов планетарных передач. Преимущества планетарных передач реализуются в случае равномерности распределения нагрузки между сателлитами, и для этого широко используется плавающее звено, которое в большинстве случаев приводит к кромочному контакту и повышению контактных и изгибных напряжений. Для исключения кромочного контакта применяется продольная модификация зубьев сателлитов [2; 3]. Использование продольной модификации имеет ограничения при использовании 4-х и 5-ти сателлитных передач. На основании этих требований проведено исследование возможностей использования продольной модификации совместно с селективным подбором сателлитов по параметрам двухпрофильного контроля.

Параметры продольной модификации. Продольная модификация зуба, с одной стороны, позволяет избегать кромочного контакта при перекосе осей зубчатых колес, но с другой – приводит к уменьшению площади пятна контакта и повышению контактных напряжений. В обычных зубчатых передачах перекосы осей являются результатом погрешностей изготовления, а также деформациями конструкции всего редукторного узла. В планетарных передачах перекос осей – результат конструктивных параметров.

На рисунке 1 представлена схема смещения солнечной шестерни планетарной передачи 2К-Н из-за различия в толщине зуба сателлитов. По причине смещения солнечной шестерни происходит перекос ее оси на угол γ_1, в результате чего солнечная шестерня по отношению к сателлитам будет находиться в положении, показанном на рисунке 2.

В работах [2; 3] приведены расчетные формулы для определения углов перекоса в зависимости от конструктивных параметров сателлитов и плавающего звена планетарной передачи схемы 2К-Н. Угол перекоса солнечной шестерни составит

$$tg\gamma_1 = \frac{\Delta a_\omega}{L}, \qquad (1)$$

где $\Delta a_\omega = a_\omega - a_{\omega_{min}}$ – наибольшее смещение оси солнечной шестерни от номинального положения в плоскости расположения оси сателлита и солнечной шестерни, равное разности номинального межосевого расстояния a_ω и межосевого расстояния при наибольшем сближении сателлита и солнечной шестерни $a_{\omega_{min}}$; L – расстояние от точки поворота оси «плавающей» солнечной шестерни до точки локализации пятна контакта.

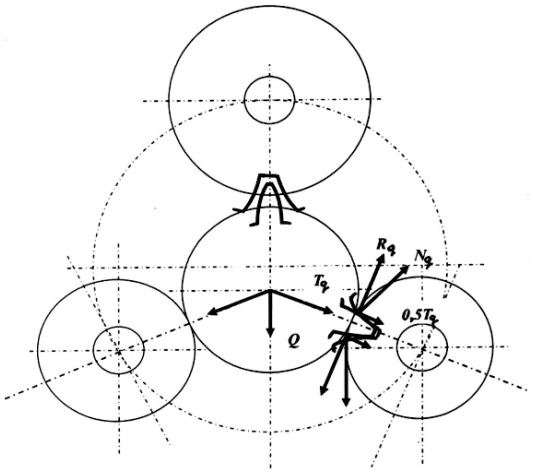


Рис. 1. Смещения солнечной шестерни из-за различия в толщине зуба сателлитов

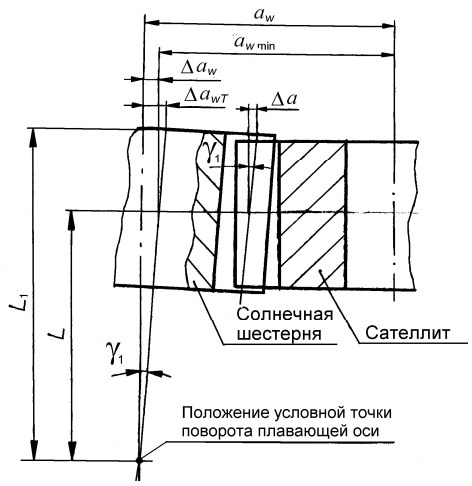


Рис. 2. Перекос зуба солнечной шестерни из-за различия в толщине зуба сателлитов

Значение межосевого расстояния при наибольшем сближении сателлита и солнечной шестерни $a_{\omega_{\min}}$ связано зависимостью с толщиной зуба сателлита:

$$a_{\omega_{\min}} = \frac{m\left(z_1 + z_2\right)\cdot\cos\alpha}{2\cdot\cos\alpha_\omega}. \qquad (2)$$

Здесь $$inv\alpha_\omega = \frac{S_{n1\min} + S_{n2\min} - \pi m}{m\left(z_1 + z_2\right)} + inv\alpha,$$

где $S_{n1\min}$ – минимальная толщина зуба по дуге делительной окружности солнечной шестерни; $S_{n2\min}$ – минимальная толщина зуба по дуге делительной окружности сателлита.

Таким образом, для уменьшения угла перекоса солнечной шестерни из-за различия в толщине зуба сателлитов необходим селективный подбор их комплектов, для реализации которого наиболее эффективным вариантом может быть использование контроля сателлитов по колебанию измерительного межосевого расстояния в двухпрофильном зацеплении с измерительным колесом на межцентромерах с ЧПУ и записывающим устройством.

На рисунке 3 представлена уточненная схема измерительного межосевого расстояния при двухпрофильном контроле [4].

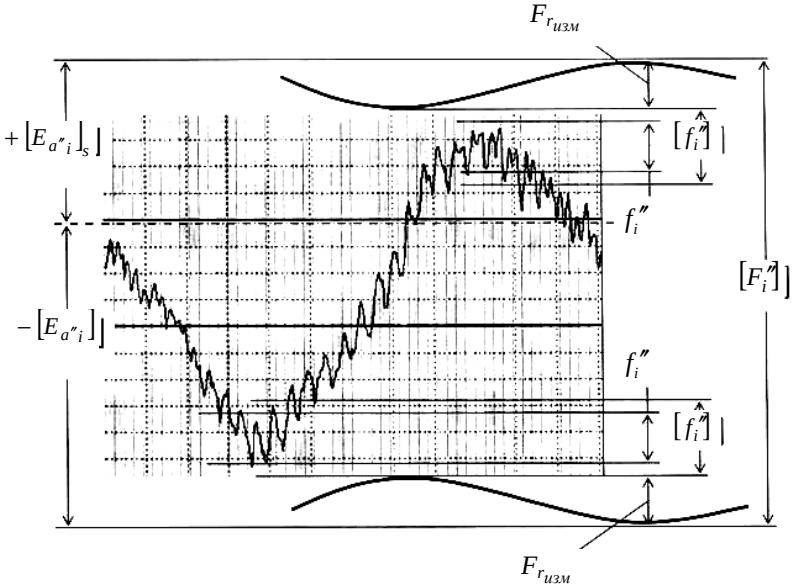


Рис. 3. Схема измерительного межосевого расстояния

С учетом уточненной схемы измерительного межосевого расстояния (ИМР) определяется количество групп сателлитов для селективного подбора и параметры ИМР для каждой группы сателлитов.

Определяем суммарный интервал ИМР для всех сателлитов:

$$E=\left[E_{a''s}\right]+\left[E_{a''i}\right], \tag{3}$$

а также количество групп сателлитов для селективного подбора по колебанию ИМР за оборот с округлением до меньшего целого значения

$$n=\frac{E}{F_i''}, \tag{4}$$

где F_i'' – допуск на колебание ИМР за оборот.

Верхнее и нижнее предельные отклонения ИМР для каждой из групп определяются исходя из сохранности соотношения интервала ИМР и колебания ИМР за оборот колеса.

Для каждой группы интервал ИМР определяется как

$$E_n=\frac{E}{F_i''}\cdot\left[F''\right], \tag{5}$$

и в зависимости от количества групп происходит распределение суммарного интервала E.

В таблице приведены значения параметров ИМР для селективного подбора из 2-х групп.

Параметры ИМР для селективного подбора сателлитов

Группы сателлитов	Параметр ИМР			
	$\left[F_i''\right]_n$	$\left[f_i''\right]_n$	$\left[E_{a''s}\right]_n$	$\left[-E_{a''s}\right]_n$
2-1	$\left[F''\right]$	$\left[f''\right]$	$\left[E_{a''s}\right]$	$\left[E_{a''s}\right]-E_n$
2-2			$E_n+\left[-E_{a''i}\right]_n$	$\left[-E_{a''i}\right]_n$

Для оценки влияния селективного подбора сателлитов по толщине зуба за счет селективного подбора по верхнему и нижнему предельным отклонениям ИМР на работоспособность планетарной передачи можно воспользоваться расчетом продольной модификации [3], позволяющим определять углы перекоса солнечной шестерни относительно сателлитов при изменяющейся толщине зуба.

При использовании предлагаемого варианта селективного подбора из двух групп перекос в зацеплении «солнечная шестерня – сателлит» уменьшается на 0,016 мм на длине зуба. По стандартному расчету контактной и изгибной прочности зацепления «солнечная шестерня – сателлит» будет обеспечено снижение контактных напряжений на 9 %, изгибных – на 4 % [4].

Достигаемый результат по уменьшению максимальных контактных и изгибных напряжений за счет селективного подбора может быть использован как для повышения ресурса передачи, так и для снижения затрат при производстве планетарной передачи.

Рассмотрим на конкретном *примере* возможность использования снижения контактных напряжений на 9 % для изготовления сателлитов планетарных передач. Марки стали 20Х2Н4А и 20ХН3А широко используются для изготовления сателлитов планетарных передач. Стоимость одной тонны стали 20Х2Н4А составляет 65 000 российских рублей, стали 20ХН3А – 52 300 российских рублей.

Допускаемые контактные напряжения для зубчатых колес из стали 20Х2Н4А – 936,4 МПа, из стали 20ХН3А – 922,3 МПа.

В результате несложных расчетов можно определить, что для замены стали 20Х2Н4А на 20ХН3А требуется снизить нагрузочные контактные напряжения на 1,5 % и получить выигрыш снижении цены на 24 %.

Таким образом, за счет селективной сборки можно снизить нагрузочные контактные напряжения на 9 % при требуемых 1,5 % и получить снижение цены используемой стали на 24 % без снижения ресурса и надежности планетарной передачи. При массе заготовки на один сателлит около 8 кг и их годовом выпуске 40 000 штук годовая потребность составляет 320 тонн, и при экономии на цене по 12700 российских рублей на одной тонне получаем экономию 4 064 000 российских рублей, или около 80 тысяч долларов США.

Заключение. Приведены расчетные зависимости и рекомендации по селективной сборке комплектов сателлитов планетарных передач схемы 2К-Н с использованием устройств двухпрофильного контроля с ЧПУ. Селективная сборка комплектов сателлитов планетарных передач схемы 2К-Н проводится по толщине зуба за счет подбора комплектов сателлитов по верхнему и нижнему предельным отклонениям ИМР, в результате достигается повышение ресурса передачи или снижение затрат при производстве планетарной передачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонюк, В.Е. Возможности современных средств двухпрофильного контроля зубчатых колес / В.Е. Антонюк, В.Н. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 101–105.
2. Антонюк, В.Е. Возможности модификации профиля при изготовлении зубчатых колес мобильных машин / В.Е. Антонюк, В.Н. Русецкий // Материалы, технология и оборудование в производстве, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф.: в 2-х т. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – Т. II. – С. 141–144.
3. Антонюк, В.Е. Программный расчет продольной модификации цилиндрических зубчатых колес / В.Е. Антонюк [и др.] // Материалы, технология и оборудование в производстве, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С. 137–141.
4. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. – ГОСТ 21354-87. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 93с.

Поступила 19.06.2015

LENGTHWISE EASING RELIEF AND SELECTIVE ASSEMBLY OF THE SATELLITES SETS OF PLANETARY GEARS SCHEME 2K-H

V. ANTONJUK, E. DECHKO, V. RUSETSKY

Lengthwise easing relief and selective assembly of the satellites sets of planetary gears scheme 2k-h is studied. A specific example illustrating the use of reducing contact stress for the manufacture of satellites is considered. The recommendations on the selective assembly of the satellites sets of planetary gears schemes H-2K with using of the devices of two-profile control with numerical control are given. It is shown that the achieved results on reduction of maximal contact and bending stresses due to selective recruitment can be used as a resource to improve the planetary gear and to reduce over-expenditure during its manufacture.

УДК 621.65.01

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УГЛА НАКЛОНА ЛОПАСТЕЙ

канд. техн. наук, доц. В.Н. ПАВЛЕЧКО; канд. техн. наук, доц. С.К. ПРОТАСОВ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Рассматриваются зависимости для расчета динамического и статического давлений, создаваемых лопастями рабочего колеса радиального нагнетателя, статического давления, создаваемого центробежной силой, а также потерь давления для разгона среды до скорости, с которой она выходит из межлопастного пространства, при изменении угла наклона лопастей по радиусу колеса. Приведены графические зависимости указанных давлений от угла наклона лопастей. Установлено, что при угле наклона лопастей на входе в колесо до 40^o и на выходе из него более 150^o существенного приращения динамического давления, создаваемого лопастями, не возникает. Максимальные величины динамического и статического давлений радиального нагнетателя могут быть получены при углах наклона лопастей на выходе их колеса, больших 90^o.

Введение. В соответствии со струйной теорией абсолютная скорость среды (c) является геометрической суммой окружной скорости колеса (u) и относительной скорости среды (w) (рис. 1). Окружная и угловая скорости колеса и среды принимаются равными [1; 2]. В отличие от струйной теории, в работах [3–5] предложено рассматривать движение среды под действием лопастей колеса и центробежной силы (рис. 2).

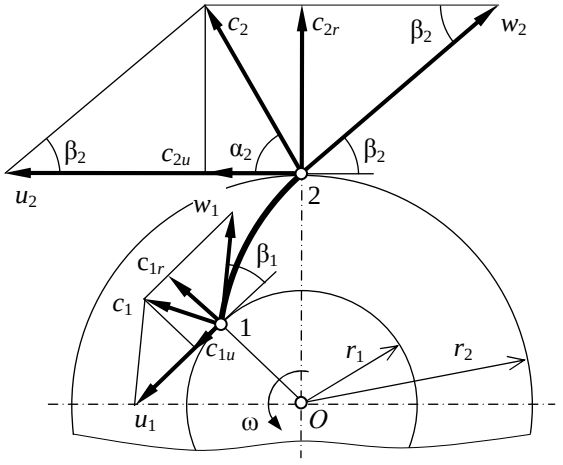


Рис. 1. Направления скоростей в рабочем колесе нагнетателя для лопастей, отогнутых назад

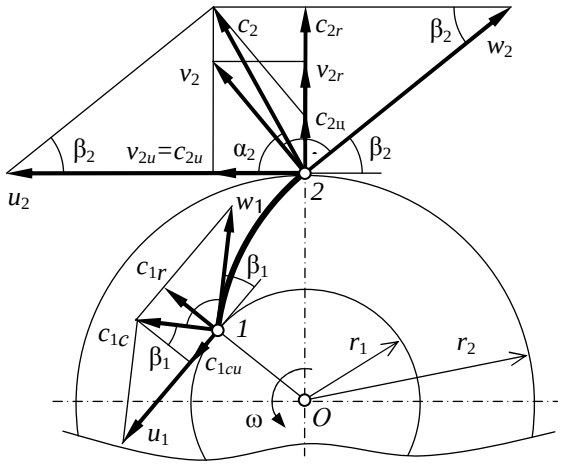


Рис. 2. Предложенные направления скоростей в рабочем колесе нагнетателя

Абсолютная скорость среды на выходе из рабочего колеса нагнетателя складывается из скорости движения среды v_2 под действием лопастей колеса в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти:

$$v_2 = u_2 \frac{\sin\beta_2}{1+\sin\beta_2 \cos\beta_2}\ , \qquad (1)$$

и скорости среды $c_{2ц}$ под действием центробежной силы в радиальном направлении:

$$c_{2ц} = u_2 \frac{\sin^2\beta_2}{1+\sin\beta_2 \cos\beta_2}. \qquad (2)$$

Скорость движения среды v_2 под действием лопастей колеса разделена на две составляющие:

- в направлении окружной скорости

$$v_{2u} = u_2 \frac{\sin^2\beta_2}{1+\sin\beta_2 \cos\beta_2}; \qquad (3)$$

- в радиальном направлении

$$v_{2r} = u_2 \frac{\sin\beta \cos\beta}{1+\sin\beta_2 \cos\beta_2}. \qquad (4)$$

При движении среды в тангенциальном направлении со скоростью v_{2u} создается динамическое давление радиального нагнетателя, определяемое по следующей формуле:

$$P_u = \rho u_2^2 \frac{\sin^2\beta_2}{1+\sin\beta_2 \cos\beta_2}, \qquad (5)$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3.

При движении среды в радиальном направлении со скоростью v_{2r} создается часть статического давления радиального нагнетателя, определяемого как

$$P_r = \rho u_2^2 \frac{\cos^2 \beta_2}{1+\sin\beta_2 \cos\beta_2}, \tag{6}$$

а со скоростью $c_{2ц}$ – вторая часть статического давления, определяемого зависимостью

$$P_ц = \frac{\rho u_2^2}{2}\left(\frac{\sin^2 \beta_2}{1+\sin\beta_2 \cdot \cos\beta_2}\right)^2. \tag{7}$$

Потери давления, необходимого для разгона среды до скорости, с которой она выходит из межлопастного пространства, составляют

$$P_{ск} = \frac{\rho u_2^2}{2}\left(\frac{\sin^2 \beta_2 + \sin\beta_2 \cdot \cos\beta_2}{1+\sin\beta_2 \cdot \cos\beta_2}\right)^2. \tag{8}$$

Общее давление радиального нагнетателя определяется по формуле

$$P_{общ} = P_u \pm P_r + P_ц - P_{ск}, \tag{9}$$

в которой положительное значение P_r принимается при $\beta < 90°$, а отрицательное – при $\beta > 90°$.

Приведенные формулы (1)–(9) справедливы при постоянстве угла наклона лопастей по радиусу колеса и отсутствии закручивания среды при ее входе в рабочее колесо.

Основная часть. Найдем зависимости для определения давления, создаваемого радиальным нагнетателем, при изменяющемся угле наклона лопастей β по радиусу колеса. Для этого проинтегрируем преобразованные зависимости (5)–(8):

$$\frac{P_u}{\rho u_2^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\sin^2 \beta\, d\beta}{1+\sin\beta\cdot\cos\beta}; \tag{10}$$

$$\frac{P_r}{\rho u_2^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\cos^2 \beta\, d\beta}{1+\sin\beta\cdot\cos\beta}; \tag{11}$$

$$\frac{P_ц}{\rho u_2^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1}{2}\left(\frac{\sin^2 \beta}{1+\sin\beta\cdot\cos\beta}\right)^2 d\beta; \tag{12}$$

$$\frac{P_{ск}}{\rho u_2^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1}{2}\left(\frac{\sin^2 \beta + \sin\beta\cdot\cos\beta}{1+\sin\beta\cdot\cos\beta}\right)^2 d\beta. \tag{13}$$

Для решения поставленной задачи преобразуем формулы (10)–(13) с учетом следующих выражений:

$$\sin^2 \beta = \frac{1-\cos 2\beta}{2}; \tag{14}$$

$$\sin\beta\cdot\cos\beta = \frac{\sin 2\beta}{2}; \tag{15}$$

$$\cos^2 \beta = \frac{1+\cos 2\beta}{2}. \tag{16}$$

$$\frac{P_u}{\rho u_2^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1-\cos 2\beta}{2+\sin 2\beta} d\beta; \tag{17}$$

$$\frac{P_r}{\rho u_2^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1+\cos 2\beta}{2+\sin 2\beta} d\beta; \tag{18}$$

$$\frac{P_{\text{ц}}}{\rho u_2^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1}{2}\left(\frac{1-\cos 2\beta}{2+\sin 2\beta}\right)^2 d\beta . \tag{19}$$

$$\frac{P_{\text{ск}}}{\rho u_2^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1}{2}\left(\frac{1+\sin 2\beta-\cos 2\beta}{2+\sin 2\beta}\right)^2 d\beta . \tag{20}$$

Интегралы (17) и (18) рационализируются подстановкой [6]

$$\operatorname{tg}\beta = z, \tag{21}$$

откуда

$$\sin 2\beta = \frac{2z}{1+z^2}; \quad \cos 2\beta = \frac{1-z^2}{1+z^2}; \quad d\beta = \frac{dz}{1+z^2}. \tag{22}$$

С учетом формул (22) интегралы (17) и (18) принимают вид:

$$\frac{P_u}{\rho u_2^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1-\cos 2\beta}{2+\sin 2\beta} d\beta = \int_{z_1}^{z_2} \frac{z^2 dz}{\left(1+z+z^2\right)\left(1+z^2\right)}; \tag{23}$$

$$\frac{P_r}{\rho u_2^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1+\cos 2\beta}{2+\sin 2\beta} d\beta = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{\left(1+z+z^2\right)\left(1+z^2\right)}. \tag{24}$$

Разложим подынтегральную дробь правой части уравнения (23) на простейшие:

$$\frac{z^2 dz}{\left(1+z+z^2\right)\left(1+z^2\right)} = \frac{Az+B}{1+z+z^2} + \frac{Cz+D}{1+z^2}. \tag{25}$$

Освобождаясь от знаменателей, получаем

$$z^2 = (Az+B)\left(1+z^2\right) + (Cz+D)\left(1+z+z^2\right) = B+D+z(A+C+D)+z^2(B+C+D)+z^3(A+C).$$

Приравняем коэффициенты при одинаковых степенях z:

$$\left.\begin{aligned} &B+D=0;\\ &A+C+D=0;\\ &B+C+D=1;\\ &A+C=0. \end{aligned}\right\}$$

Решив эту систему уравнений, находим $A = -1$, $B = 0$, $C = 1$, $D = 0$ и получаем разложение дроби (25):

$$\frac{z^2}{\left(1+z+z^2\right)\left(1+z^2\right)} = -\frac{z}{1+z+z^2} + \frac{z}{1+z^2}.$$

Интегрируя почленно, выводим [6]

$$-\int_{z_1}^{z_2} \frac{z\,dz}{1+z+z^2} = \left|\frac{1}{\sqrt{3}}\operatorname{arctg}\frac{2z+1}{\sqrt{3}} - 0{,}5\ln\left(1+z+z^2\right)\right|_{z_1}^{z_2}.$$

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{z\,dz}{1+z^2} = \left|0{,}5\ln\left(1+z^2\right)\right|_{z_1}^{z_2}.$$

Суммированием двух последних зависимостей получаем решение правой части уравнения (23):

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{z^2 dz}{\left(1+z+z^2\right)\left(1+z^2\right)} = \left|\frac{1}{\sqrt{3}}\operatorname{arctg}\frac{2z+1}{\sqrt{3}} - 0{,}5\ln\left(1+z+z^2\right) + 0{,}5\ln\left(1+z^2\right)\right|_{z_1}^{z_2}. \tag{26}$$

Возвращаясь к переменной β, находим зависимость динамического давления радиального нагнетателя в соответствии с уравнением (17):

$$\frac{P_u}{\rho u_2^2} = \left| \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2\operatorname{tg}\beta + 1}{\sqrt{3}} - 0,5 \ln\left(1 + 0,5 \sin 2\beta\right) \right|_{\beta_1}^{\beta_2}. \tag{27}$$

Разложим подынтегральную дробь правой части уравнения (24) на простейшие

$$\frac{1}{\left(1 + z + z^2\right)\left(1 + z^2\right)} = \frac{Az + B}{1 + z + z^2} + \frac{Cz + D}{1 + z^2}. \tag{28}$$

Освобождаясь от знаменателей, получаем

$$z = (Az + B)(1 + z^2) + (Cz + D)(1 + z + z^2) = B + D + z(A + C + D) + z^2(B + C + D) + z^3(A + C).$$

Приравняем коэффициенты при одинаковых степенях z

$$\left.\begin{aligned} &B + D = 1; \\ &A + C + D = 0; \\ &B + C + D = 0; \\ &A + C = 0. \end{aligned}\right\}$$

Решив эту систему, находим $A = 1$, $B = 1$, $C = -1$, $D = 0$ и получаем разложение дроби (28):

$$\frac{1}{\left(1 + z + z^2\right)\left(1 + z^2\right)} = \frac{z}{1 + z + z^2} + \frac{1}{1 + z + z^2} - \frac{z}{1 + z^2}.$$

Интегрируя почленно, находим [6]

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{z\,dz}{1 + z + z^2} = \left| \frac{1}{2} \ln\left(1 + z + z^2\right) \right|_{z_1}^{z_2} - \left| \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2z + 1}{\sqrt{3}} \right|_{z_1}^{z_2}.$$

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{1 + z + z^2} = \left| \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2z + 1}{\sqrt{3}} \right|_{z_1}^{z_2};$$

$$-\int_{z_1}^{z_2} \frac{z\,dz}{1 + z^2} = -0,5 \left| \ln\left(1 + z^2\right) \right|_{z_1}^{z_2}.$$

Суммированием трех последних выражений получаем решение правой части уравнения (24)

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{\left(1 + z + z^2\right)\left(1 + z^2\right)} = \left| \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2z + 1}{\sqrt{3}} + 0,5 \ln \frac{1 + z + z^2}{1 + z^2} \right|_{z_1}^{z_2}. \tag{29}$$

Возвращаясь к углу β, выводим выражение радиального давления, создаваемого лопастями, в соответствии с уравнением (18):

$$\frac{P_r}{\rho u^2} = \left| \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2\operatorname{tg}\beta + 1}{\sqrt{3}} + 0,5 \ln\left(1 + 0,5 \sin 2\beta\right) \right|_{\beta_1}^{\beta_2}. \tag{30}$$

Подставим выражения (22) в формулу (19):

$$\frac{P_{\text{ц}}}{\rho u^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \cos 2\beta}{2 + \sin 2\beta} \right)^2 d\beta = \frac{1}{2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{z^4 dz}{\left(1 + z + z^2\right)^2 \left(1 + z^2\right)}. \tag{31}$$

Разложим подынтегральную дробь правой части выражения (31) на простейшие:

$$\frac{z^4}{\left(1+z+z^2\right)^2\left(1+z^2\right)}=\frac{Az+B}{\left(1+z+z^2\right)^2}+\frac{Cz+D}{1+z+z^2}+\frac{Ez+F}{1+z^2}. \tag{32}$$

Освобождаясь от знаменателей, получаем

$$z^4=(Az+B)\left(1+z^2\right)+(Cz+D)\left(1+z+z^2\right)\left(1+z^2\right)+(Ez+F)\left(1+z+z^2\right)^2=$$

$$=B+D+F+z\left(A+C+D+E+2F\right)+z^2\left(B+C+2D+2E+3F\right)+$$

$$z^3\left(A+2C+D+3E+2F\right)+z^4\left(C+D+2E+F\right)+z^5\left(C+E\right).$$

Приравняем коэффициенты при одинаковых степенях z:

$$\left.\begin{aligned} &B+D+F=0;\\ &A+C+D+E+2F=0;\\ &B+C+2D+2E+3F=0;\\ &C+D+2E+F=1;\\ &C+E=0. \end{aligned}\right\}$$

Решив эту систему, находим $A = 0$, $B = -1$, $C = 0$, $D = 2$, $E = 0$, $F = -1$ и получаем разложение дроби (32):

$$\frac{z^4}{\left(1+z+z^2\right)^2\left(1+z^2\right)}=-\frac{1}{\left(1+z+z^2\right)^2}+\frac{2}{1+z+z^2}-\frac{1}{1+z^2}. \tag{33}$$

Проинтегрируем первую дробь правой части уравнения (33) с учетом подстановки

$$z+0,5=x. \tag{34}$$

$$-\int_{z_1}^{z_2}\frac{dz}{\left(1+z+z^2\right)^2}=-\int_{x_1}^{x_2}\frac{dx}{\left(x^2+k^2\right)^2}=-\frac{1}{2k^2}\left[\left|\frac{x}{x^2+k^2}\right|_{x_1}^{x_2}+\int_{x_1}^{x_2}\frac{dx}{x^2+k^2}\right],$$

где $x = z + 0,5$; $k^2 = 0,75$.

Подставляя значение k и возвращаясь к переменной z, получаем

$$-\int_{z_1}^{z_2}\frac{dz}{\left(1+z+z^2\right)^2}=-\int_{x_1}^{x_2}\frac{dx}{\left(x^2+k^2\right)^2}=-\left|\frac{2}{3}\,\frac{z+0,5}{1+z+z^2}\right|_{z_1}^{z_2}-\left|\frac{4}{3\sqrt{3}}\operatorname{arctg}\frac{2z+1}{\sqrt{3}}\right|_{z_1}^{z_2}. \tag{35}$$

Интегрируя два последних члена правой части уравнения (33), находим [6]

$$\int_{z_1}^{z_2}\frac{2dz}{1+z+z^2}=\left|\frac{4}{\sqrt{3}}\operatorname{arctg}\frac{2z+1}{\sqrt{3}}\right|_{z_1}^{z_2}; \tag{36}$$

$$-\int_{z_1}^{z_2}\frac{dz}{1+z^2}=-\left|\operatorname{arctg} z\right|_{z_1}^{z_2}. \tag{37}$$

Суммированием зависимостей (35)–(37) получаем решение правой части уравнения (31)

$$\int_{z_1}^{z_2}\frac{z^4dz}{\left(1+z+z^2\right)^2\left(1+z^2\right)}=\left|\frac{8}{3\sqrt{3}}\operatorname{arctg}\frac{2z+1}{\sqrt{3}}-\frac{2}{3}\,\frac{2z+1}{1+z+z^2}-\operatorname{arctg} z\right|_{z_1}^{z_2}. \tag{38}$$

Возвращаясь к углу β, выводим выражение радиального давления, создаваемого центробежной силой, в соответствии с уравнением (12):

$$\frac{P_{\text{ц}}}{\rho u^2} = \left| \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2\operatorname{tg}\beta + 1}{\sqrt{3}} - \frac{\cos\beta}{3} \cdot \frac{2\sin\beta + \cos\beta}{2 + \sin 2\beta} - 0{,}5\beta \right|_{\beta_1}^{\beta_2}. \tag{39}$$

С учетом формул (22) интеграл (13) принимает вид

$$\frac{P_{\text{ск}}}{\rho u^2} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1}{2} \left(\frac{1 + \sin 2\beta - \cos 2\beta}{2 + \sin 2\beta} \right)^2 d\beta = \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{2} \frac{z^2 dz}{\left(1 + z + z^2\right)\left(1 - z^2\right)} + \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{2} \frac{z^3 dz}{\left(1 + z + z^2\right)\left(1 - z^2\right)}. \tag{40}$$

Решением первого интеграла правой части уравнения (40) является зависимость (26), деленная пополам

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{2} \frac{z^2 dz}{\left(1 + z + z^2\right)\left(1 - z^2\right)} = \left| \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2z + 1}{\sqrt{3}} - 0{,}25 \ln \left(\frac{1 + z + z^2}{1 + z^2} \right) \right|_{z_1}^{z_2}. \tag{41}$$

Разложим вторую подынтегральную дробь правой части уравнения (40) на простейшие

$$\frac{0{,}5 z^3 dz}{\left(1 + z + z^2\right)^2 \left(1 - z^2\right)} = \frac{Az + B}{\left(1 + z + z^2\right)^2} + \frac{Cz + D}{1 + z + z^2} + \frac{Ez + F}{1 + z^2}. \tag{42}$$

Освобождаясь от знаменателей, получаем

$$0{,}5 z^3 = (Az + B)\left(1 + z^2\right) + (Cz + D)\left(1 + z + z^2\right)\left(1 + z^2\right) + (Ez + F)\left(1 + z + z^2\right)^2 = B + D + F + z(A + C + D + E + F) +$$

$$+ z^2 (B + C + 2D + 2E + 3F) + z^3 (A + 2C + D + 3E + 2F) + z^4 (C + D + 2E + F) + z^5 (C + E).$$

Приравняем коэффициенты при одинаковых степенях z

$$\left.\begin{aligned} &B + D + F = 0; \\ &A + C + D + E + 2F = 0; \\ &B + C + 2D + 2E + 3F = 0; \\ &A + 2C + D + 3E + 2F = 0{,}5; \\ &C + D + 2E + F = 0; \\ &C + E = 0. \end{aligned}\right\}$$

Решив эту систему уравнений, находим $A = 0{,}5$; $B = 0{,}5$; $C = -0{,}5$; $D = -0{,}5$; $E = 0{,}5$; $F = 0$ и получаем разложение дроби (42):

$$\frac{0{,}5 z^3}{\left(1 + z + z^2\right)^2 \left(1 - z^2\right)} = \frac{0{,}5(z + 1)}{\left(1 + z + z^2\right)^2} - \frac{0{,}5(z + 1)}{1 + z + z^2} + \frac{0{,}5z}{1 + z^2}. \tag{43}$$

Приведем первую дробь правой части уравнения (43) к виду [6]

$$\frac{0{,}5(z + 1)}{\left(1 + z + z^2\right)^2} = \frac{0{,}5y + 0{,}25}{\left(y^2 + k^2\right)^2},$$

где $y = z + 0{,}5$; $k^2 = 0{,}75$.

В результате интегрирования правой части последней зависимости получаем

$$\int_{y_1}^{y_2} \frac{0{,}5y + 0{,}25}{\left(y^2 + k^2\right)^2} dy = \left| -\frac{0{,}25}{y^2 + k^2} + \frac{0{,}125}{k^2} \left(\frac{y}{y^2 + k^2} + \frac{y}{k} \operatorname{arctg} \frac{y}{k} \right) \right|_{y_1}^{y_2}.$$

Подставляя значение k и возвращаясь к переменной z, находим

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{0,5(z+1)}{\left(1+z+z^2\right)^2} dz = \left| \frac{1}{3\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2z+1}{\sqrt{3}} + \frac{0,5}{3} \frac{z+0,5}{1+z+z^2} - \frac{0,25}{1+z+z^2} \right|_{z_1}^{z_2}. \quad (44)$$

Интегрированием второй и третьей дробей правой части уравнения (43) получаем [6]

$$-\int_{z_1}^{z_2} \frac{0,5(z+1)}{1+z+z^2} dz = \left| -0,25 \ln\left(1+z+z^2\right) - \frac{0,5}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2z+1}{\sqrt{3}} \right|_{z_1}^{z_2}. \quad (45)$$

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{0,5\, z\, dz}{1+z^2} = 0,25 \ln\left(1+z^2\right). \quad (46)$$

Суммированием трех последних зависимостей выводим решение правой части уравнения (43)

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{z^3 dz}{\left(1+z+z^2\right)^2 \left(1+z^2\right)} = \left| \frac{0,5}{3}\left(1+z+z^2\right) - \frac{1}{6\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2z+1}{\sqrt{3}} - 0,25 \ln\left(\frac{1+z+z^2}{1+z^2} \right) \right|_{z_1}^{z_2}. \quad (47)$$

Суммированием выражений (43) и (41) отыскиваем решение зависимости (40)

$$\frac{P_{\text{ск}}}{\rho u^2} = \left| \frac{0,5}{3}\left(1+z+z^2\right) + \frac{1}{3\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2z+1}{\sqrt{3}} - 0,25 \ln\left(\frac{1+z+z^2}{1+z^2} \right) \right|_{z_1}^{z_2}. \quad (48)$$

Возвращаясь к углу β, получаем выражение потерь давления для разгона среды до скорости, с которой она выходит из межлопастного пространства колеса радиального нагнетателя в соответствии с уравнением (13):

$$\frac{P_{\text{ск}}}{\rho u_2^2} = \left| \frac{1}{3} \frac{\cos\beta(\sin\beta - \cos\beta)}{1+\sin\beta} + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2\operatorname{tg}\beta+1}{\sqrt{3}} - 0,5 \ln\left(1+0,5\sin 2\beta\right) \right|_{\beta_1}^{\beta_2}. \quad (49)$$

Графически полученные зависимости проиллюстрированы на рисунке 3.

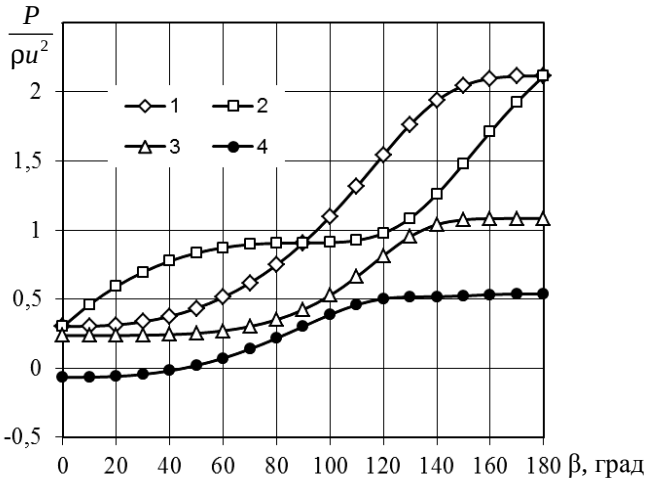


Рис. 3. Зависимость давлений радиального нагнетателя от угла наклона лопастей β:
$1 - P_u / \rho u^2$; $2 - P_r / \rho u^2$; $3 - P_{\text{ц}} / \rho u^2$; $4 - P_{\text{ск}} / \rho u^2$; $5 - P_{\text{общ}} / \rho u^2$

Из рисунка видно, что функция, определяемая выражением (27), (кривая 1) при увеличении угла наклона лопастей непрерывно возрастает. Следовательно, при углах наклона лопастей на выходе из коле-

са, бóльших соответствующих величин на входе, динамическое давление, определяемое формулой (27), всегда будет иметь положительное значение. При углах $\beta < 40°$ и $\beta > 150°$ прирост функции невелик, поэтому с точки зрения увеличения значения динамического давления углы наклона лопастей целесообразно располагать в диапазоне $40° < \beta < 150°$.

Функция согласно выражению (30) (кривая 2) по мере увеличения угла наклона лопастей заметно возрастает при $\beta < 60°$ и $\beta > 120°$, что обусловлено нулевыми значениями статического давления P_r при $\beta = 90°$ и минимальными изменениями его величины вблизи указанного угла.

Функция по формуле (39) (кривая 3) значительно возрастает в диапазоне $\beta = 60…140°$ и практически не меняется вне указанного диапазона, в связи с соответствующим изменением тангенциальной составляющей скорости движения среды.

Функция, определяющая величину скоростного напора по зависимости (49) (кривая 4), практически не изменяется при $\beta > 120°$, что связано с постоянством радиальной скорости движения среды в этой области.

В целом значительное увеличение активных составляющих давления радиального нагнетателя (P_u, P_r и $P_ц$) наблюдается при углах наклона лопастей на выходе из колеса, больших 90°, то есть когда они отогнуты по направлению вращения.

Заключение. Для увеличения скоростного давления радиального нагнетателя нецелесообразно использовать углы наклона лопастей меньше 40° и больше 150°. Статическое давление, создаваемое лопастями колеса, практически не изменяется в диапазоне $60^o < \beta < 120°$. Максимальные величины рассмотренных составляющих давления радиального нагнетателя могут быть получены при углах наклона лопастей на выходе из колеса больше 90°.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В.М. Черкасский. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971.
3. Павлечко, В.Н. Влияние угла наклона лопастей на давление радиального нагнетателя / В.Н. Павлечко, С.К. Протасов // Химическая промышленность. – 2014. – Т. 91, № 5. – С. 252–258.
4. Павлечко, В.Н. К вопросу о теоретическом давлении радиального нагнетателя / В.Н. Павлечко, С.К. Протасов // ИФЖ. – 2014. – Т. 87, № 6. – С. 1448–1454.
5. Павлечко, В.Н. К вопросу о теоретическом давлении радиального нагнетателя с учетом силы Кориолиса / В.Н. Павлечко, С.К. Протасов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2014. – № 11. – С. 81–84.
6. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М.: Наука, 1969.

Поступила 09.03.2015

THEORETICAL PRESSURE OF RADIAL BLOWER AT DIFFERENT BLADE ANGLES

V. PAVLECKO, S. PRATASAU

The equations relating dynamic and static pressures generated by a radial fan blower, static pressure caused by a centrifugal force, and a pressure drop due to acceleration of the medium to the final speed with radially changed blade angles are derived. The graphical dependences of these pressures on the blade angle are presented. It was found that the dynamic pressure caused by the blades does not change significantly for the inlet blade angle below 40^o and the outlet blade angle above 150^o. The maximal dynamic and static pressures generated by the blower can be obtained at the outlet blade angles exceeding 90^o.

УДК 620:621.78

РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ РУБИЛЬНЫХ НОЖЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

д-р техн. наук, проф. А.В. АЛИФАНОВ; В.В. ЦУРАН
(Барановичский государственный университет);
канд. техн. наук Г.П. ГОРЕЦКИЙ; канд. техн. наук А.М. МИЛЮКОВА
(Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск)

Демонстрируются экспериментальные исследования режимов термообработки рубильных ножей, изготовленных из различных инструментальных сталей. Установлено, что в образцах рубильных ножей с небольшими размерами и относительно большой толщиной после термической обработки остаточные деформации не проявляются; в более тонких образцах прямоугольной формы (длиной более 300 мм) после термической обработки имеет место остаточная деформация в виде прогиба. При этом величина прогиба тем больше, чем меньше отношение толщины образца к его длине и ширине. Определено, что образцы, изготовленные из стали марки 6ХВ2С, обладают меньшей величиной прогиба, чем образцы из стали марок У8А и 9ХФ.

Введение. Стоимость сырья имеет тенденцию к увеличению. Щепа для производства древесных гранул переживает настоящий бум спроса. Цена на неё за последние 10 лет утроилась. Соответственно, изменилось и отношение деревообрабатывающих предприятий к тому, что еще недавно называлось отходами лесопиления (опилки, стружка, щепа) [1]. Все эти предприятия оснащены рубительными машинами иностранного производства, рубильные ножи для которых также приходится приобретать за рубежом, используя для этого немалые бюджетные средства. Перед учеными и специалистами Беларуси стоит задача – разработать технологию и освоить производство рубильных ножей на отечественных предприятиях.

Для изготовления ножей с заданными эксплуатационными характеристиками необходимо использовать высоколегированные стали и определенные режимы термической обработки, обеспечивающие в готовых изделиях мелкодисперсную, однородную структуру и необходимое соотношение аустенита, мартенсита и карбидных включений. Это необходимо для обеспечения высокой прочности ножей в условиях ударных нагрузок, и что важно, сохранения высокой остроты режущего лезвия ножа в процессе эксплуатации. Главное препятствие для организации производства рубильных ножей на белорусских предприятиях – отсутствие необходимых знаний и опыта для проведения качественной термической обработки легированных инструментальных сталей, обеспечивающих необходимые эксплуатационные свойства изделий (высокие показатели твердости, ударной вязкости, периода стойкости и др.) [2].

Анализ влияния легирующих элементов на свойства инструментальных сталей. Требования, предъявляемые к сталям, используемым для рубильных ножей, схожи с требованиями, предъявляемыми к пружинным сталям и сталям для холодной штамповки (HRC 50…62). Поэтому способы и режимы термообработки (ТО) для них необходимо назначать таким образом, чтобы получить оптимальное сочетание таких свойств, как прочность, пластичность и вязкость.

Высокую стойкость и надежность рубильных ножей можно обеспечить, если для конкретных условий будет получено оптимальное сочетание сопротивления стали пластической деформации (твердость HRC 50…60), в том числе при повышенных температурах (теплостойкость), и хрупкому разрушению (вязкость). Заданный уровень твердости можно получить либо с помощью дисперсионного твердения после мартенситного превращения, либо в результате только мартенситного превращения. Для этого стали должны быть легированы элементами, имеющими большее химическое сродство к углероду, чем железо (Mn, Cr, Mo, W, V, Ti, Nb и др.), что позволяет образовать в них соответствующие карбиды.

Такие элементы, как V, Ti, Nb, образуя карбид типа MeC, имеют две стадии легирования.

На первой стадии (для примера рассмотрим ванадий) при соотношении $V/C \approx 1$ происходит слабое обогащение твердого раствора (α) легирующим элементом и связывание основной его доли в карбиды. При этом увеличивается количество карбидов легирующего элемента и снижается количество цементита. На второй стадии ($V/C > 1$) процесс характеризуется переходом от образования цементита Fe_3C к карбиду VC. Это характерно и для Ti, Nb, Cr. При этом снижается содержание углерода в феррите, диспергируется размер зерна феррита и других карбидов, а также активно обогащается твердый раствор легирующим элементом.

Для Mo на первом этапе первой стадии легирования при соотношении $Mo/C \approx 1$ образуется $Me_3C \rightarrow Me_{23}C_6$. На второй стадии легирования при соотношении $Mo/C > 2$ молибден переходит в твердый раствор.

Для хрома вторая стадия легирования стали наступает при соотношении $Cr/C > 10$.

На второй стадии легирования, когда легирующий элемент накапливается в феррите, свойства стали определяются свойствами феррита. Повышаются прочностные свойства, однако понижаются вязкость и хладостойкость.

Изменения в фазовом и структурном состоянии, происходящие на первой стадии легирования (уменьшение размеров карбидов, измельчение зерна и снижение содержания углерода в феррите), благоприятно сказываются на механических свойствах сталей – повышается их прочность и вязкость. Такое изменение свойств наблюдается и при увеличении содержания легирующего элемента в пределах соотношения, отвечающего первой стадии.

Все это учитывается при обработке легированных сталей, и последующая термическая обработка проводится для оптимизации свойств, отвечающих предъявляемым требованиям.

Легированные стали упрочняются путем мартенситного превращения при закалке. Однако предел упругости оказывается весьма низким, если при закалке исключены процессы перераспределения атомов углерода в решетке мартенсита, в структуре стали фиксируется большое количество остаточного аустенита. В обычных условиях закалки, когда во время ее проведения или после неизбежно протекают процессы диффузионного перераспределения атомов углерода, отмечается рост прочностных свойств. При этом чем мельче зерно и меньше количество остаточного аустенита, тем выше прочность. Типичные температуры закалки находятся в интервале 760…870 °С. Максимальные свойства изделия из легированной стали достигаются после отпуска при температуре в интервале 250…450 °С за регламентированное время, когда в структуре стали уже нет остаточного аустенита, в результате распада мартенсита образовалось большое число когерентно связанных с матрицей карбидных частиц, а дислокации образовали субструктуру полигонизационного типа. Количество остаточного аустенита необходимо регулировать температурой и временем выдержки при отпуске.

Если использовать изотермическую закалку на нижний бейнит, то можно получить более высокие свойства инструмента. Так, при равной твердости стали после обычной и изотермической закалки и отпуске в последнем случае достигаются более высокие значения усталостной прочности и трещиностойкости. Изотермическая закалка имеет и ряд технологических преимуществ – меньше деформация изделий и меньше опасность возникновения закалочных трещин. Режимы изотермической закалки определяются для каждой марки стали индивидуально.

Разработка режимов термообработки для рубильных ножей, изготовленных из различных сталей. С целью изготовления ножей для рубки щепы на различных рубительных машинах в Физико-техническом институте НАН Беларуси разработана конструкторская документация на наиболее применяемые на деревообрабатывающих предприятиях Беларуси рубильные ножи. Также разработаны технологические процессы их изготовления совместно с Барановичским государственным университетом.

В зависимости от разновидности рубительных машин предложено для изготовления некоторых ножей использовать:

- инструментальную легированную сталь марки 6ХВ2С ГОСТ 5950-73, из которой рекомендуется изготавливать ножи для холодной резки металла, резьбонакатных плашек, пуансонов и обжимных матриц при холодном деформировании, штампов сложной формы, работающие с повышенными ударными нагрузками;
- сталь марки У8А ГОСТ 1435-74, применяемую для инструмента, работающего в условиях, не вызывающих разогрева режущей кромки: фрез, зенковок, топоров, стамесок, долот, пил продольных и дисковых, накатных роликов, кернеров, отверток, комбинированных плоскогубцев, боковых кусачек;
- сталь марки 9ХФ ГОСТ 5950-73, применяемую для производства рамных, ленточных, круглых строгальных пил; штемпелей при холодной работе; ножей для холодной резки металла, обрезных матриц и пуансонов при холодной обрезке заусенцев; кернеров.

Инструментальная легированная сталь марки 6ХВ2С относится к сталям повышенной прокаливаемости, её химический состав представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав стали 6ХВ2С, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	W	Cu
0,55…0,65	0,5…0,8	0,15…0,45	до 0,4	до 0,03	до 0,03	1…1,3	2,2…2,7	до 0,3

Режимы термической обработки применительно к стали 6ХВ2С определяются ГОСТ 5950-73 (оптимальная температура закалки 860…900 °С, среда закалки – масло) и обеспечивают твердость не менее HRC 57…62, а также механические свойства, представленные в таблице 2. Рекомендуемая термическая обработка также пригодна для изотермической закалки, что позволяет осуществлять прокаливание до 50…60 мм.

Таблица 2

Механические свойства стали 6ХВ2С при T = 20 °С

Сортамент	σ_B, МПа	σ_T, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCU, кДж/м^2	Термическая обработка
Сталь	1770	1680	7	18	260	Закалка, 880 °С, масло, отпуск 450 °С, 2 ч

Сталь марки У8А относится к углеродистым сталям, но по значению предела упругости после закалки она не уступает легированным сталям. Как недостаток следует отметить низкую прокаливаемость. Из-за низкой устойчивости переохлаждаемого аустенита закалку даже деталей малого сечения следует осуществлять при значительных скоростях охлаждения, что приводит к получению высоких остаточных напряжений. Закаленные углеродистые стали отличаются малой устойчивостью против отпуска, поэтому повышенные температуры отпуска для увеличения пластических свойств и более полного снятия остаточных напряжений приводят к сильному понижению прочностных свойств. Эти стали характеризуются повышенным значением температурного коэффициента модуля упругости и отличаются низкой теплостойкостью. Режимы термической обработки применительно к стали марки У8А (табл. 3) определяются ГОСТ 1435-74 (оптимальная температура закалки 780…800 °С; среда закалки – вода) и обеспечивают твердость не менее HRC 60…63, а также механические свойства, представленные в таблице 4.

Таблица 3

Химический состав стали, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,75…0,84	0,17…0,33	0,17…0,28	до 0,25	до 0,018	до 0,025	до 0,2	до 0,25

Таблица 4

Механические свойства стали У8А при T = 20 °С

Сортамент	σ_B, МПа	σ_T, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCU, кДж/м^2	Термическая обработка
						Температура критических точек, °С
Лента нагартованная, ГОСТ 2283-79	740…1180	–	–	–	–	Ac_1 = 720 Ar_1 = 700 Mn = 245
Лента отожженная, ГОСТ 2283-79	640…740	–	10…15	–	–	Закалка 780 °С, вода, отпуск 150…220 °С, 2 ч

Сталь 9ХФ относится к низколегированным. Благодаря ее химическому составу (табл. 5) сохраняются преимущества углеродистых сталей и снижаются их недостатки – низкая закаливаемость и чувствительность к перегреву. Для предупреждения низкой закаливаемости она легируется Mn и Cr. Второй недостаток уменьшается при легировании Cr и V. Из-за лучшей закаливаемости эта сталь по сравнению с углеродистой обладает более высокой, а главное – однородной твердостью в тонких сечениях.

Таблица 5

Химический состав стали 9ХФ, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	Cu
0,8...0,9	0,1...0,4	0,3...0,6	до 0,4	до 0,03	до 0,03	0,4...0,7	0,15...0,3	до 0,3

Режимы термической обработки применительно к стали 9ХФ определяются ГОСТ 5950-73 (оптимальная температура закалки 850…880 °С; среда закалки – масло) и обеспечивают твердость не менее HRC 61, а также механические свойства, представленные в таблице 6.

Таблица 6

Механические свойства стали 9ХФ при T = 20 °С

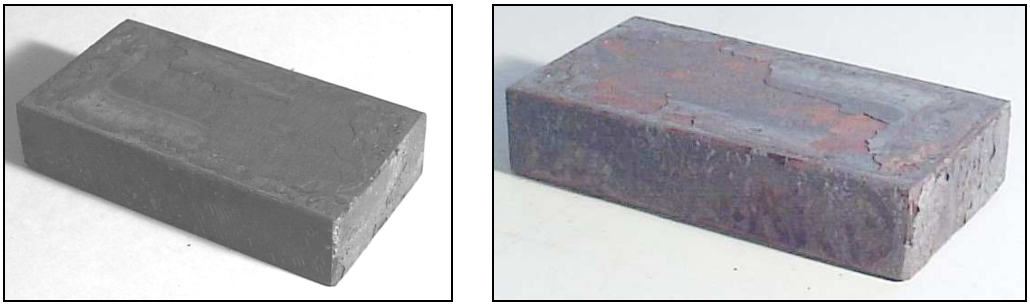
Сортамент	σ_B, МПа	σ_T, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCU, кДж/м^2	Термическая обработка Температура критических точек, °С
Лента отожженная, ГОСТ 2283-79	930	–	–	–	–	Ac_1 = 700 Mn = 215
						Закалка 780 °С, вода, отпуск 150…220 °С, 2 ч

Исследование влияния режимов термической обработки на остаточную деформацию модельных образцов ножей для рубки щепы. В связи с тем, что процесс изготовления готовых рубильных ножей отличается большой трудоемкостью и, соответственно, немалой стоимостью, модельные образцы исследуемых рубильных ножей были изготовлены из такой же марки сталей, с такими же габаритными размерами, как и у оригиналов. В отдельных случаях модельные образцы изготавливались в двух экземплярах из альтернативных марок сталей, которые могут быть использованы для получения некоторых рубильных ножей.

Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1670 (77×44×15). Модельные образцы были изготовлены из сталей 6ХВ2С и У8А с соответствующей этим сталям термообработкой (для стали 6ХВ2С – максимальная температура нагрева составляла 880 °С; для стали У8А – 800 °С). Сталь У8А выбрана как альтернатива стали 6ХВ2С из-за ее значительно меньшей стоимости и хороших эксплуатационных характеристик при изготовлении из них режущих элементов для сельскохозяйственной техники.

После термической обработки модельных образцов в соответствии с требованиями для каждой стали проводились измерения габаритных размеров образцов, а также отклонений от плоскостности (далее – прогиб h) их опорных поверхностей с помощью индикатора часового типа, закрепленного на магнитной стойке.

Измерения показали, что после термической обработки образцов как из стали 6ХВ2С, так и из стали У8А (рис. 1) все контролируемые их размеры, а также неплоскостность находятся в допустимых пределах в соответствии с ГОСТ 17342-81 [3]: разнотолщинность ножа составила не более 0,1 мм; неравномерность ширины ножа не более 0,5 мм на всей длине; допуск прямолинейности режущей кромки и нижней поверхности 0,3 мм на всей длине ножа; допуск плоскостности передней и опорной поверхностей 0,3 мм на всей длине ножа, но не более 0,1 мм на 100 мм длины; допуск перпендикулярности торцевых поверхностей ножа относительно нижней поверхности равен допуску на длину ножа.

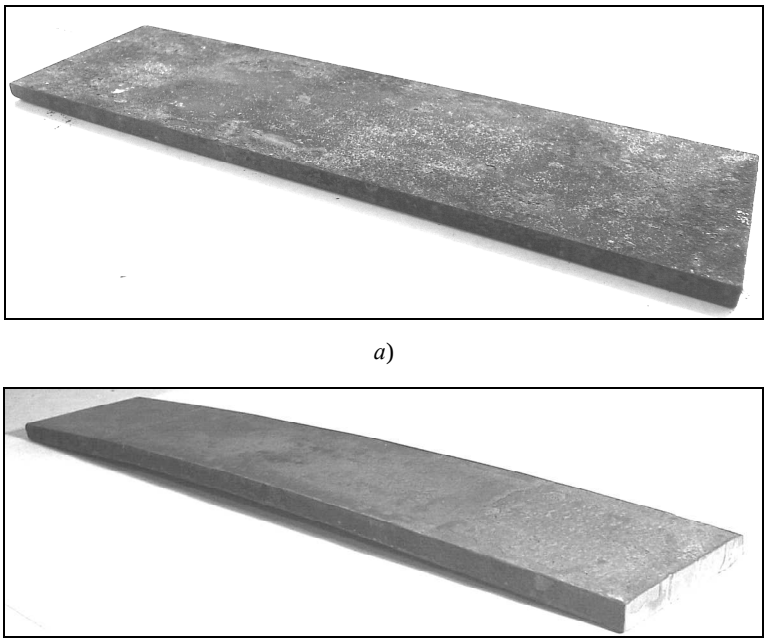


а) *б*)

Рис. 1. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1670 (77×44×15) после термической обработки:
а – образец из стали 6ХВ2С; *б* – образец из стали У8А

Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1671 (460×85×10). Для изготовления образцов использовались стали 6ХВ2С и У8А (рис. 2). Температура нагрева для стали 6ХВ2С составила 860 °С, для стали У8А – 780 °С. Величина прогиба h определяет максимальное отклонение плоскости образца от горизонтали в модельных образцах после термообработки. Прогиб h у образцов из стали 6ХВ2С и стали У8А составил 3,3 и 1,8 мм соответственно. Большее значение величины h у образца из стали 6ХВ2С объясняется влиянием легирующих элементов, из-за которых при нагреве происходят сложные структурно-фазовые превращения, приводящие к возникновению остаточных напряжений практически ко всему объему образца. Сталь У8А относится к малолегированным сталям пониженной прокаливаемости. Для устранения дефекта в виде прогиба модельные образцы рихтовались: нагревались до температуры от-

пуска (200…220 °С) и под давлением P = 15 тс на гидравлическом прессе ПД-476 выдерживались между стальными плитами до полного охлаждения.

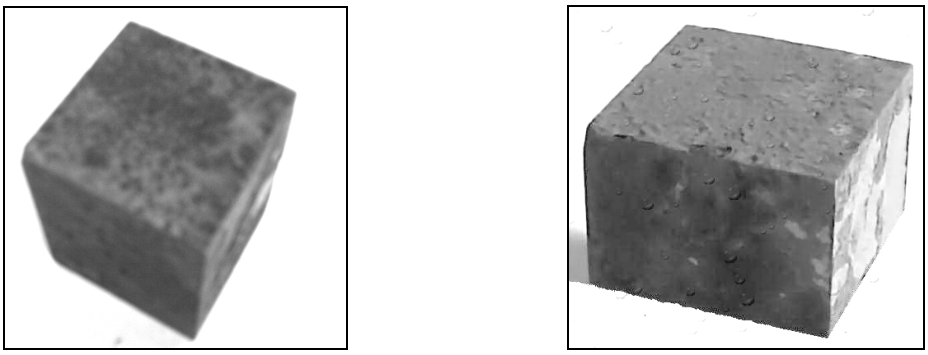


а)

б)

Рис. 2. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1671 (460×85×10) из стали 6ХВ2С:
а – до термической обработки; *б* – после термической обработки

Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1672 (40×40×23). Модельные образцы изготовлены из стали марок 6ХВ2С и У8А (рис. 3) с соответствующей этим сталям термообработкой (для стали 6ХВ2С – температура нагрева составила 880 °С; для стали У8А – 800 °С). Измерения габаритных размеров и неплоскостности образцов после термообработки показали их соответствие требованиям чертежа ФТИ 5.001.1672.

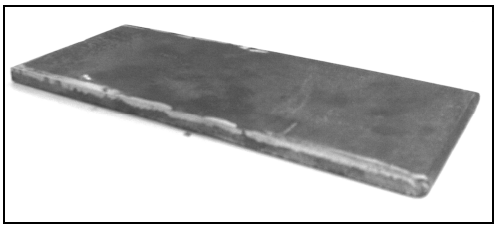


а) *б*)

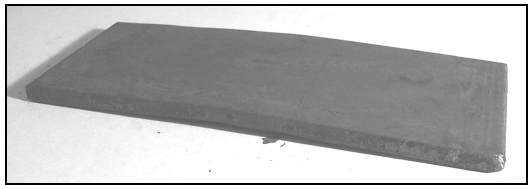
Рис. 3. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1672 (40×40×23) после термической обработки
а – из стали 6ХВ2С; *б* – из стали У8А

Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1673 (300×120×14). Для изготовления модельных образцов ножа использовались стали 6ХВ2С и У8А. Температура нагрева для образца из стали 6ХВ2С (рис. 4, *а*) составляла 880 °С, для образца из стали У8А – 780 °С. После термообработки в модельных образцах, так же как и в случае ножа ФТИ 5.001.1671, была обнаружена остаточная деформация в виде прогиба. Величина прогиба h для стали 6ХВ2С составила 1,5 мм (рис. 4, *б*), для стали У8А – 3,0 мм (рис. 4, *в*).

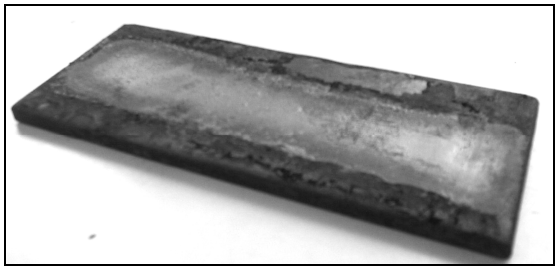
Для устранения дефекта в виде прогиба модельные образцы нагревались до температуры отпуска (200…220 °С) и выдерживались под давлением P = 10 тс на гидравлическом прессе ПД-476 между стальными плитами до полного охлаждения образцов.



а)



б)

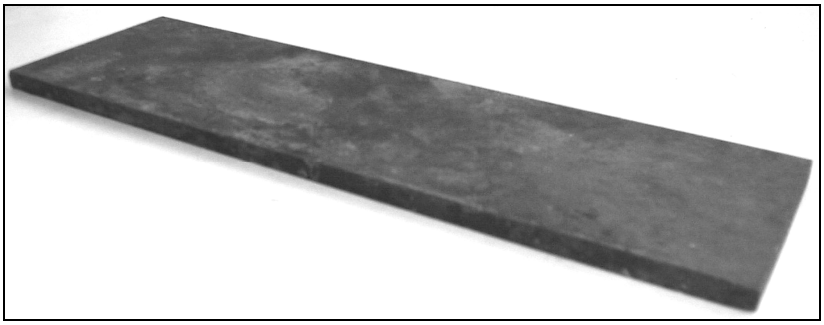


в)

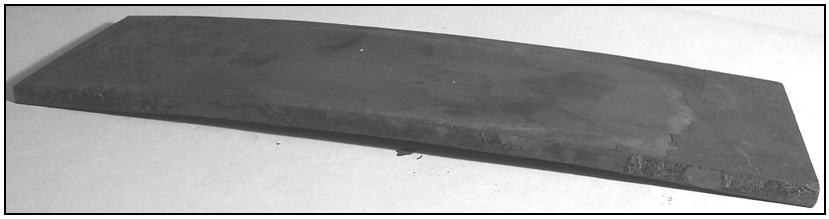
Рис. 4. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1673 (300×120×14):
а – образец из стали 6ХВ2С до термической обработки;
б – образец из стали 6ХВ2С после термической обработки;
в – образец из стали У8А после термической обработки

Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1674 (300×85×6). Для изготовления модельных образцов выбраны стали 6ХВ2С и 9ХФ. Сталь 9ХФ применяется для изготовления некоторых почворежущих элементов сельскохозяйственных машин и проявляет устойчивость к ударным нагрузкам, отличается невысокой стоимостью и поэтому выбрана как альтернатива стали 6ХВ2С.

Для образцов из стали 9ХФ с учетом их небольшой толщины (6 мм) температура нагрева составила 850 °С. Для образцов из стали 6ХВ2С из тех же соображений (малая толщина) температура нагрева выбиралась по минимальной (860 °С) рекомендуемой для этой стали. После термической обработки в модельных образцах обнаружилась остаточная деформация в виде прогиба. Величина *h* прогиба составила для стали 6ХВ2С 2,8 мм, а для стали 9ХФ – 4,3 мм.



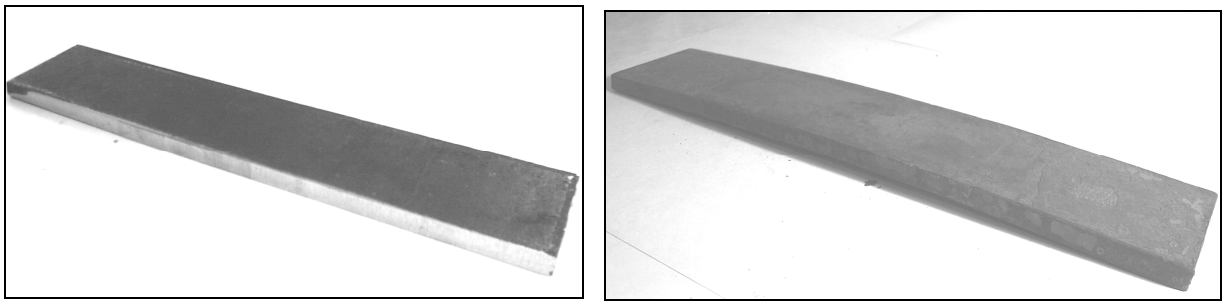
а)



б)

Рис. 5. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1674 (300×85×6) из стали 6ХВ2С:
а – до термической обработки; *б* – после термической обработки

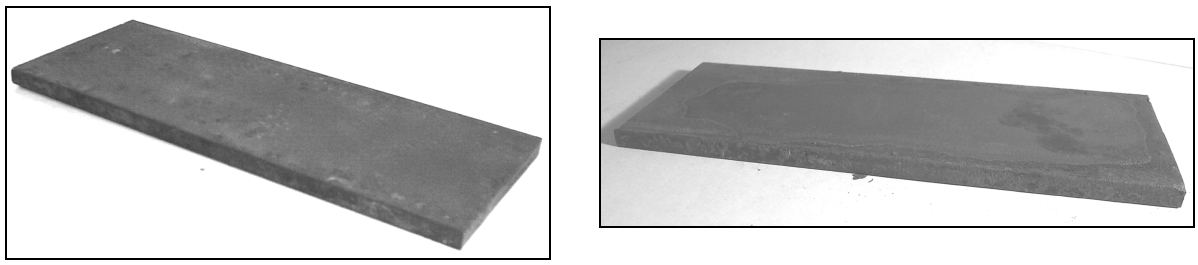
Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1675 (700×92×20). Для изготовления модельного образца использовалась только сталь 6ХВ2С. Температура нагрева составляла 900 °С. Величина прогиба *h* после термообработки – 4 мм.



а) *б*)

Рис. 6. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1675 (700×92×20) из стали 6ХВ2С
а – до термической обработки; *б* – после термической обработки

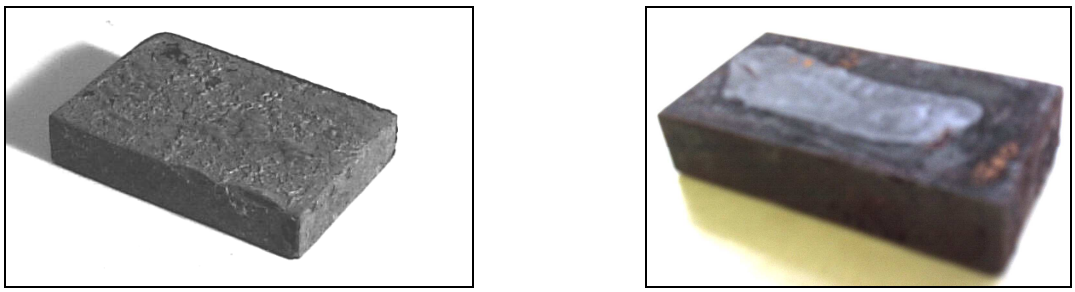
Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1676 (408×130×15). Для изготовления модельных образцов использовались стали 6ХВ2С и У8А с соответствующими температурами нагрева. После термообработки в модельных образцах образовался прогиб: для стали 6ХВ2С *h* = 1,5 мм, для стали У8А *h* = 2,0 мм.



а) *б*)

Рис. 7. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1676 (408×130×15) из стали 6ХВ2С:
а – до термической обработки; *б* – после термической обработки

Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1677 (40×30×15). Для изготовления модельных образцов (рис. 8), так же как и в предыдущем случае, использовались стали 6ХВ2С и У8А с соответствующими температурами нагрева.



а) *б*)

Рис. 8. Модельный образец ножа ФТИ 5.001.1677 (40×30×15) после термической обработки:
а – образец из стали 6ХВ2С; *б* – образец из стали У8А

Измерения габаритных размеров и прогиба образцов после термообработки показали их соответствие требованиям чертежа ФТИ 5.001.1677.

Заключение. Для проведения экспериментальных исследований влияния температурных режимов на остаточную деформацию образцов ножей изготовлены модельные образцы рубильных ножей из ста-

лей марок 6ХВ2С (базовой), У8А и 9ХФ, каждый из которых по своим размерам полностью соответствует своему аналогу (готовому ножу). Термическая обработка проведена по режимам, рекомендованным для этих сталей.

Результаты экспериментальных исследований показали, что образцы с небольшими размерами и относительно большой толщиной после термической обработки не имеют остаточных деформаций. Образцы относительно тонкие прямоугольной формы (длиной более 300 мм) после термической обработки имеют остаточную деформацию в виде прогиба. При этом величина прогиба тем больше, чем меньше отношение толщины образца к его длине и ширине. Установлено, что образцы, изготовленные из стали марки 6ХВ2С, имеют величину прогиба меньшую, чем образцы из стали марок У8А и 9ХФ. Устранить выявленные дефекты в виде прогибов удается путем разогрева искривленных образцов до температуры отпуска и последующей выдержки между стальными плитами на гидравлическом прессе под нагрузкой до остывания заготовки.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что остаточная деформация (прогиб) образцов ножей из различных марок сталей (6ХВ2С, 9ХФ, У8А) характеризуется различной величиной и зависит от геометрических параметров ножей (длина, толщина, ширина) и марок сталей. Прогиб легко устраняется путем дополнительной рихтовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новости деревообработки. – 2014. – № 1(157). – С. 1.
2. Алифанов, А.В. Определение оптимальных режимов термической и термомеханической обработки рубильных ножей / А.В. Алифанов, А.М. Милюкова, В.В. Цуран // Вестн. БарГУ. Серия Технические науки. – 2014. – Вып. 2. – С. 17–22.
3. Ножи для рубильных машин. Технические условия: ГОСТ 17342-81. – Введ. 11.03.1981. – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1983. – 8 с.

Поступила 23.06.2015

DEVELOPMENT OF HEAT TREATMENT CONDITIONS OF CHIPPING KNIVES MADE FROM VARIOUS TOOL STEELS

A. ALIFANOV, V. TSURAN, G. GORETSKY, A. MILUKOVA

Experimental studies of heat treatment conditions of chipping knives made from various tool steels are demonstrated. It is found that in the samples of chipping knives with small dimensions and a relatively large thickness after heat treatment permanent deformation isn't shown; in thinner samples of rectangular shape (with length of more than 300 mm) after such treatment there is permanent deformation in the form of the deflection. The smaller the ratio of the thickness of the sample to its length and width is the greater the amount of the deflection. It was determined that the samples made of steel 6HV2S have lesser amount of deflection than the samples of steel U8A and 9HF.

УДК 621.762

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОСИСТЕМ

д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ; канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);
А.П. ЯЛОВИК (ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк);
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН
(Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты исследований процесса гиперзвуковой металлизации хромсодержащих покрытий. Показаны возможности использования порошковых композиционных проволок, а также проволок из литых сталей. Анализ полученных результатов показал, что для формирования покрытий из композиционных порошков методом гиперзвуковой металлизации рационально использовать проволоки с порошковым наполнителем, имеющем размер частиц менее 80 мкм. Проведенные исследования позволяют рекомендовать в качестве альтернативы гальваническому хромированию технологию гиперзвуковой металлизации с использованием литых проволок из сталей мартенситного класса при изготовлении и для восстановления или упрочнения элементов гидросистем.

Введение. Эффективность работы комбинированных дорожных и строительных погрузочно-разгрузочных машин, технологического оборудования предприятий перерабатывающей, деревообрабатывающей, химической отраслей промышленности, металлообрабатывающих автоматических линий во многом зависит от качества, надежности и технических характеристик элементов гидравлических систем.

Гидравлические приводы включают: направляющую гидроаппаратуру, регулирующую гидроаппаратуру, вспомогательные элементы, исполнительные механизмы (гидроцилиндры, гидродвигатели, электрогидравлические шаговые приводы и др.). В процессе их эксплуатации изменяются показатели, характеризующие работу основных агрегатов: насосов, распределительных устройств, силовых цилиндров. Такие изменения показателей являются результатом изнашивания узлов и сопряжений, нарушения герметичности уплотнений. Так, например, понижение скорости подъема груза может быть следствием износа деталей силового цилиндра.

При изготовлении деталей гидравлических систем используют гальваническое хромирование узлов трения для обеспечения их высокой износостойкости и коррозионной стойкости. Штоки с поврежденной хромированной наружной поверхностью, контактирующей с уплотнительными элементами, обычно заменяют новыми, поскольку величина повреждений и износа превышает толщину гальванического хромового покрытия, при этом шток с повреждённым покрытием уходит на переплавку. Также недостатком гальванического хромирования является наличие высокотоксичных отходов. Таким образом, замена гальванического хромирования другим высокопроизводительным методом, позволяющим получать коррозионно-стойкие покрытия большей толщины (0,05…2 мм) с минимальным загрязнением окружающей среды, достаточно актуальная проблема.

В настоящее время широкое распространение получили методы плазменного и высокоскоростного напыления, которые позволяют наносить высокоплотные и коррозионно-стойкие покрытия на различные детали машин. Однако данные процессы характеризуются и недостатками, таким как низкая производительность, значительные затраты на реализацию, а также высокая стоимость присадочного материала и оборудования.

Технология гиперзвуковой металлизации. Один из наиболее перспективных способов получения покрытий, которые можно использовать взамен гальванического хромирования, – гиперзвуковая металлизация (ГМ) (рис. 1).

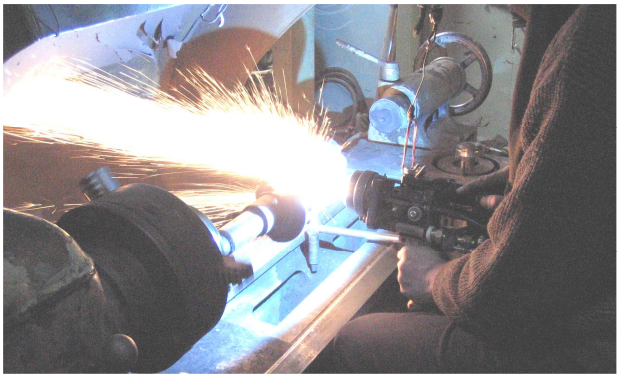
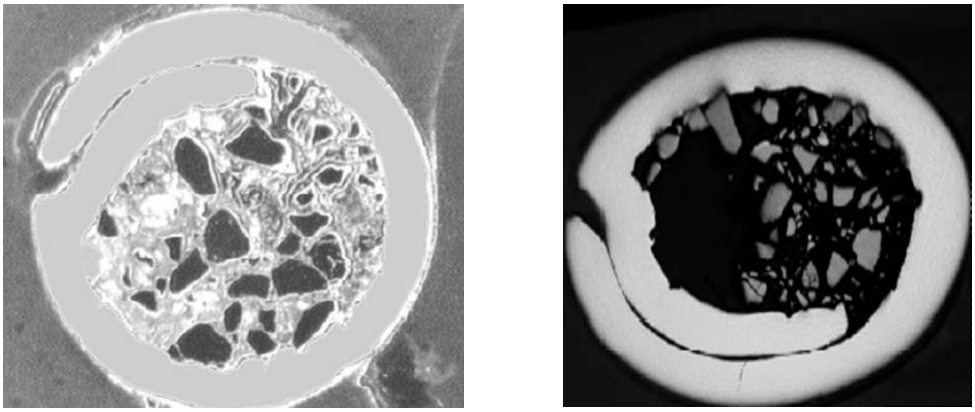


Рис. 1. Процесс нанесения покрытия гиперзвуковой металлизацией

Нанесение покрытий данным способом осуществляется путём распыления расплава, полученного в результате плавления двух проволок электрической дугой, возникающей при пропускании через проволоку электрического тока. Распыление расплава реализуется с помощью высокоскоростной струи продуктов сгорания воздушно-пропановой смеси. Отличительной особенностью ГМ является наличие малогабаритной высокоэффективной камеры сгорания воздушно-пропановой смеси, сверхзвуковая струя которой имеет на выходе скорость 1500 м/с при температуре 1850 °С. Это позволяет частицам расплавленного металла разгоняться в потоке до 500 м/с и формировать покрытие, имеющее плотность и прочность сцепления в 2…3 раза выше, чем при традиционной электродуговой металлизации. Такие отличительные особенности процесса ГМ позволяют получать высокоплотные покрытия с пористостью 1…5 и прочностью сцепления 50…60 МПа [1].

При выполнении экспериментальных исследований нами использовалась установка ГМ модели АДМ-10, разработанная в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси.

Выбор напыляемых материалов. Анализируя условия эксплуатации штоков с гальваническими хромовыми покрытиями было предложено для гиперзвуковой металлизации использовать материалы на основе железа с содержанием хрома более 14,0 масс. % и углерода не менее 0,3 масс. %, что, по нашему мнению, должно было обеспечивать необходимый уровень микротвердости, износостойкости и стойкости к коррозионному разрушению. В настоящее время данным параметрам соответствуют порошковые проволоки, предназначенные для дугового напыления покрытий на детали узлов трения, работающих в условиях интенсивного изнашивания и в присутствии агрессивных сред. К настоящему времени практически всеми крупными производителями напыляемых материалов освоен выпуск композиционных порошковых проволок, представляющих собой, как правило, стальную или никелевую оболочку, заполненную порошковой шихтой (рис. 2).



а) *б*)

Рис. 2. Поперечное сечение композиционных проволок фирм «Durum» (*а*) и «Sulzer Metco» (*б*)

В экспериментах использовали порошковую проволоку PST-5 (состав: Ni 4,9/ Cr 14,8/ W 3,6/ Nb 2,2/ Ti 0,45/ Al 0,56/ C 0,3/ F), выпускаемую Днепропетровским ЗАО «Спецсплав»; порошковые проволоки фирмы «Durum» марки AS-897 (состав: Si 1,25/ Ni 4,5/ Cr 14/ Mn 5,5/ B 1,85/ W 26/ Ti_2C_3 6/ Fe), AS-815 (состав: C 4,8/ Cr 28/ Si 1,4/ B /Fe) и AS-760 (состав: C 0,3/ Cr 19/ Si 3,8/ B 1,2/ Ni); порошковые проволоки фирмы «Castolin Eutectic» марки EuTronic Arc 532 (состав: C 3,5/ Cr 30/ Mn 0,8/ Si 1,2/ Fe) и EuTronic Arc 502 (состав: C 4/ Cr 18/ Mn 0,8/ Si 1,5/ B 1,0/ Fe); порошковую проволоку фирмы «Sulzer Metco» марки Sulzer Metco 8297 (состав: Si/ Cr 14/ Ni 5/ B 1,5/ WC 25 + TiC 5/ Fe).

В результате измерения твердости, микротвердости покрытий установлено, что покрытия, сформированные распылением проволоки производства ЗАО «Спецсплав», не обеспечивают твердости, гарантированной изготовителями. Как правило, твердость покрытий не превышала 32 HRC.

Изучение шлифов поперечных сечений проволок показало, что размеры частиц твердых включений в шихте составляют более 250 мкм, а толщина оболочки – около 350 мкм. Вероятней всего, при высокой скорости эвакуации из зоны дуги столь крупные частицы не успевают прогреться и не участвуют в процессе формирования покрытия, образующегося практически только из материала оболочки. Отсюда следует, что композиционная проволока марки PST-5 предназначена в основном для процессов наплавки, а не напыления.

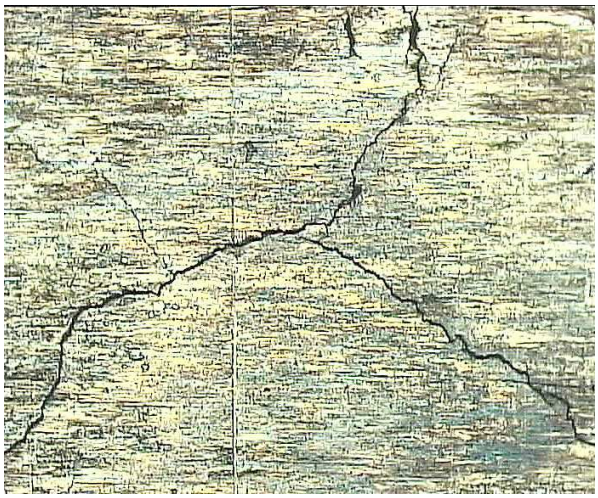
Нанесение покрытий проволоками, изготовленными фирмами «Durum», «Castolin Eutectic» и «Sulzer Metco», показало, что указанные выше материалы позволяют формировать покрытия с твердо-

стью, близкой к заявленной изготовителем (52…58 HRC). Размер частиц наполнителя (см. рис. 1) составляет 30…120 мкм при толщине оболочки 150 мкм.

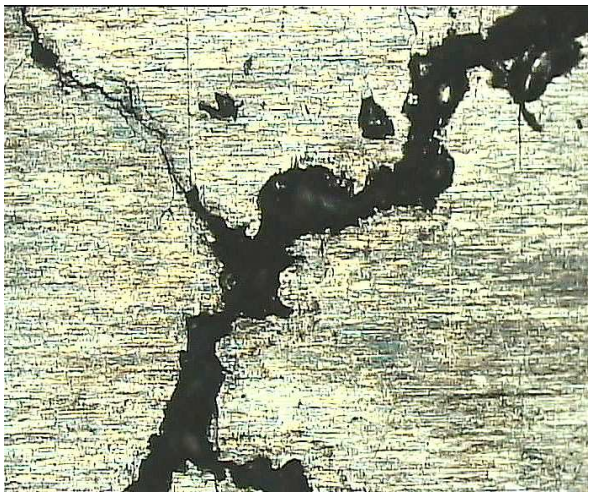
Учитывая результаты ранее проведенных исследований [2], нами предложено также использовать наряду с порошковыми проволоками монолитные стальные проволоки марок 40Х13 и 95Х18. Выбор данных марок стали обусловлен тем, что в них содержится достаточно большое количество хрома, что обусловливает их высокую коррозионную стойкость.

Результаты исследований и их обсуждение. На основании анализа результатов исследования зависимости коэффициента использования распыляемого материала от основных технологических параметров процесса (сила тока, напряжение, давление пропана и воздуха) для нанесения покрытий из композиционных порошковых проволок выбраны следующие режимы гиперзвуковой металлизации: ток – 120…150 А; напряжение – 32…33 V; давление пропана – 0,43 МПа; давление воздуха – 0,45 МПа; дистанция – 150 мм. В качестве материала подслоя использовался сплав Х20Н80 (20 % Cr, 80 % Ni).

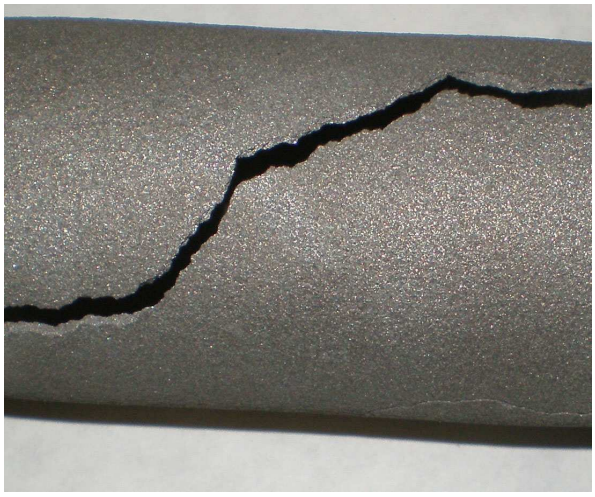
Первые эксперименты показали, что композиционные порошковые проволоки весьма чувствительны к толщине наносимого покрытия. Так, на указанных выше режимах практически не удавалось получить из материала DURMAT AS-897 покрытия толщиной более 1,1 мм. После напыления слоя толщиной около 0,9 мм на нем появлялись микротрещины, которые после напыления слоем в 1 мм увеличивались в размерах, а при достижении толщины 1,1 мм покрытие лопалось (рис. 3).



а)



б)



в)

Рис. 3. Рост трещины на покрытии:
а – образование микротрещин при толщине около 0,8…0,9 мм (слой шлифован, ×100);
б – внешний вид микротрещины, ×200;
в – макротрещина в слое толщиной 1,1 мм (напыляемый материал DURMAT AS-897)

Материалы DURMAT AS-815 и DURMAT AS-760 позволяют получать покрытия большей толщины (до 2 мм), однако для этого необходимо уменьшать толщину формируемого за один проход слоя, увеличивать количество проходов и непрерывно контролировать температуру образца.

Для получения покрытий из материала DURMAT AS-897 толщиной 1,5 мм и более проведены эксперименты, в которых последовательно наносились слои из различных литых и порошковых проволок, а верхний слой формировался из AS-897 (рис. 4).

Рис. 4. Микроструктура многослойного покрытия

Анализ микроструктуры показал:

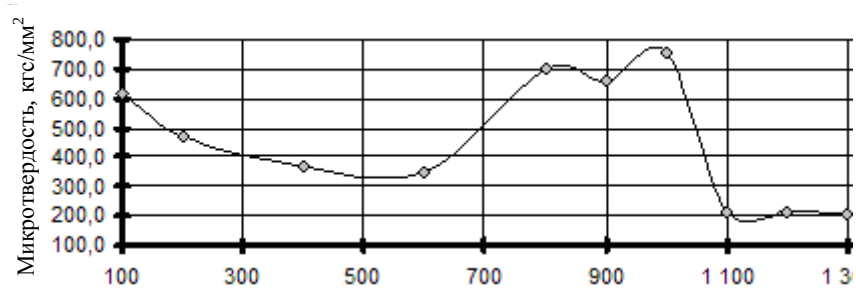
- в верхнем слое из AS-897 трещины отсутствуют;
- плотность напыленных слоев из стали 40Х13 и из порошковой проволоки 30Х20НМ близка к плотности компактного материала;
- в слое AS-897 присутствуют включения и поры, которые трудно различить друг от друга. Как правило, в газотермических покрытиях редко встречаются поры сферической формы, поскольку они образуются на границах деформированных при ударе частиц и имеют вытянутую форму.

Результаты исследования микротвердости напыленных слоев из материала AS-897 проиллюстрированы рисунком 5. Первый слой толщиной 100…120 мкм из AS-897, напыленный на подслой из Х20Н80, имеет наибольшую микротвердость, которая составляет 700…800 кг/мм^2 или 7000…8000 МПа (в переводе в единицы HRC (Роквелл, шкала С) это составляет 59…62 HRC). Последующие слои имеют твердость значительно ниже, что можно объяснить только влиянием температуры образца, накапливающейся с каждым последующим слоем. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости дискретного выполнения операции напыления и интенсивного охлаждения детали после напыления каждого слоя толщиной не более 120 мкм.

Результаты первых экспериментов по механической обработке покрытий показали, что для шлифования покрытий из материалов «Durum» необходимо выбирать конкретные специфические режимы и типы шлифовальных кругов. После использования обычных кругов для шлифовки литых сталей на поверхности покрытия появились мелкие впадины, похожие на поры (рис. 6, *б*). Особенно это характерно для проволок марок DURMAT AS-897 и Sulzer Metco 8297. После более тщательного анализа этих дефектов было установлено, что эти впадины не являются порами, а представляют собой пустоты, оставленные выкрашивающимися при шлифовании частицами карбидов, входящими в состав распыляемого

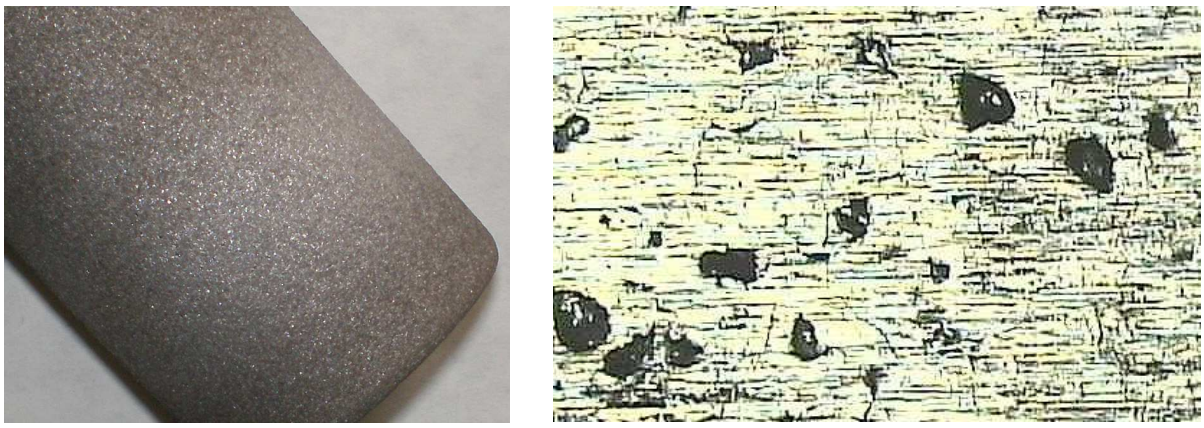
материала. В связи с отсутствием необходимых шлифовальных кругов дальнейшая обработка производилась вручную с помощью шлифовальных шкурок. Ручная обработка позволила получить поверхность без подобных дефектов.

а)



б)

Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине покрытий из материала AS-897:
а – покрытие, включающее подслой Х20Н80 (≈ 200 мкм),
слой DURMAT AS-897 (≈ 600 мкм), слой смеси AS-897 + 40Х13 (≈ 900 мкм);
б) покрытие, включающее подслой подслой Х20Н80 (≈ 200 мкм) и далее слой AS-897



а) *б*)

Рис. 6. Внешний вид напыленного покрытия (*а*) и поверхность после шлифования (×200)

Исследования коррозионной стойкости проводились путём помещения образцов с покрытием в атмосферу раствора хлористого натрия при повышенной температуре. После чего определялось время протекания коррозионных процессов в материале покрытия, приводящих к образованию дефектов на подложке. Результаты исследований показали, что наилучшей коррозионной стойкостью обладает покрытие из проволоки марки Castolin Eutectic 532, DURMAT AS-897 и Sulzer Metco 8297, так как после 80 часов испытаний признаков коррозии не обнаружено. Несмотря на высокие показатели коррозионной стойкости покрытий из композиционных проволок, их использование не всегда рентабельно из-за высокой стоимости (более 40 €/кг). Помимо этого, наличие твёрдых включений в покрытии приводит к интенсивному изнашиванию контртела в узле трения, что вызывает необходимость частой замены сальников гидроцилиндра, в котором используются штоки с напыленным покрытием. Эти причины обусловили необходимость проведения исследований с высокохромистыми литыми стальными проволоками.

Покрытия из проволочных сталей 40Х13 и 95Х18 наносились методом гиперзвуковой металлизации при давлении воздуха 0,35 МПа, давление пропана 0,37 МПа, напряжение дуги 32 В, дистанция напыления 100…120 мм. Использовались проволоки диаметром 1,6 мм. Триботехнические испытания образцов покрытия проводились на трибометре АТВП по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел (сухое трение) при средней скорости взаимного перемещения 0,1 м/с. Рентгеновские дифрактограммы от поверхностных слоев покрытий (дифрактометр «ДРОН-3», монохроматизированное $CoK_{\alpha\text{-излучение}}$) показали, что фазовый состав газотермического покрытия из стали 40Х13 после механической шлифовки включает: α-Fe (55 об. %); аустенит γ-Fe (11 об. %); оксиды Fe_3O_4 и FeO (34 об. %). Гиперзвуковое газотермическое покрытие из стали 95Х18 имеет следующий фазовый состав: α-Fe (7 об. %); γ-Fe (68 об. %); оксиды Fe_3O_4 и FeO (25 об. %). Характеристики напыленных покрытий проиллюстрированы данными таблицы.

Характеристики напыленных покрытий

Материал напыляемого покрытия	Фазовый состав	Твердость HV 10, кгс/мм^2	Интенсивность массового изнашивания I_q,·10^{-3}, мг/м
40Х13	α-Fe, γ-Fe, Fe_3O_4, FeO	600	4,5
95Х18	γ-Fe, α-Fe, Fe_3O_4, FeO	350	1,1

Отмечено, что после механической шлифовки в покрытии из стали 95Х18 по сравнению с покрытием из стали 40Х13 содержится большее количество γ-фазы, что связано с термической стабилизацией аустенита за счет повышенного содержания углерода в напыляемой стали 95Х18, а также низкой скоростью охлаждения газотермического покрытия в процессе напыления. При этом необходимо иметь в виду, что напыление частиц многослойного покрытия происходит на разогретые частицы предыдущих слоев, имеющих температуру 100…200 °С. Такие условия формирования покрытия обеспечивают замедленное его охлаждение в интервале температур повышенной устойчивости аустенита, что способствует стабилизации остаточного аустенита в напыленном слое. Из-за более низкой концентрации углерода в стали 40Х13 по сравнению со сталью 95Х18 мартенситное превращение в покрытии происходит более полно. В связи с этим в покрытии из стали 40Х13 регистрируется относительно более низкое содержание остаточного аустенита по сравнению с покрытием из стали 95Х18. Вследствие этого покрытие из стали 40Х13 имеет значение твердости поверхностного слоя 600 HV 10, а твердость гиперзвукового газотермического покрытия из стали 95Х18 составляет 350 HV 10 (см. таблицу).

Результаты триботехнических испытаний представлены на рисунке 7 и в таблице 1. Для сравнения представлены результаты триботехнических испытаний покрытия толщиной 25 мкм, полученного методом гальванического хромирования.

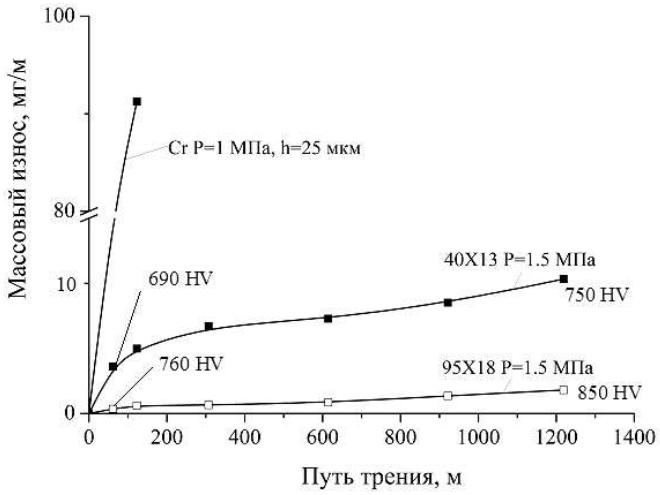


Рис. 7. Зависимость массового износа и микротвердости от пути трения для покрытий из сталей 40Х13, 95Х18 и гальванического хромового покрытия

Интенсивность массового изнашивания газотермического покрытия из стали 40Х13 составляет $I_q = 4{,}5 \cdot 10^{-3}$ мг/м. Покрытие из стали 95Х18 характеризуется более высокой износостойкостью по сравнению с покрытием из стали 40Х13. Интенсивность массового изнашивания составляет $I_q = 1{,}1 \cdot 10^{-3}$ мг/м.

Такая высокая износостойкость покрытия из стали 95Х18 достигается за счет деформационно-активированного γ→α превращения в поверхностном слое при трении. При этом на поверхности покры-

тия образуется тонкий слой с пониженным содержанием аустенита, характеризующийся высокой микротвердостью и износостойкостью. Увеличение микротвердости до 760 $HV_{0,02}$ наблюдается уже в начальной фазе трения, а после пути трения ≈ 1200 м микротвердость покрытия достигает 850 $HV_{0,02}$.

Такое же γ→α превращение и, соответственно, увеличение микротвердости в процессе трения происходит в покрытии из стали 40Х13, но с меньшей интенсивностью по сравнению с покрытием из стали 95Х18, что связано с более низким содержанием углерода в стали 40Х13.

Наименьшую износостойкость показало покрытие из гальванического хрома. При этом интенсивность изнашивания составила 17,4 мг/м. Это можно объяснить более рыхлой структурой покрытия, которая имеет низкое сопротивление адгезионному взаимодействию при трении без смазочного материала.

Заключение. В результате анализа полученных результатов установлено, что для формирования покрытий из композиционных порошковых проволок методом гиперзвуковой металлизации необходимо использовать проволоки с порошковым наполнителем, имеющим размер частиц менее 80 мкм, при этом за один проход наносить слои не более 100…120 мкм и охлаждать слои после каждого прохода до комнатной температуры. При необходимости нанесения покрытий из многокомпонентных порошковых проволок толщиной более 0,8 мм следует наносить многослойное покрытие, у которого нижележащие слои наносятся литыми стальными проволоками, а верхний слой из композиционного материала должен иметь толщину не более 0,5 мм.

Показано, что в механически шлифованном покрытии из стали 95Х18 регистрируется повышенное количество γ-фазы (68 об. %) по сравнению с покрытием из стали 40Х13 ($V_\gamma \approx 11$ об. %). Такое аномально высокое количество аустенита в гиперзвуковом газотермическом покрытии из стали 95Х18 связано с термической стабилизацией γ-фазы в процессе охлаждения после напыления. Высокая износостойкость покрытия из стали 95Х18 достигается в результате γ→α превращения в поверхностном слое в процессе трения, приводящего к увеличению микротвёрдости до 850 $HV_{0,02}$.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать технологию гиперзвуковой металлизации с использованием литых проволок из сталей мартенситного класса при изготовлении или для восстановления-упрочнения элементов гидросистем в качестве альтернативы гальваническому хромированию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепко, А.Е. Технологии гиперзвуковой металлизации / А.Е. Черепко, М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Механика-2011: сб. науч. докл. V Белорус. конгр. по теорет. и прикладной механике, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т.; Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 138–143.
2. Опыт применения гиперзвуковой металлизации для изготовления деталей карьерных самосвалов / М.А. Белоцерковский [и др.] // Композиционные материалы и защитные покрытия: сб. материалов междунар. науч.-техн. семинара, Минск, 27 нояб. 2012 г.; Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2012. – С. 211–214.

Поступила 16.06.2015

ESTIMATION OF USE THE HYPERSONIC METALLIZATION TO RESTORATION OF HYDRAULIC SYSTEMS ELEMENTS

M. BELOTSERKOVSKY, A. SOSNOVSKY, A. YALOVIK, A. DUDAN

The article describes the results of studies of chromium plating by hypersonic metallization. The possibilities of using powder composite wires and wires of cast steels was shown. It is proposed to replace the process of galvanic chrome plating on the technology of hypersonic metallization.

УДК 621.396.6

ПОВЫШЕНИЕ ВИБРОПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ МОБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Д.А. БЕРЖАНИН; д-р техн. наук, проф. В.Л. ЛАНИН
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Рассматривается задача повышения вибропрочности конструкций мобильных электронных систем на этапе их проектирования. Посредством анализа собственных частот и форм свободных механических колебаний элементов конструкции и электронных модулей с применением пакета ANSYS выявлены наиболее нагруженные элементы конструкции. Введение упрочняющих силовых элементов позволило снизить механические напряжения в зонах возможных разрушений в 1,2…2,0 раза.

Введение. Развитие межгосударственной стандартизации сделало возможным появление на рынке в широком ассортименте готовых корпусов и несущих конструкций электронной аппаратуры, а также разнообразных функционально и конструктивно законченных модулей, из которых можно собирать достаточно сложные системы. Проектировщику электронной аппаратуры в этой ситуации остается подобрать необходимые готовые модули, установить их в корпус, разработать проводной межблочный монтаж и программное обеспечение. В последующем принцип модульности позволяет легко изменять конфигурацию системы, снизить расходы на ее модернизацию и наращивать функциональные возможностей. В специальном оборудовании доля готовых функциональных модулей ниже, но и в этом случае в распоряжении разработчика есть готовые источники питания, фильтры электромагнитных помех, контроллеры, жидкокристаллические дисплеи с интегрированной схемой управления и другие типовые элементы.

Конструирование электронной аппаратуры, как и любой другой творческий процесс, является итерационным. Окончательное решение, как правило, требует проработать несколько возможных вариантов. Конструкция современных планшетов (как промышленных, так и коммерческих) в большинстве случаев модульная, с той или иной степенью разукрупнения. Считается, что чем больше функциональных модулей в устройстве и чем проще к ним доступ, тем лучше ремонтопригодность устройства. Рассматриваемая мобильная электронная система как раз представляет такой пример конструкции, где каждый модуль является логически продуманным и функционально завершенным с точки зрения выполняемых им функций (рис. 1).

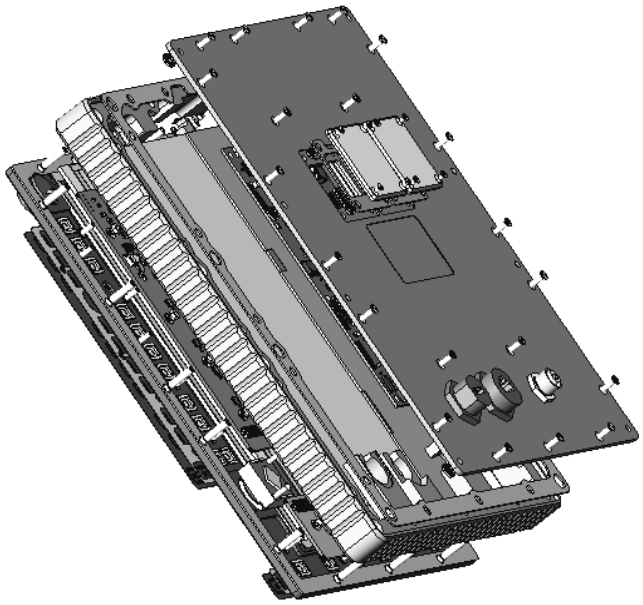


Рис. 1. Мобильная электронная система с разнесением модулей

Электрические соединения в устройстве представлены паяными соединениями элементной базы и жгутов, а также штыревыми и под плоский шлейф типами соединителей. Механические соединения – резьбовыми соединениями, запрессовкой, склеиванием и пайкой. Для испытаний на вибропрочность наибольшую значимость представляют места механических соединений модулей, крепление их к корпусу и соединения корпусных деталей.

От 30 до 50 % отказов мобильных систем вызывается механическими воздействиями. Наиболее опасными механическими воздействиями, ухудшающими надёжность и стабильность работы аппаратуры, являются вибрации, удары и линейные перегрузки. Источниками данных воздействий могут быть разного рода двигатели, в том числе и реактивные, быстро вращающиеся разбалансированные массы, дорожная тряска, акустические шумы, ударная волна и многие другие. В одних случаях они приводят к снижению точности работы аппаратуры, в других – к помехам в каналах передачи информации, так как параметры электронных компонентов и модулей могут претерпеть обратимые и необратимые изменения, а также к механическим разрушениям элементов конструкций [1].

Все испытания, проводимые на реальных образцах, несмотря на неразрушающие методы контроля механических напряжений, имеют недостаток – достаточно дорогостоящие, так как необходимо использовать готовый образец изделия, иметь соответствующее оборудование для испытаний и т.д. Поэтому в современной электронике используется моделирование большинства технологических процессов и конструкций.

Математическое моделирование позволяет составить описание функционирования конструкции или технологического объекта в условиях окружающей среды, определить выходные параметры и характеристики, получить оценку показателей эффективности и осуществить поиск оптимальной структуры и параметров объекта, что имеет большое значение для сокращения сроков освоения новых изделий в производстве [2].

В процессе эксплуатации мобильные электронные системы и их составные части – электронные модули – подвергаются воздействию механических нагрузок, в частности вибрационным воздействиям. Под действием веса крупногабаритных компонентов несущие элементы конструкции модулей – печатные платы – прогибаются и в них могут накапливаться остаточные механические напряжения. В этих случаях физическое состояние конструкции несущего элемента определяется его статическими характеристиками: жёсткостью, прочностью, уровнем статических деформаций. Причинами отказов и нарушений функционирования аппаратуры из-за механических воздействий могут быть: обрывы проводников в платах; обрывы межсоединений в многослойных печатных платах; нарушение паяных, клеевых и сварных соединений; отрывы элементов и т.д. Как правило, в момент возникновения резонанса амплитуда вибрации и ускорения в определённой области печатной платы по сравнению с амплитудой в точках крепления увеличивается в десятки раз. Наряду с резонансами несущих конструкций могут наблюдаться резонансы отдельных элементов. Однако чаще всего в диапазон действия резонансных частот попадают именно несущие конструкции (печатные платы, массивные электронные узлы), поскольку масса электронных компонентов мала и их собственные резонансные частоты лежат за пределами диапазонов воздействующих вибраций на аппаратуру [3].

Моделирование собственных резонансных частот мобильной электронной системы. Одним из важнейших показателей надежности функционирования устройства, закладываемого на этапе проектирования, является вибропрочность в заданном диапазоне частот. В правильно сконструированной аппаратуре собственная частота конструкции не должна находиться в спектре частот внешних воздействий. Хотя любая конструкция обладает несколькими значениями собственных частот, однако расчет выполняется только для низших значений, поскольку деформации конструкций в этом случае будут максимальными. Если низшее значение собственной частоты входит в диапазон внешних воздействий, то конструкцию дорабатывают с целью увеличения и выхода из спектра частот внешних воздействий. Поэтому на этапе проектирования необходим анализ свободных механических колебаний, который проводится с целью определения собственных частот и форм колебаний элементов конструкции. Расчет свободных механических колебаний проводится без учета динамических нагрузок, но является первым и обязательным шагом при решении более сложных динамических задач.

В качестве программы, позволяющей применить метод конечных элементов для поиска и анализа значений собственных частот и форм волн, выбран пакет ANSYS. Методика анализа колебаний включает: создание геометрической модели, задание свойств материалов и граничных условий, настройку опций расчета, выбор варианта закрепления конструкции (при необходимости), просмотр и анализ результатов.

Дифференциальное уравнение свободных колебаний является частным случаем общего уравнения движения [4]:

$$[M]\{\ddot{x}\}+[K]\{x\}=0, \tag{1}$$

где M – масса; K – коэффициент упругости.

В анализе свободных колебаний предполагается упругое поведение конструкции, поэтому ожидаемый отклик является гармоническим:

$$\{x\}=\{\phi_i\}\cos(\omega_i t). \tag{2}$$

Здесь ϕ_i определяет форму колебаний i-той моды; ω_i является собственной частотой это моды.

Поставив (2) в (1), получим уравнение, по которому рассчитывают свободные колебания элементов конструкции электронной системы:

$$([K]-\omega_i^2[M])\{\phi_i\}=0. \quad (3)$$

При расчете свободных колебаний закрепление конструкции не является обязательным условием расчета, как в задачах статики; форма свободных колебаний вычисляется в относительных единицах и не позволяет определить абсолютные смещения [5].

При анализе свободных колебаний к конструкции не прикладываются нагрузки, поэтому для расчета необходимо знать только модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность материалов (табл. 1).

Таблица 1

Свойства материалов конструкции

Материал	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м^3
Сталь	210000	0,3	7800
Алюминий	74000	0,34	2700
Полиамид	3000	0,31	1200
Оргстекло	31000	0,35	1200
Стеклотекстолит	21000	0,22	2050
Резина	900	0,5	1000
Пластик	1400	0,37	1000
Полиэтилентерефталат	3500	0,4	2100

В данном анализе объекты, напрямую не влияющие на вибропрочность устройства и имеющие незначительные массы, представлены условно. Платы печатные с элементной базой также изображены условно, так как их массовые характеристики не оказывают значительного влияния на расчет; их физические свойства, необходимые для расчета, усреднены. В анализе свободных вибраций, который проведен при температуре 22 °С, не задаются конструкционные и тепловые нагрузки, которые могут быть учтены только как предварительные.

В заданном диапазоне частот (от 0 до 150 Гц) при анализе было выявлено 6 резонансных частот. Три первые выявленные резонансные частоты близки к 0 Гц и соответствуют жесткому движению конструкции – нулевые значения колебаний со смещением положения сборки (табл. 2). В отличие от статического линейного анализа, при расчете свободных вибраций предотвращение жесткого движения тел обязательным условием не является [6].

Таблица 2

Резонансные частоты

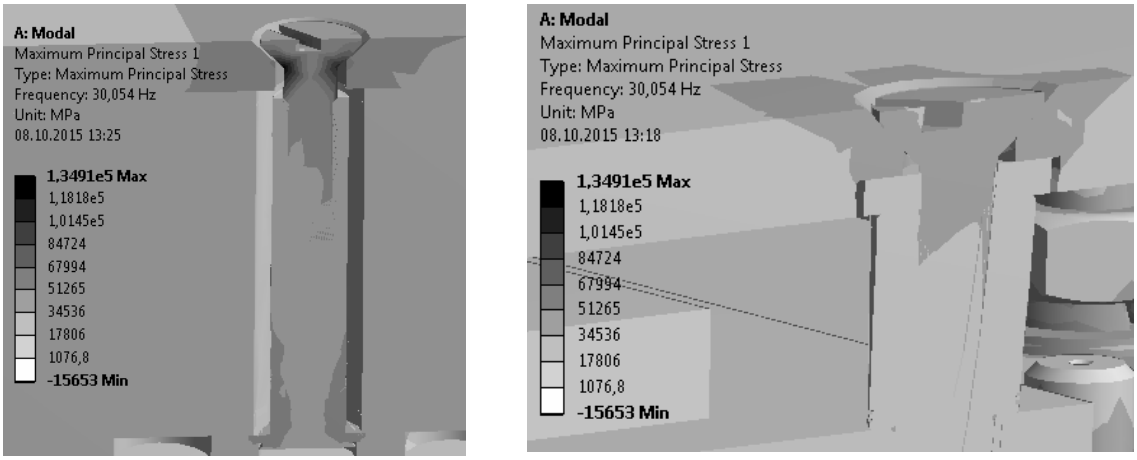
Резонанс	Частота, Гц
1	30,1
2	81,8
3	97,6

Первый резонанс панели мобильной электронной системы соотносится с частотой 30,1 Гц. При такой частоте максимум амплитуд приходится на углы устройства, минимум – на геометрический центр, при этом колебания имеют кольцевую направленность, фактически параллельную лицевой плоскости устройства. Так, на резонансной частоте 30,1 Гц наибольшие упругие колебания с учетом направления воздействия вибраций наблюдаются на элементах крепежа, выполняющих несущие функции внутри устройства. Несущие металлические пластины, находящиеся с лицевой и обратной стороны устройства, имеют минимальное напряжение и не подвержены колебаниям по меньшему габаритному размеру (по оси Z).

На резонансных частотах 81,8 и 97,6 Гц механические напряжения возникают на несущих пластинах, так как колебания направлены на их изгиб по меньшему габаритному размеру (по оси Z), и элементах крепежа, особенно на тех элементах, оси которых перпендикулярны направлению колебаний. Наибольшие значения механические напряжения имеют в местах соединения несущих пластин, крепления материнской платы к корпусу и крепления люков к задней крышке устройства.

Первый ответственный тип соединений (рис. 2, *а*) в рассматриваемой системе – *места соединения пластин* (потайные винты М3×12 в местах контакта с пластиной корпуса). Так, на резонансной частоте 30,1 Гц максимальная нагрузка приходится на винт и составляет 120 относительных единиц, на частоте 81,8 Гц – 69 единиц, на частоте 97,6 Гц – 160 единиц.

Второй ответственный тип соединений (рис. 2, *б*) – *места крепления материнской платы* (потайные винты М3×10 в местах контакта с пластиной корпуса).



а) *б*)

Рис. 2. Механические напряжения в соединениях:
«винт М3×12 – пластина корпуса» (*а*), «винт М3×10 – пластина корпуса» (*б*) на резонансной частоте 30,1 Гц

Результат моделирования позволяет сделать вывод, что напряжения, возникающие в конструкции, возрастают с увеличением резонансной частоты. Так, на резонансной частоте 30,1 Гц максимальная нагрузка на винт составляет 15 единиц, на частоте 81,8 Гц – 16, на частоте 97,6 Гц максимум нагрузки на кромку крепежного отверстия составляет 67 единиц.

Третий ответственный тип соединений (рис. 3) – *места крепления люков к корпусу* (потайные винты М2,5×4 в местах контакта с запрессованными втулками KF2-M2,5). На резонансной частоте 30,1 Гц максимальная нагрузка приходится на втулку и составляет 49 единиц, нагрузка на кромку отверстия – 15 единиц. На частоте 81,8 Гц максимальная нагрузка на втулку составляет 170 единиц, на кромку отверстия – 140 единиц. На частоте 97,6 Гц максимальная нагрузка на втулку снижается до 150 единиц.

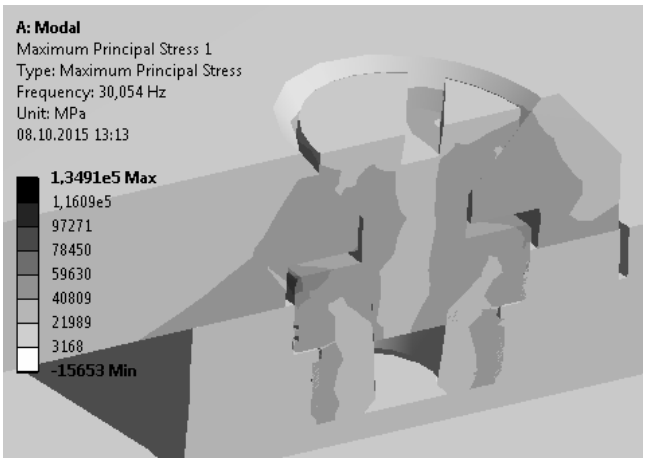


Рис. 3. Механические напряжения в соединении «винт М2,5×4 – втулка»
на резонансной частоте 30,1 Гц

Гистограммы распределения напряжений по типам соединений (в условных единицах) и по резонансным частотам устройства представлены на рисунках 4 и 5 соответственно.

Вместе с тем важно учитывать и минимальные нагрузки, так как слишком большое различие в распределении нагрузок на узел может оказаться наиболее разрушительным. Минимальные нагрузки

распространяются по элементам конструкции следующим образом: 1-я резонансная частота – потайные винты; 2-я резонансная частота – стойки CSS M3-20; 3-я резонансная частота – гайки KF2-M2,5.

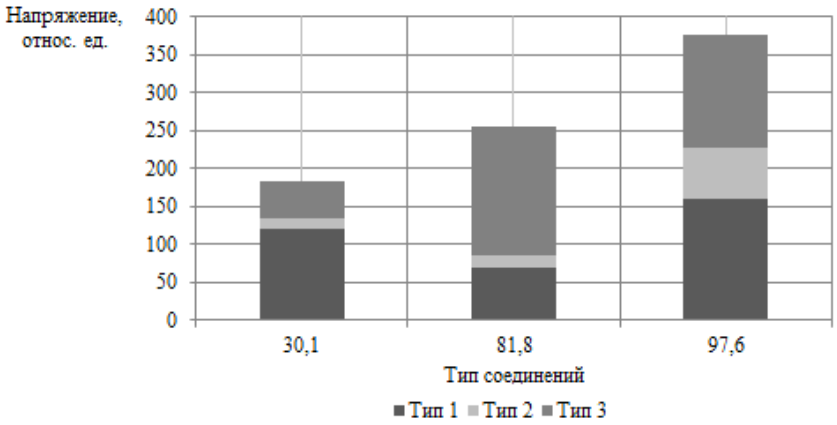


Рис. 4. Гистограмма распределения напряжений по типам соединений

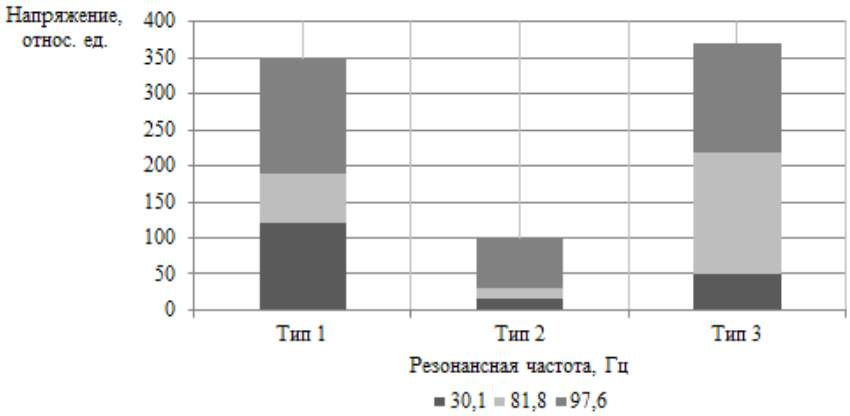


Рис. 5. Гистограмма распределения напряжений по резонансным частотам

Для увеличения вибропрочности в конструкции отдельных элементов вводятся дополнительные крепления, ребра и рельефы жесткости, отбортовки, выдавки, используются материалы с высокими демпфирующими свойствами, демпфирующие покрытия. Для первого типа соединений с целью предотвращения отвинчивания крепежных элементов использован анаэробный фиксатор. Для второго – увеличено количество соединений для крепления материнской платы и использован анаэробный фиксатор для предотвращения отвинчивания крепежных элементов. Для повышения вибропрочности резьбовых соединений третьего типа применен анаэробный фиксатор и уменьшена масса самих люков с целью уменьшения нагрузок на крепежные элементы.

После внесения корректировок в конструкцию крепежных элементов для первого типа соединений на первой резонансной частоте (30,1 Гц) максимальная нагрузка составила 120 единиц, для второй резонансной частоты (81,8 Гц) – 75, для третьей резонансной частоты (97,6 Гц) – 180 единиц. Для второго типа соединений максимальная нагрузка по частотам снизилась в 2 раза и составила 21, 18 и 9,7 единиц соответственно. Для третьего типа соединений нагрузка снизилась в 1,2 раза и составила по частотам: 46, 160 и 95 единиц соответственно.

Анализ результатов показал, что решения, связанные с анаэробным фиксатором в первом типе соединения, не снижают механических нагрузок на элементы соединений. Снижение уровня механических напряжений удалось достигнуть за счет введения упрочняющих элементов и снижения массы габаритных элементов конструкции. Так как мобильные электронные системы могут использоваться в различных внешних условиях, то дополнительно повысить вибропрочность механических соединений и модулей можно посредством воздействия на источник возбуждения с целью выхода его частот из резонансных частот устройства. Если это не представляется возможным, то необходимо обеспечить отбор энергии от колеблющейся системы с помощью демпфирования.

Заключение. Моделированием собственных резонансных частот и форм механических колебаний в пакете ANSYS удалось выявить наиболее уязвимые элементы мобильной системы, механические на-

пряжения в которых достигают предельных значений. Так как конструкция проектировалась с учетом всех возможных нагрузок и рисков, то все новые конструктивные решения были учтены на этапе разработки. Моделирование подтвердило закладываемые риски и показало места, в которых можно повысить вибропрочность механических соединений.

Необходимыми решениями по корректировке конструктива являются: увеличение крепежных отверстий под материнскую плату (тип 2), снижение массы люков (тип 3). После внесения указанных корректировок в модель удалось снизить нагрузку для второго типа соединений в 2 раза, для третьего типа – в 1,2 раза. Первый тип соединений остался самым нагруженным, среднее значение по всем резонансам составляет 125 единиц (это в 0,93 раза больше, чем в начальной модели).

Установлено, что для наиболее ответственных типов механических соединений мобильной электронной системы максимальные напряжения наблюдаются на частоте 97,6 Гц. После корректировки конструкции эта резонансная частота не изменилась, но уменьшилось среднее значение возникающих напряжений в элементах в 1,32 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малов, А.В. Параметрическая и структурная оптимизации конструкций радиоэлектронных средств на виброизоляторах в подсистеме АСОНИКА-В / А.В. Малов, А.С. Шалумов // Качество. Инновации. Образование. – 2010. – № 7. – С. 57–63.
2. Сирота, А.А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем / А.А. Сирота. – М.: Техносфера, 2006. – 280 с.
3. Ланин, В.Л. Конструкции электронных модулей. Оценка устойчивости к механическим воздействиям / В.Л. Ланин, В.В. Парковский // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2013. – № 3(44). – С. 148–153.
4. Полянин, А.Д. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики / А.Д. Полянин, В.Ф. Зайцев, А.И. Журов. – М.: Физматлит, 2005. – 256 с.
5. Kent, L.L. ANSYS Workbench Tutorial / L.L. Kent. – Arlington: University of Texas, 2005. – 76 p.
6. Бержанин, Д.А. Моделирование собственной резонансной частоты мобильной электронной системы / Д.А. Бержанин // Приборостроение-2014: материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф.: БНТУ. – Минск, 2014. – С. 254–256.

Поступила 03.04.2015

INCREASE VIBRATION STRENGTH OF MOBILE ELECTRONIC SYSTEMS DESIGNS

D. BERZHANIN, V. LANIN

The problem of increase vibration strength of mobile electronic systems designs at a stage of their designing is observed. By means of the analysis of own frequencies and free mechanical oscillations forms of members and electronic modules with application of ANSYS the most loaded members are revealed. Introduction of reinforcing load-bearing elements allowed to lower mechanical strength in zones of possible destructions in 1,2…2,0 times.

УДК 621.891.2

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТРИБОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН; А.А. ГУЩА
(Полоцкий государственный университет)

Рассматриваются методы и средства повышения надёжности и срока службы механизмов и машин, дана их характеристика. Отмечены основные факторы повышения надежности и долговечности машин, такие как обеспечение высоких технико-эксплуатационных показателей сопряженных поверхностей деталей на стадии приработки и в период их эксплуатации. Для улучшения этих процессов применяют приработочные и ремонтно-восстановительные составы, модифицирование наноразмерными алмазосодержащими добавками. Представлены основные исследования ведущих научных центров и специалистов по данной тематике. Выявлены их достоинства и недостатки. Исходя из анализа доказано, что представленные методы позволяют значительно повысить износостойкость механизмов и машин и их технико-эксплуатационные показатели.

Потери средств от трения и износа достигают 4…5 % национального дохода, а на преодоление сопротивления трения затрачивается во всем мире 20…25 % энергии, вырабатываемой за год [1]. Непрерывное повышение нагрузочно-скоростных режимов работы машин и механизмов требует постоянного совершенствования их конструкции, методов технического обслуживания и ремонта. Большое значение в деле повышения износостойкости имеет использование новых триботехнологий, современных смазочных материалов, разработанных на основе достижения триботехники.

Характеристика методов трибомодифицирования. Одним из факторов, влияющих на надежность и долговечность машин, выступает приработка сопряженных поверхностей деталей. Применение приработочных препаратов при изготовлении и ремонте машин и механизмов позволяет интесифицировать приработку, тем самым сократить продолжительность этапа приработки и продлить зону установившегося режима изнашивания. За счёт этого уменьшается число отказов машин и механизмов в период эксплуатации и повышается их срок службы. В качестве приработочных составов используют смазочные составы, содержащие твердые компоненты (карбиды, окиси кремния и др.), полимеры. Отрицательные эффекты, имеющие место при использовании приработочных абразивных составов, – это возможность внедрения частиц абразива в мягкие поверхности обрабатываемых пар трения и износ сопряженных твердых поверхностей.

При исчерпании доремонтного и межремонтного ресурса пар трения машин и механизмов применяют ремонтно-восстановительные составы (РВС), которые при эксплуатации образуют на поверхностях трения антифрикционные противоизносные покрытия длительного действия. Их применение позволяет восстановить изношенные поверхности трибосопряжений до первоначальных параметров. Стоимость ремонта по РВС-технологии в 2…3 раза ниже, чем при использовании обычных технологий, что позволяет заменить плановые ремонты планово-предупредительной обработкой с увеличением межремонтного срока в 1,52 раза [2]. Известные в настоящее время РВС по компонентному составу, физико-химическим процессам их взаимодействия с трущимися поверхностями можно разделить на три группы: реметаллизанты (металлоплакирующие составы), полимерсодержащие препараты и геомодификаторы.

Металлоплакирующие смазки могут быть использованы для всех типов узлов трения: крестовин, наконечников рулевых тяг, подшипников, шестерен и др. В состав таких смазок входят порошки металлов, их оксиды, сплавы, соли, комплексные и другие соединения. Механизм их действия заключается в металлоплакировании трущихся поверхностей вследствие осаждения металлических компонентов, входящих в их состав во взвешенном или ионном виде. При этом частично устраняются микродефекты, снижается коэффициент трения, значительно повышается износостойкость плакированных поверхностей, увеличивается интервал между заменами смазки, а также они успешно работают в тяжелонагруженных узлах трения. Однако для существования металлоплакирующего слоя необходимо постоянное присутствие реметаллизанта в масле.

Известно более 20 отечественных и несколько зарубежных препаратов металлоплакирующего действия. Наиболее распространены из них составы типа: РиМет, МКФ, МС, Lubrifilm metal (Швейцария); Remetallisant Moteur (Великобритания) и др.

В настоящее время для улучшения технико-эксплуатационных показателей трибосопряжений спектр материалов, вводимых в используемые смазочные композиции, расширяется, а также разрабатываются новые методы получения уже известных материалов. Например, предложена металлоплакирующая смазочная композиция, содержащая ультрадисперсный порошок меди, полученный с помощью электрического взрыва проводников [3]. Такой порошок имеет ряд специфических свойств: сферическая форма частиц ($d_{ср}$= 0,15 мкм), избыточная запасённая энергия, склонность к самоспеканию. За счёт этого достигается быстрая притирка поверхностей трения и образуется достаточно толстая сервовитная плёнка, в

результате чего происходит восстановление изношенных пар трения. На основе литола с применением высокодисперсного порошка-наполнителя (цинка, бронзы или свинца), полученного методом испарения и конденсации в атмосфере нейтрального газа на вакуумной установке, разработан состав, обеспечивающий безызносную работу пар трения в процессе их эксплуатации и позволяющий восстановить уже изношенную поверхность трения при одновременном сохранении основных технологических показателей смазки [4]. В патенте [5] авторы предлагают металлоплакирующую присадку, содержащую ультрадисперсные порошки (УДП) железа и алмаза. При совместном использовании УДП железа и УДП алмаза на поверхности трения образуется алмазометаллический композит, сочетающий высокую твёрдость (устойчивость к изнашиванию) и плакирующие свойства (толщина слоя до 4 мкм), чего не наблюдается при их раздельном использовании.

Ещё одним методом повышения долговечности трибосопряжений за счёт модифицирования поверхностей трения является применение металлопплакирующих смазок, в состав которых введены дисперсные ферромагнетики. Практическое значение имеют переходные металлы, а также некоторые их интерметаллические соединения, например железо-никель, железо-кобальт. Наиболее широко применяют магнетит. Он имеет хорошую адсорбционную способность по отношению к ПАВ, а также способен образовывать коллоидные дисперсии с высокой намагниченностью. Разделительный слой, образующийся в зоне контакта и препятствующий взаимодействию деталей узла трения в таких смазках, формируют частицы металлов или металлосодержащие соединения, заполняя микронеровности поверхностей трения и уменьшая тем самым величину контактного давления. В качестве таких добавок используют высокодисперсные порошки цинка, бронзы, меди, свинца и некоторые другие с размером частиц 10…100 мкм, соли монокарбоновых кислот с металлами или металлический порошок – промышленный отход электрохимического процесса гальваники (содержащий медь), смешанный с олеиновой кислотой. При формировании мелаллоплакирующей плёнки в зоне контакта происходит ускорение переноса магнитоактивных частиц из объёма смазки, что обеспечивает снижение износа, момента трения и повышения противозадирной стойкости узлов трения.

Для повышения надежности и экономичности двигателей применяют полимерсодержащие препараты, включающие в своем составе политетрафторэтилен (тефлон), поверхностноактивированный фторопласт-4, перфторпропиленоксид, перфторполиэфир карбоновой кислоты (эпилам), силикон и некоторые другие полимерные вещества. Эти препараты появились раньше остальных и изначально использовались для обеспечения кратковременного сохранения подвижности боевой техники в случае серьёзного повреждения масляной системы.

Наибольшее применение в качестве полимеробразующей композиции в смазочных материалах нашёл политетрафторэтилен, благодаря чему на поверхностях трения формируется тонкое (около 1 мкм) структурированное покрытие, обеспечивающее повышенную адгезию, противоизносный и антифрикционные эффекты. Эффективность препаратов определяется уровнем ультрадисперсности ПТФЭ, диспергированием частиц в растворителе, наличием ПАВ, усиливающих механическое взаимодействие. Недостаток выражается в необходимости их постоянного присутствия в масле и ядовитости некоторых продуктов их горения.

Зарубежными и отечественными учёными разработано множество различных композиций на основе минералов естественного и искусственного происхождения, получивших наименование «геомодификаторы». Попадая на поверхности трения вместе с маслом или в составе пластичной смазки, они инициируют процесс формирования на трущихся поверхностях наноразмерной структуры с высокой износостойкостью и малым коэффициентом трения. В результате применения концентрированной взвеси геомодификатора трения (ГМТ) на основе серпентина с дисперсностью природного минерала 0,01…5 мкм в двигателях, механизмах и устройствах на 50…70 % снижается износ узлов трения, в 1,5…2 раза потери на трение и на 50…100 % виброактивность [6]. Это обусловлено увеличением фактической площади контакта и формированием на исходной структуре динамического ультратонкого слоя углеводородных цепочек, частиц ГМТ и продуктов износа менее микрометра (квазисжиженный слой).

На основе серпентина и сопутствующих ему примесей разработан состав [7] для обработки пар трения, который включает мелкодисперсный порошок алмаза или шунгита, а также металлосодержащую добавку – смесь мелкодисперсных порошков металлов, выбранных из металла основы и металлов, образующих устойчивые системы с материалом основы, взятых из ряда Cr, Ni, Mo, Nb, Ti, и их сплавы. Такое сочетание компонентов обеспечивает формирование прочносвязанного с поверхностью трения модифицированного упрочненного поверхностного слоя заданного состава, за счет чего достигается стабильное уменьшение износа и коэффициента трения, улучшение технических показателей механизмов и машин. Например, для пары трения сталь 45 – сталь 45, поверхности которой обработаны таким составом, характерны следующие технико-эксплуатационные показатели: твёрдость 390…410 HRC, коэффициент трения 0,006…0,008 компенсация износа 1…3 мм [7]. Однако при применении геомодификаторов в узлах и механизмах нередко наблюдается потеря температурной стабильности и, как следствие, многочисленные случаи их выхода из строя по причине перегрева пар трения, а также значительное увеличение расхода масла.

Один из путей повышения качества и износостойкости рабочих поверхностей деталей на стадии изготовления (восстановления) и в период их эксплуатации – применение финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО). Сущность ФАБО состоит в том, что поверхности стальных или чугунных деталей после их традиционной окончательной обработки резанием покрывают тонким слоем (1…3 мкм) антифрикционного медьсодержащего покрытия путём трения. При этом используют явление избирательного переноса металла при трении.

К достоинствам использования процесса ФАБО относятся: низкий расход материала и механической энергии; безвредность для окружающей среды; короткая продолжительность нанесения покрытия (несколько секунд и минут); стабильное и хорошее качество покрытия; экономическая целесообразность при большом и небольшом числе изделий.

Применение ФАБО совместно с металлоплакирующими составами позволяет увеличить срок службы трибосопряжений в 2…2,5 раза. Однако это возможно только при постоянном наличии металлоплакирующих составов в зоне контакта поверхностей трения.

Метод плакирования гибким инструментом, основанный на использовании в стандартных технологиях шлифования в качестве инструмента вместо абразивных кругов дисковых проволочных щеток, изготовленных из металлов и сплавов, формирующих металлоплакирующий слой на рабочей поверхности обрабатываемой детали, позволяет интенсифицировать ФАБО, повысить производительность и улучшить экономические показатели металлоплакирования узлов трения. Повысить качество и производительность процесса ФАБО возможно и за счёт применения вибрации (осцилляции) инструмента – способ ФАБВО (финишная антифрикционная безабразивная вибрационная обработка)

Автором [8] предложен новый способ повышения послеремонтного ресурса деталей автомобильного двигателя: сочетание ФАБО и эпиламирования трущихся поверхностей деталей, который назван ФАБО-эпиламированием. Сущность способа заключается в нанесении поверхностно-активного вещества (эпилама) на поверхности пар трения после применения ФАБО. При этом на поверхности детали образуется тонкая пленка перфторполиэфира карбоновой кислоты, обеспечивающая низкий коэффициент трения соединения, а также предохраняющая детали от коррозии и водородного износа. Применение ФАБО-эпиламирования позволяет: снизить износ соединений в 5…5,7 раза; повысить эффективную мощность двигателя ЗМЗ-5Э на 7,5 %; повысить давление масла в главной магистрали двигателя ЗМЗ-5Э на 9 %; снизить расход топлива двигателя ЭМЗ-53 на 3 %.

В настоящее время учеными всего мира большое внимание уделяется нанотехнологиям. С целью повышения противоизностных и антифрикционных свойств смазочных материалов применяют их модифицирование наноразмерными алмазосодержащими добавками. Используют как синтетический, так и природный технический алмазный порошок. Это позволяет расширить диапазон их рабочих температур и нагрузок. Однако следует отметить, что использование в качестве добавки природного технического алмазного порошка приводит к необходимости тщательного отбора и контроля однородности применяемого природного материала как по размерам частиц, так и по их составу.

Представленные в работе [9] результаты исследований показывают, что введение ультрадисперсного порошка алмазографита (УДП-АГ) в пластичную смазку ЦИАТИМ-201 повышает её антифрикционные свойства, позволяет снизить рабочую температуру узла трения на 13…15 %, коэффициент трения скольжения на 25…32 % и уменьшить шероховатость трущихся поверхностей в 1,5…2 раза. В составе смазочных материалов УДП-АГ часто применяют в сочетании с другими ультрадисперсными добавками и присадками. В этом случае характер их взаимодействия и концентрация определяют свойства смазочных материалов, а также технико-эксплуатационные показатели обработанных таким составом поверхностей трения. При совместном использовании УДП железа и УДП-АГ на поверхности трения образуется алмазометаллический композит, сочетающий высокую твёрдость (устойчивость к изнашиванию), плакирующие свойства (толщина слоя до 4 мкм), а также обеспечивающий синергетический эффект (коэффициент трения на стадии приработки не превышает 0,23 для пары «сталь 3 – сталь 3») [10]. Исследования смазочного материала, содержащего УДП-АГ (0,2…5 %) в сочетании с высокодисперсной солью сульфата олова, показывают уменьшение интенсивности изнашивания в 2 раза и коэффициента трения на 12…15 %. В то же время нагрузочная способность возрастает на 25 %. В случае уменьшения концентрации УДП-АГ происходит режим трения обычный для смазки без присадок. Если концентрация будет больше 5 %, то трение переходит в режим неустойчивого граничного трения, сопровождающегося ростом коэффициента трения и износа [11].

Сотрудниками научно-производственного объединения «Алтай» разработана и проведена серия промышленных испытаний антифрикционной смазки для абразивной обработки материалов, в состав которой включены ультрадисперсный алмаз и дисульфид молибдена. В результате, применение смазки с кластерными алмазами позволяет повысить эффективность операции шлифования и заточки на 10…25 %, чистоту обрабатываемой поверхности в 1,5…2 раза с одновременным улучшением экологических условий ведения работ [12].

Заключение. Рассмотренные в статье методы и средства трибомодифицирования поверхностей трения позволяют значительно повысить их износостойкость (до 70 %), технико-эксплуатационные пока-

затели в 1,5…2 раза, сократить продолжительность и улучшить качество их приработки, понизить температуру работающих узлов (до 15 %), уровень шума и вибрации, что существенно влияет на повышение надёжности и срока службы механизмов и машин.

Модифицирование пластичных смазочных материалов наноразмерными алмазосодержащими добавками обеспечивает повышение противозадирных свойств, оказывает приработочный эффект за счет повышения твердости контактирующих поверхностей при измельчении структуры поверхности трения в процессе интенсивной пластической деформации микронеровностей под воздействием твердых частиц алмаза и в результате дисперсного упрочнения при внедрении частиц алмаза в поверхность трения. Также способствует снижению коэффициента трения в результате уменьшения шероховатости поверхности трения и частичной замене трения скольжения на трение качения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарукнов, Д.И. Триботехника, конструирование, изготовление и эксплуатация машин / Д.И. Гарукнов. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 629 с.
2. Кочанов, Д.И. Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения: состояние и перспективы применения / Д.И. Кочанов // РИТМ. – М.: МИПК МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – № 8(56). – С. 16–21.
3. Состав для обработки пар трения и способ его изготовления: пат. 2168662 РФ, МПК С10М 125/04. / А.П. Ильин [и др.]; заявитель Республ. науч.-техн. центр по восстановлению и упрочнению деталей машин и механизмов СО РАН. – № 4827712/04; заявл. 22.05.1990; опубл. 10.02.1996 // Бюл. № 16.
4. Пластичный металлоплакирующий состав: пат. 2139920 РФ, МПК С10М 125/04. / И.В. Фришберг [и др.]; заявитель И.В. Фришберг. – № 98103404/04; заявл. 24.02.1988; опубл. 20.10.1999 // Бюл. № 11.
5. Металлоплакирующая присадка: пат. 2178803 РФ МПК С 10М 125/02. / Е.В. Никитин [и др.]; заявитель Гос. предприятие «Комбинат “Электрохимприбор”». – № 99126880/04; заявл. 16.12.1999; опубл. 27.01.2002 // Бюл. № 3.
6. Состав смазочных материалов: пат: 2176267 РФ МПК С 10М 125/26. / Ю.Г. Лавров, В.Н. Половинкин; заявитель Военно-морская акад. им. Адмирала Флота Сов. Союза Н.Г. Кузнецова. – № 2000104440/04; заявл. 22.02.2000; опубл.27.11.2001 // Бюл. № 2.
7. Состав для обработки пар трения: пат. 2168662 РФ МПК С 10М 125/02. / С.Н. Александров [и др.]; заявитель С.Н. Александров. – № 2000115545/04; заявл. 15.06.2000; опубл. 10.06.2001 // Бюл. № 4.
8. Харченко, М.М. Повышение послеремонтного ресурса деталей автомобильных двигателей (на примере ЗМЗ-53) эпиламированием и ФАБО-эпиламированием: автореф. дис. …. канд. техн. наук: 05.20.03 / М.М. Харченко; Моск. гос. агроинж. ун-т им. В.П. Горячкина. – М.: 2002. – 17 с.
9. Докшанин, С.Г. Повышение свойств пластичных смазочных материалов применением ультродисперсного наполнителя / С.Г. Докшанин; ФГАОУ ВПО СФУ, г. Красноярск. – 2010. – С. 341–345.
10. Антифрикционная присадка: пат. 2225879 РФ МПК С 10М 125/00. / Л.А. Поляков [и др.]; заявитель Федеральное гос. унитарное предприятие «Комбинат “Электрохимприбор”». – № 042002121965/04; заявл. 12.08.2002; опубл.20.03.2004 // Бюл. № 3.
11. Пластичная смазка: пат. 2163921 РФ МПК С 10М 125/00 / С.И. Щелканов [и др.]; заявитель Красноярский гос. техн. ун-т. – № 99110709/04; заявл. 12.05.1999; опубл. 10.03.2001 // Бюл. № 6.
12. Антифрикционная смазка для абразивной обработки материалов: пат. 2030449 РФ МПК С 10М 125/02 / А.И. Баранов [и др.]; заявитель Науч.-производств. объединение «Алтай». – № 4931340/04; заявл. 26.04.1991; опубл. 10.03.1995 // Бюл. № 5.

Поступила 06.07.2015

METHODS AND MEANS TRIBOMODIFITSIROVANIYA FRICTION

A. DUDAN, A. HUSHCHA

The characteristic of methods and means of improving the reliability and service life of machines and mechanisms. It noted the main factors increasing the reliability and durability of machines, such as providing high technical and operational parameters of the mating surfaces of parts on the stage of running and during their operation. To improve these processes and apply Break-damage control compositions, modification of diamond nano-sized additives. The main study of leading research centers and experts on the subject. Identified the advantages and disadvantages of these methods. Based on the analysis proved that the presented methods can significantly improve the wear resistance, technical and operational performance.

УДК 621.791/052.4/1:669.715

ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТОНКОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

канд. техн. наук А.Г. ПОКЛЯЦКИЙ
(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев)

Определены оптимальные параметры режимов сварки трением с перемешиванием широко используемых при изготовлении сварных конструкций алюминиевых сплавов различных систем легирования толщиной 0,8…3,0 мм. Показано, что при сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов качественное формирование швов можно обеспечить за счет правильного выбора глубины погружения инструмента в свариваемый металл, частоты вращения инструмента и скорости его линейного перемещения вдоль стыка или скорости сварки. Установлена взаимосвязь между суммарным содержанием легирующих и модифицирующих элементов в свариваемом алюминиевом сплаве, скоростью сварки и частотой вращения инструмента. Определен диапазон оптимальных соотношений, выражающих длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот, в котором обеспечивается качественное формирование швов тонколистовых алюминиевых сплавов АМцН, АД33, АМг2М, 1460, АМг5М, 1201 и АМг6М. Получены формульные зависимости в виде степенных функций, ограничивающие этот диапазон и позволяющие рассчитать необходимые скорости вращения и перемещения инструмента для любого алюминиевого сплава, содержащего 2,2…8,4 % легирующих и модифицирующих элементов.

Введение. Сварка трением с перемешиванием (СТП), являющаяся одним из новейших способов получения неразъемных соединений в твердой фазе, находит все более широкое применение в судостроении, при изготовлении наземного и воздушного транспорта, космической техники и т. п. [1–4].

Образование шва в результате нагрева за счет трения до пластического состояния, перемешивания и пластического деформирования небольшого объема металла соединяемых деталей в замкнутом пространстве обеспечивает некоторые преимущества этого процесса по сравнению со сваркой плавлением. В первую очередь, это даёт возможность избежать дефектов в виде горячих трещин, пор, макровключений оксидной плены и т.п., обусловленных расплавлением и кристаллизацией металла. Кроме того, сварка алюминиевых сплавов осуществляется без применения защитного газа и присадочного материала и позволяет избежать ультрафиолетового излучения, выделений дыма и паров металла. При этом обеспечиваются высокие механические свойства соединений, а степень разупрочнения основного материала и деформирование сварных конструкций снижаются [3; 5–8].

Однако, как и при любом способе сварки, получить бездефектные соединения при СТП удается только при определенных параметрах процесса. Неправильный выбор или отклонение их от оптимального значения может приводить к образованию характерных поверхностных или внутренних дефектов в виде грата, несплавлений и несплошностей [9–11].

Основными параметрами процесса СТП, кроме конструктивных особенностей рабочих поверхностей инструмента, принято считать: угол наклона инструмента относительно вертикальной оси, усилие прижатия инструмента к поверхностям соединяемых деталей, величина погружения бурта инструмента и глубина проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл, а также скорости вращения и его линейного перемещения (скорости сварки) [5; 9].

Проведенные зарубежными специалистами исследования показали, что сварку необходимо выполнять «углом вперед», отклоняя инструмент под небольшим углом от вертикальной оси. При этом за счет прикладываемого к инструменту усилия в вертикальной плоскости его бурт незначительно погружается в свариваемый металл и удерживается в плотно прижатом к нему состоянии в процессе сварки. Наконечник инструмента должен обеспечивать перемешивание металла по всей толщине свариваемых кромок, чтобы избежать дефекта в виде несплавления в нижней части шва [12–15]. Скорости вращения и линейного перемещения инструмента в значительной степени определяют объем пластифицированного металла в зоне сварки и температуру его нагрева. Они могут изменяться в достаточно широком диапазоне в зависимости от толщины свариваемого материала, его теплофизических и пластических характеристик, а также траектории перемещения пластифицированного металла, определяемой конструктивными особенностями рабочих поверхностей инструмента [9; 16]. Некоторые исследователи определили оптимальные соотношения между скоростями сварки и частотами вращения инструмента, выражающими длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот, в зависимости от толщины свариваемого материала или температурного интервала кристаллизации алюминиевых сплавов [14; 17].

Цель данной работы – определить оптимальные параметры режимов сварки трением с перемешиванием широко используемых при изготовлении сварных конструкций алюминиевых сплавов различных систем легирования толщиной 0,8…3,0 мм.

Методика проведения исследований. Сварку трением с перемешиванием листов из алюминиевых сплавов АМцН, АД33, АМг2М, АМг5М, АМг6М, 1201, 1460 и Д16 толщиной от 0,8 до 3,0 мм выполняли на лабораторной установке, сконструированной в ИЭС им. Е.О. Патона. Для получения стыковых соединений использовали специальный инструмент с диаметром бурта 12 мм и наконечником конической формы [18]. Длину наконечника инструмента выбирали таким образом, чтобы она была на 0,15 мм меньше толщины свариваемого металла. Сварку выполняли углом вперед при наклоне инструмента относительно вертикальной оси на 2…3°. Вращение инструмента осуществлялось с помощью сменных серийных асинхронных электродвигателей переменного тока (U = 380 В) мощностью 4 кВт и частотой вращения вала 1420 и 2880 об/мин, устанавливаемых на суппорте. С помощью последнего закрепленный на валу электродвигателя инструмент перемещался в вертикальной плоскости, благодаря чему обеспечивалось необходимое заглубление его рабочих частей в свариваемый материал и поддерживалась постоянной величина осевого усилия его прижатия к соединяемым деталям в процессе сварки. Свариваемые листы надежно фиксировались на стальной подкладке подвижного стола. При этом скорость сварки можно было изменять в пределах 2…42 м/ч. Специально установленный впереди инструмента прижимной ролик препятствовал изменению в процессе сварки пространственного положения кромок слишком чувствительного к тепловому воздействию тонколистового материала.

Наличие макродефектов в виде грата и несплавлений на поверхностях сварных соединений определяли с помощью визуального контроля. Внутренние дефекты выявляли на поперечных шлифах, предварительно подготовленных с помощью электролитического полирования и дополнительного травления их в растворе хлорной, азотной и плавиковой кислот, используя оптический микроскоп МИМ-8М.

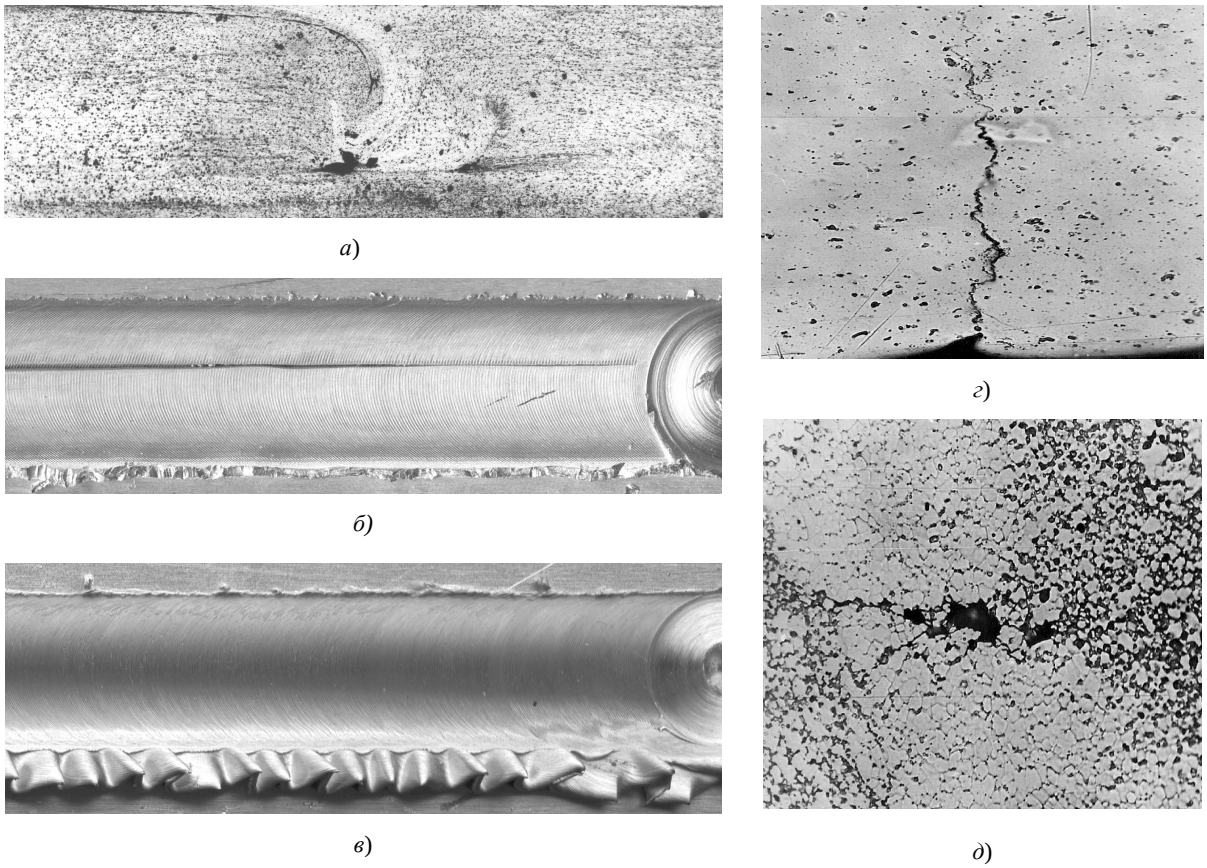
Результаты исследований и их обсуждение. В результате проведенных исследований установлено, что при сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов качественное формирование швов можно обеспечить за счет правильного выбора глубины погружения инструмента в свариваемый металл, частоты вращения инструмента и скорости его линейного перемещения вдоль стыка или скорости сварки ($V_{св}$).

Глубина погружения инструмента обусловливает термодеформационные условия во всех зонах сварного соединения, поскольку одновременно предопределяет величину погружения бурта инструмента и глубину проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл. Снижение её (< 0,10 мм) приводит к уменьшению величины заглубления бурта и глубины проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл. Как результат, давление под рабочей поверхностью бурта и наконечника инструмента и величина тепловыделения в месте контакта их со свариваемым металлом уменьшаются. Вследствие этого в зоне формирования неразъемного соединения не обеспечивается необходимый для качественного формирования шва объем пластифицированного металла или не достигается требуемый уровень его пластификации, что может привести к образованию внутренних дефектов в виде несплошностей (рис. 1, *а*) или поверхностных дефектов с лицевой стороны шва в виде несплавления (рис. 1, *б*). Кроме того, в результате уменьшения глубины проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл и выделяемого при его трении тепла, в корневой части шва также могут возникать поверхностные дефекты в виде несплавления (рис. 1, *г*). К ухудшению качества сварных соединений может приводить и чрезмерное (> 0,15 мм) заглубление инструмента. Так, при сварке пластичных низколегированных алюминиевых сплавов (АМцН, АД33, АМг2М) на лицевой поверхности шва могут образовываться поверхностные дефекты в виде грата (рис. 1, *в*), а при сварке более прочных сплавов – внутренние несплошности, обусловленные перегревом металла (рис. 1, *д*). Поэтому для обеспечения качественного формирования швов необходимо погружать инструмент в свариваемый металл на глубину 0,10…0,15 мм и в процессе сварки за счет осевого усилия прижатия поддерживать его в таком положении.

Условия пластического деформирования металла в зоне образования неразъемного соединения определяются температурой его нагревания и скоростью деформирования, которые зависят от частоты вращения инструмента и скорости его линейного перемещения вдоль стыка. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что качественное формирование швов при сварке трением с перемешиванием различных алюминиевых сплавов обеспечивается при разных значениях этих параметров. Так, при частоте вращения инструмента N =1420 об/мин пластичные низколегированные алюминиевые сплавы успешно свариваются при достаточно высоких скоростях сварки.

Для получения качественных соединений на более прочных алюминиевых сплавах, содержащих значительное количество легирующих и модифицирующих элементов, необходимо снижать скорость сварки. Например, в швах алюминиево-литиевого сплава 1460 внутренние дефекты в виде пустот, обусловленные недостаточным объемом пластифицированного металла в зоне формирования неразъемного

соединения, образуются при перемещении инструмента вдоль шва со скоростью более 20 м/ч, а в швах сплава 1201 – более 14 м/ч.



а)

б)

в)

г)

д)

Рис. 1. Характерные дефекты, образующиеся в швах, полученных сваркой трением с перемешиванием: *а* (×15), *д* (×500) – внутренние несплошности; *б* (×2) – несплавление с лицевой поверхности шва; *в* (×2) – грат на лицевой поверхности шва; *г* (×300) – несплавление в корневой части шва

При повышении частоты вращения инструмента до 2880 об/мин тепловыделение в зоне образования неразъемного соединения возрастает, что позволяет увеличить в два раза скорость линейного перемещения инструмента без ухудшения качества швов. Учитывая такую взаимосвязь между отмеченными параметрами процесса, использовали соотношение $V_{св}/N$, выражающее длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот. Проведенные экспериментальные исследования позволили определить оптимальные значения этого соотношения в зависимости от суммарного содержания легирующих и модифицирующих элементов в свариваемых алюминиевых сплавах (рис. 2).

Установлено, что при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава АМцН, содержащего около 2,2 % легирующих и модифицирующих элементов, качественное формирование швов обеспечивается при величине соотношения $V_{св}/N$ в пределах 0,094…0,481 мм/об. То есть при частоте вращения инструмента 1420 об/мин скорость сварки может изменяться в пределах 8…41 м/ч. Для сплава АД33, в котором содержание таких элементов составляет около 3,2 %, диапазон оптимальных соотношений $V_{св}/N$ сокращается до 0,094…0,423 мм/об, что при вышеупомянутой частоте вращения инструмента позволяет успешно выполнять сварку на скоростях 8…36 м/ч. Качественное формирование швов на сплаве АМг2М, содержащем еще большее количество легирующих и модифицирующих элементов (4 %), достигается при величине соотношения $V_{св}/N$ в пределах 0,094…0,376 мм/об или при $V_{св}$ = 8…32 м/ч.

Для более прочных алюминиевых сплавов, содержащих значительное количество легирующих и модифицирующих элементов, диапазон оптимальных соотношений $V_{св}/N$, при которых обеспечивается качественное формирование швов, становится значительно уже. Так, для сплава 1460, в состав которого кроме алюминия входит около 6,2 % других элементов, он составляет 0,070…0,233 мм/об. То есть при частоте вращения инструмента 1420 об/мин скорость сварки должна находиться в пределах 6…20 м/ч, а при 2880 об/мин – 12…40 м/ч. На сплаве АМг5М, содержащем 7,2 % легирующих и модифицирующих элементов, качественное формирование швов обеспечивается при $V_{св}/N$ = 0,058…0,187 мм/об или при

скоростях сварки 5…16 и 10…32 м/ч, когда частота вращения инструмента составляет 1420 и 2880 об/мин соответственно. Еще более легированный сплав 1201, содержащий кроме алюминия 7,7 % других элементов, удается успешно сваривать при величине линейного перемещения инструмента за один его оборот в пределах 0,047…0,163 мм, что соответствует скоростям сварки 5…14 м/ч при частоте вращения инструмента 1420 об/мин и 10…28 м/ч при 2880 об/мин. Для сплава АМг6М, содержащего около 8,4 % легирующих и модифицирующих элементов, оптимальное соотношение $V_{св}/N$ находится в диапазоне 0,047…0,140 мм/об. То есть скорость сварки может изменяться в пределах 4…12 м/ч при частоте вращения инструмента 1420 об/мин или 8…24 м/ч при 2880 об/мин.

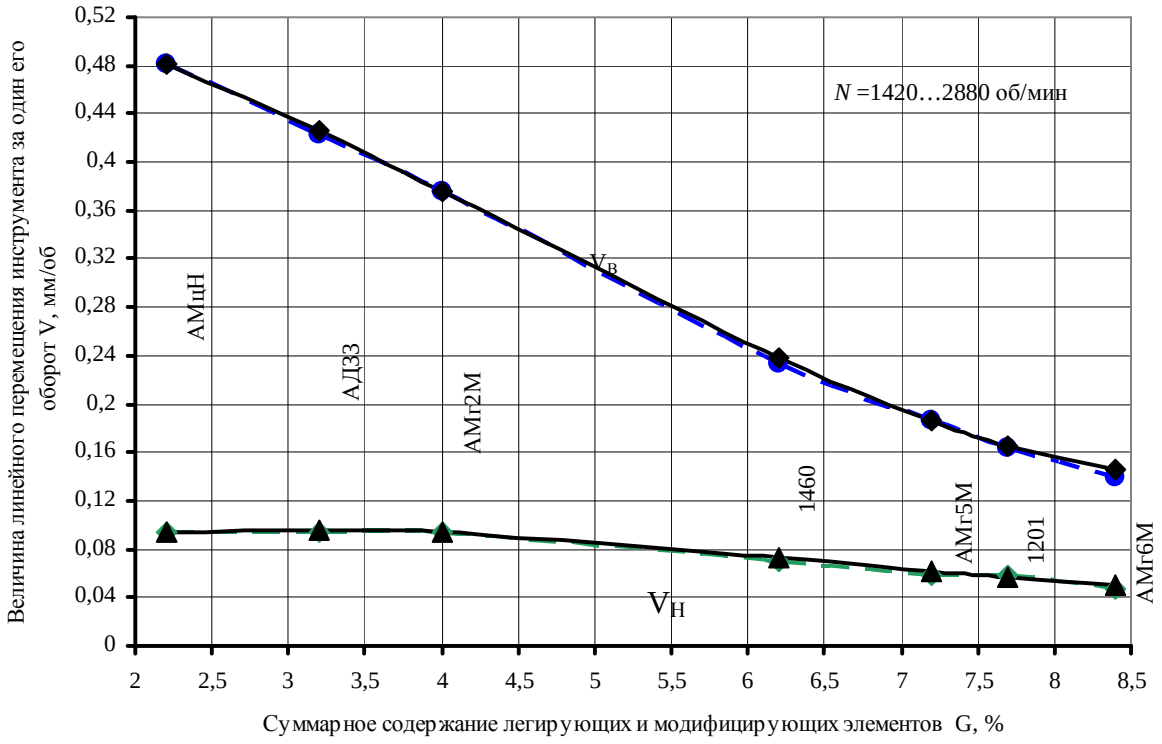


Рис. 2. Диапазон оптимальных соотношений скоростей сварки и частот вращения инструмента при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов с различным содержанием легирующих и модифицирующих элементов и ограничивающие его аппроксимированные кривые

Полученные эмпирические кривые, ограничивающие диапазон оптимальных соотношений между длиной линейного перемещения инструмента за один его оборот и суммарным содержанием легирующих и модифицирующих элементов в сплаве, аппроксимировали степенными функциями. Для кривой, ограничивающей верхнюю границу этого диапазона, такая функция будет выражаться следующим образом:

$$V_B(G) = V_{B0}[1{,}46 - 0{,}08G / G_0 - 0{,}541(G / G_0)^2 + 0{,}16(G / G_0)^3], \quad (1)$$

где $V_B(G)$ – максимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот, при которой обеспечивается качественное формирование швов, мм/об; V_{B0} = 0,376 мм/об – максимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот для сплава АМг2М; G_0 – суммарное содержание легирующих и модифицирующих элементов в алюминиевом сплаве АМг2М (G_0 = 4 %); G – суммарное содержание легирующих и модифицирующих элементов в свариваемом алюминиевом сплаве, % в диапазоне 2,2…8,4 %.

Для кривой, ограничивающей нижнюю границу указанного диапазона, аппроксимированную зависимость можно выразить формулой

$$V_H(G) = V_{H0}[0{,}64 + 1{,}12G / G_0 - 0{,}972(G/G_0)^2 + 0{,}197(G/G_0)^3], \quad (2)$$

где $V_H(G)$ – минимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот, при которой обеспечивается качественное формирование швов, мм/об; V_{H0} = 0,094 мм/об – минимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот для сплава АМг2М.

Представленные на графике (см. рис. 2) сплошными линиями кривые, полученные с использованием аппроксимированных формульных зависимостей, практически совпадают с пунктирными кривыми, построенными по результатам экспериментальных исследований. Поэтому при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов, содержащих суммарное количество легирующих и модифицирующих элементов в пределах 2,2…8,4 %, диапазон оптимальных соотношений между скоростями линейного перемещения и частотами вращения инструмента, при которых обеспечивается качественное формирование швов, можно определять с помощью приведенных выше формул.

Увеличение или уменьшение установленных оптимальных соотношений $V_{св}/N$ для алюминиевых сплавов, содержащих определенное количество легирующих и модифицирующих элементов, вызывает образование дефектов в швах. Превышение установленной максимально допустимой скорости перемещения инструмента за один его оборот на 10…20 % приводит к появлению в швах внутренних несплошностей (см. рис. 1, *а*), обусловленных недостаточной пластификацией металла в зоне сварки. А при дальнейшем его увеличении с лицевой стороны шва образуются поверхностные дефекты в виде несплавлений (см. рис. 1, *б*).

Снижение соотношения $V_{св}/N$ ниже установленного минимально допустимого значения при сварке пластичных алюминиевых сплавов с небольшим содержанием легирующих и модифицирующих элементов (АМцН, АД33, АМг2М) приводит к образованию на лицевой поверхности швов дефектов в виде грата (см. рис. 1, *в*). При сварке остальных сплавов уменьшение минимально допустимой скорости перемещения инструмента за один его оборот на 10…20 % вызывает появление участков перегретого металла на лицевой поверхности швов. А при дальнейшем его уменьшении в швах образуются внутренние несплошности, обусловленные перегревом металла (см. рис. 1, *д*).

Выводы

1. Качественное формирование швов при сварке трением с перемешиванием тонколистовых (0,8…3,0 мм) алюминиевых сплавов различных систем легирования можно обеспечить за счет правильного выбора глубины погружения инструмента в свариваемый металл, частоты вращения инструмента и скорости его линейного перемещения вдоль стыка.

2. Пластичные низколегированные алюминиевые сплавы успешно свариваются при достаточно высоких скоростях сварки. При частоте вращения инструмента N = 1420 об/мин скорость его линейного перемещения для сплава АМцН может изменяться в пределах 8…41 м/ч, для сплава АД33 – 8…36 м/ч и для сплава АМг2М – 8…32 м/ч. Для получения качественных соединений на более прочных алюминиевых сплавах, содержащих значительное количество легирующих и модифицирующих элементов, необходимо снижать скорость сварки.

3. Диапазон оптимальных соотношений скоростей сварки и частот вращения инструмента при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов зависит от суммарного содержания в них легирующих и модифицирующих элементов. При суммарном содержании их в сплаве 2,2 % (сплав АМцН) величина линейного перемещения инструмента за один его оборот может изменяться в достаточно широких пределах от 0,094 до 0,423 мм. А для более прочных высоколегированных сплавов диапазон ее изменения сужается до 0,047…0,163 мм при содержании 7,7 % (сплав 1201) таких элементов в свариваемом сплаве и до 0,047…0,140 мм при их содержании 8,4 % (сплав АМг6М). Отклонение указанных параметров от оптимального диапазона приводит к образованию характерных внутренних и поверхностных дефектов, обусловленных недостаточной пластификацией или перегревом свариваемого материала.

4. Построенные по результатам экспериментальных исследований кривые, ограничивающие диапазон оптимальных соотношений скоростей сварки и частот вращения инструмента, аппроксимированы формульными зависимостями в виде степенных функций, которые позволяют рассчитать необходимые скорости вращения и перемещения инструмента для любого алюминиевого сплава, содержащего 2,2…8,4 % легирующих и модифицирующих элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lahti, K. FSW – possibilities in Shipbuilding / K. Lahti // Svetsaren. – 2003. – № 1. – P. 6–8.
2. Kuriyama, T. Advantages of Aluminum Alloy Rolling Stocks and Transition of Carbody Structures / T. Kuriyama // Journal of Light Metal Welding and Construction. – 2008. – № 9. – P. 418–421.
3. Arbegast, W.J. Friction Stir Welding After a Decade of Development / W.J. Arbegast // Welding Journal. – 2006. – № 3. – P. 28–35.
4. Friction Stir Welding Flies High at NASA / J. Ding [et al.] // Welding Journal. – 2006. – № 3. – P. 54–59.
5. Okamura, H. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy and Application to Structure / H. Okamura, K. Aota, M. Ezumi // Journal of Japan Institute of Light Metals. – 2000. – № 4. – P. 166–172.
6. Defalco, J. Friction stir welding vs. fusion welding / J. Defalco // Welding Journal. – 2006. – № 3. – P. 42–44.

7. Lanciotti, A. Characterization of friction welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates / A. Lanciotti, F. Vitali // Welding International. – 2003. – № 8. – P. 624–630.
8. Kulekci, M.K. Mechanické vlastnosti spojov hliníkovej zliatiny AlCu4SiMg vyhotovených trecím zvaraním premiešaním / M.K. Kulekci // Zvaranie – Svařování. – 2003. – № 5–6. – P. 104–107.
9. Pietras, A. Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW) / A. Pietras, L. Zadroga, M. Lomozik // Welding International. – 2004. – № 1. – P. 5–10.
10. Oosterkamp, A. “Kissing Bond” Phenomena in Solid-State Welds of Aluminum Alloys / A. Oosterkamp, L. Oosterkamp, A. Nordeide // Welding Journal. – 2004. – № 8. – P. 225–231.
11. Покляцкий, А.Г. Характерные дефекты при сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов и основные причины их образования / А.Г. Покляцкий // Автоматическая сварка. – 2008. – № 6. – С. 48–52.
12. Shinoda, T. Effect of Tool Angle on Metal Flow Phenomenon in Friction Stir Welds / T. Shinoda // 6th International conference on trends in welding research, Georgia, USA. – 2002. – April.
13. Point of Application for FSW / H. Okamura [et al.] // Welding Technology. – 2003. – № 5. – P. 60–69.
14. Colegrove, P.A. Experimental and numerical analysis of aluminium alloy 7075-T7351 friction stir welds / P.A. Colegrove, H.R. Shercliff // Science and Technology of Welding and Joining. – 2003. – № 5. – P. 360–368.
15. Enomoto, M. Friction Stir Welding: research and industrial applications / M. Enomoto // Welding International. – 2003. – № 5. – P. 341–345.
16. Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds / A.A. Hassan [et al.] // Science and Technology of Welding and Joining. – 2003. – № 4. – P. 257–268.
17. Рязанцев, В.И. Сварка трением с перемешиванием деформируемых и литейных алюминиевых сплавов / В.И. Рязанцев, В.Н. Мацнев, В.Ю. Конкевич // Авиационная промышленность. – 2004. – № 4. – С. 33–36.
18. Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів: пат. 54096 Україна, МПК B23K 20/12 / Іщенко А.Я., Покляцький А.Г.; заявник і патентовласник ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. – № u201005315; заявл. 30.04.2010; опубл. 25.10.2010 // Бюл. № 20.

Поступила 23.12.2014

PARAMETERS OF FSW PROCESS OF THIN SHEET ALUMINIUM ALLOYS

A. POKLYATSKY

Optimum parameters of modes of friction stir welding, which are widely used in manufacture of welded structures of 0.8…0.3 mm thickness aluminium alloys of different alloying systems, were determined. It is shown that quality weld formation in friction stir welding of thin sheet aluminium alloys can be provided due to correct selection of depth of tool immersion in metal being welded, tool rotation frequency and rate of its linear movement along the joint or welding rate. Relationship was determined between total content of alloying and modifying elements in the aluminium alloy being welded, welding rate and tool rotation frequency. A range of optimum relationships, expressing a length of linear movement of tool along the joint per its one revolution, which provides quality formation of the welds of thin sheet aluminium alloys AMtsN, AD33, AMg2M, 1460, AMg5M, 1201 and AMg6M, was determined. Formula dependencies in form of power functions, limiting this range and allowing calculation of necessary rates of revolution and tool movement for any aluminium alloy, containing 2.2…8.4 % of alloying and modifying elements, were received.

УДК 631.353.722:631.352.022

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ СМЕСИ МАСЕЛ, ПРИМЕНЯЮЩЕЙСЯ В РЕЖУЩИХ АППАРАТАХ МНОГОРОТОРНЫХ КОСИЛОК

А.Л. БОРИСОВ
(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Марьина Горка)

Исследуется центрифугирование смеси масел, применяющейся в режущих аппаратах многороторных косилок. Обоснована необходимость в изучении возможности разложения под воздействием центробежных сил рассматриваемой смеси масел. Представлена методика проведения исследований, в результате которых получено уравнение, описывающее зависимость количества выделившегося солидола, в массовых долях, из смеси масел от её температуры, длительности вращения ротора центрифуги с пробами и частоты вращения ротора. Полученные результаты проанализированы, сделаны соответствующие выводы.

Введение. Современное сельскохозяйственное производство требует осуществления различных мелиоративных мероприятий, таких как производство культуртехнических работ, строительство мелиоративных систем, сооружение водохозяйственных объектов. Выполнение этих видов работ связано со значительными затратами труда, времени, финансовых средств. Надлежащую отдачу от вложений можно получить только при рациональном использовании мелиорированных земель, мелиоративных и водохозяйственных систем, объектов, сооружений. В связи со снижением актуальности дальнейшей экстенсивной мелиорации возросла роль эффективной эксплуатации мелиоративных и водохозяйственных объектов, тем более что годовые эксплуатационные расходы на их содержание составляют около 10 % стоимости от вновь сооружаемых объектов. Одной из основных операций по уходу за мелиоративными и водохозяйственными объектами является операция скашивания травянистой и древесно-кустарниковой растительности.

Для окашивания мелиоративных каналов, дамб мелиоративных систем, откосов дорог в настоящее время широко применяется большое разнообразие мелиоративных и дорожных косилок. К этим косилкам предъявляется ряд жестких конструктивных и технологических требований, которые обусловлены условиями их эксплуатации. Так, на режущие аппараты мелиоративных и дорожных косилок во время их работы отрицательно сказываются следующие факторы: скашиваемая растительность имеет различные диаметры поперечного сечения, а также различный биологический состав; неровности берм и откосов каналов; различные углы наклона режущего аппарата во время работы; часто встречающиеся на окашиваемых объектах непреодолимые препятствия [1].

В настоящее время на мелиоративных и дорожных косилках наибольшее распространение получили многороторные режущие аппараты с нижним приводом роторов, который осуществляется зубчатыми цилиндрическими шестернями [2]. Данный тип привода наиболее надежный и не слишком сложный в конструкторском исполнении. Для смазывания зубчатых передач с целью снижения износа трущихся поверхностей, уменьшения затрат энергии на преодоление трения, отвода тепла от деталей и предохранения их от коррозии применяются различные трансмиссионные масла [3]. В режущих аппаратах многороторных косилок в качестве смазки применяется смесь трансмиссионного масла ТЭп-15 и смазки общего назначения солидол жировой в равных долях [4; 5].

Основная часть. В режущих аппаратах с приводом роторов от зубчатой передачи с течением времени происходит преждевременное изнашивание зубьев цилиндрических шестерен. На процесс изнашивания зубьев большое влияние оказывают динамические нагрузки, возникающие при срезании растительности. Однако основной причиной преждевременного изнашивания зубьев цилиндрических шестерен являются продукты износа, которые попадают в масло режущего аппарата в результате трения деталей привода. В основном эти продукты износа состоят из металлических частиц и в процессе работы из масла не удаляются, что приводит к абразивному изнашиванию деталей привода, в том числе и цилиндрических шестерен. Для того чтобы снизить содержание механических примесей в масле, а следовательно, уменьшить износ деталей привода, нами предложено обеспечить центробежную очистку масла [6–8]. Так как в нашем случае масло представляет собой смесь двух компонентов с разной плотностью входящих в её состав элементов, то при центробежной очистке возможно не только отделение механических примесей от масла, но и разложение самой смеси на компоненты, входящие в её состав.

Процесс центрифугирования в целом достаточно хорошо изучен и изложен в работах таких авторов, как В.И. Соколов, Д.Е. Шкоропад, В.И. Гродзиевский, П.Г. Романков [9–12] и др. Этот процесс основан на разделении неоднородных систем под действием центробежных сил на компоненты за счет разности их плотностей.

Смесь трансмиссионного масла ТЭп-15 и смазки общего назначения солидол жировой, в которой находятся частицы продуктов износа, можно представить как трехкомпонентную жидкую неоднородную систему (жидкость – жидкость – твердое).

Известны [13; 14] плотности солидола жирового и трансмиссионного масла ТЭп-15. При 20 °С они соответственно равны 900 и 950 кг/м^3. Как видим, разность плотностей у элементов, входящих в состав смеси, не велика, но достаточна для того, чтобы смесь под действием центробежных сил, возникающих в разработанном очистителе масла, была разложена на входящие в её состав компоненты. Это может отрицательно сказаться на работе центробежного очистителя, так как выделенные частицы солидола будут забивать выходные отверстия очистителя и это приведет к нарушению движения потока масла с продуктами износа в нем.

Возможность разложения смеси масел на входящие в нее компоненты исследовалась на центрифуге лабораторной медицинской ОС-6М [15], для чего был спланирован и проведен трехфакторный эксперимент по существующей методике [16]. В данном случае реализовывался план опыта типа 2^3.

Для проведения эксперимента была приготовлена исследуемая смесь, которая состояла из равных по массе частей трансмиссионного масла ТЭп-15 и солидола жирового. Смесь приготавливалась в чистой, сухой металлической таре путем интенсивного перемешивания данных масел, подогретых до температуры 60…70 °С [3; 4]. Из приготовленной смеси отбирались пробы массой около 30 г, помещались в пробирки лабораторной медицинской центрифуги ОС-6М (рис. 1) и подвергались центробежной обработке.

а) *б*)

Рис. 1. Центрифуга лабораторная медицинская ОС-6М:
а – общий вид центрифуги; *б* – пульт управления

Пробирки перед закладкой проб взвешивались на лабораторных электронных весах марки ADVENTURER AR 5120 класса точности 1, с ценой деления 0,01 г и пределом взвешивания 510 г. Далее пробирки помещались в ротор центрифуги, после чего на пульте управления центрифугой задавалась требуемая частота вращения ротора и время его вращения. По истечении заданного времени вращения пробирки извлекались из ротора, их содержимое сливалось в стеклянную тару, а сами пробирки вместе с остатками солидола (рис. 2) снова взвешивались.

Рис. 2. Пробирки с остатками солидола

По разнице масс пробирок, взвешенных до начала и после проведения опыт, определялась масса выделившихся частиц солидола. Затем по отношению массы оставшегося в пробирке солидола к первоначальной массе смеси была определена массовая доля выделившегося солидола.

Опыты с учетом обычных температур окружающей среды при работе косилок проводились при температуре от 10 до 30 °С. Необходимо отметить, что с увеличением температуры стойкость соединения смеси увеличивалась, что исключило необходимость в исследовании возможности разложения смеси при температурах выше 30 °С. Минимальная температура окружающей среды при работе косилок обусловлена сезонностью этих работ и соответствующих им метеорологическими условиями.

За минимальную частоту вращения ротора центрифуги взята частота вращения, равная минимальной допускаемой частоте вращения ротора многороторной косилки 1800 мин$^{-1}$, которая определена технологическим процессом срезания растительности [17]. Максимальная частота вращения ротора центрифуги принималась равной 3600 мин$^{-1}$, её дальнейшее увеличение не рекомендовано с точки зрения обеспечения безопасности проведения процесса окашивания.

Время вращения ротора центрифуги задавалось от 10 до 20 мин с интервалом в 5 мин. Минимальное время вращения обусловлено тем, что для достижения заданной частоты вращения, ротору необходим некоторый промежуток времени. При проведении опытов с длительностью вращения ротора более 20 мин результаты не отличались от результатов опытов, полученных с вращением ротора длительностью 20 мин, что определило верхнее значение данного переменного фактора.

Важнейшей характеристикой центробежных аппаратов является фактор разделения F_r, который определяется следующим образом:

$$F_r = \frac{\omega^2 R}{g}, \tag{1}$$

где ω – угловая скорость ротора центробежного аппарата, рад/с; R – внутренний радиус ротора (для пробирочной центрифуги – это расстояние от оси вращения центрифуги до дна пробирки), м; g – ускорение свободного падения, м/с.

По результатам проведенного эксперимента были определены коэффициенты регрессии, а также произведена оценка их значимости. Затем коэффициенты переводились из нормированных значений факторов в натуральные.

В результате обработки проб масел было замечено, что при некоторых опытах в пробирках выделяется достаточно большое количество солидола, что подтверждает гипотезу о возможности разложения смеси на входящие в нее состав компоненты. Однако это происходит при частотах вращения больших, чем частота вращения ротора многороторной мелиоративной косилки.

Математическая обработка результатов исследований позволила получить следующее уравнение:

$$\begin{aligned} Y = -0,083 + 6\cdot10^{-5}\cdot n_{цф} + 4\cdot10^{-4}\cdot T - 1,5\cdot10^{-3}\cdot t_{о.с} - 4,44\cdot10^{-7}\cdot n_{цф}\cdot T + \\ +4,44\cdot10^{-7}\cdot n_{цф}\cdot t_{о.с} + 6\cdot10^{-5}\cdot T\cdot t_{о.с} + 7,41\cdot10^{-9}\cdot n_{цф}^2, \end{aligned} \tag{2}$$

где Y – массовая доля выделившегося солидола; $n_{цф}$ – частота вращения ротора центрифуги, мин$^{-1}$; T – время вращения ротора с пробой, мин; $t_{о.с}$ – температура окружающей среды, °С.

Подставив в уравнение (2) значения переменных факторов в пределах интервала исследования, получаем значение Y – количество выделившегося солидол жировой из смеси масел в массовых долях.

Подстановка значений T и $t_{о.с}$ нулевого уровня дает квадратное уравнение

$$Y = 7,41\cdot10^{-9}\cdot n_{цф}^2 + 62,22\cdot10^{-6}\cdot n_{цф} - 89\cdot10^{-3}. \tag{3}$$

Решение данного уравнения позволяет установить, что на использованной центрифуге при температуре окружающей среды +20 °С и времени центрифугирования 15 мин, то есть на нулевых уровнях переменных факторов, выделение солидола из смеси начнется при частоте вращения ротора центрифуги, равной 1250 мин$^{-1}$. Для используемой центрифуги при такой частоте вращения фактор разделения равен 315.

Заключение. В результате проведенного исследования центрифугирования смеси масел, применяющейся в режущих аппаратах многороторных косилок, получено уравнение, которое описывает зависимость количества выделившегося солидола, в массовых долях, из смеси от температуры смеси масел, длительности вращения ротора центрифуги с пробами и частоты вращения ротора.

При создании очистителя масла в режущем аппарате многороторной косилки следует устанавливать параметры очистителя такими, при которых фактор разделения во избежание выделения солидола из смеси масел не будет превышать 315.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мажугин, Е.И. Машины для эксплуатации мелиоративных и водохозяйственных объектов: учеб. пособие / Е.И. Мажугин. – Горки: БГСХА, 2010. – 333 с.

2. Борисов, А.Л. Анализ конструкций приводов роторов мелиоративных и дорожных косилок / А.Л. Борисов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 21–22 апр. 2011 г.: в 2 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилёв, 2011. – Ч. 2. – С. 5.
3. Итинская, Н.И. Справочник по топливу, маслам и техническим жидкостям / Н.И. Итинская, Н.А. Кузнецов. – М.: Колос, 1982. – 208 с.
4. Косилка откосов каналов К-78М: Руководство по эксплуатации. – Минск, 2008. – 44 с.
5. Косилка ротационная навесная АС-1: Руководство по эксплуатации. – Минск, 2007. – 38 с.
6. Режущий аппарат роторной косилки: пат. 6876 Респ. Беларусь, МПК A01D 34/00 / Е.И. Мажугин, А.Л. Борисов, С.Г. Рубец; заявитель Белорус. гос. с-х. академия. – № u 20100403; заявл. 23.04.10; опубл. 30.12.10 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 6. – С. 145.
7. Режущий аппарат роторной косилки: пат. 8949 Респ. Беларусь, МПК A01D 34/00 / Е.И. Мажугин, А.Л. Борисов, С.Г. Рубец; заявитель Белорус. гос. с-х. академия. – № u 20120270; заявл. 02.11.12; опубл. 30.06.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 1 – С. 145.
8. Режущий аппарат роторной косилки: пат. 8102 Респ. Беларусь, МПК A01D 34/00 / Е.И. Мажугин, А.Л. Борисов, С.Г. Рубец; заявитель Белорус. гос. с-х. академия. – № u 20110557; заявл. 11.07.11; опубл. 30.04.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 195.
9. Соколов, В.И. Современные промышленные центрифуги / В.И. Соколов. – М.: Машгиз, 1961. – 452 с.
10. Шкоропад, Д.Е. Центрифуги для химических производств / Д.Е. Шкоропад. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с.
11. Гродзиевский, В.И. Реактивные центрифуги для очистки масла в двигателях внутреннего сгорания / В.И. Гродзиевский. – М.: Машгиз, 1963. – 88 с.
12. Романков, П.Г. Жидкостные сепараторы / П.Г. Романков, С.А. Плюшкин. – Л.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
13. Смазка, солидол жировой. Технические условия: ГОСТ 1033-79. – Введ. 01.01.81. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 6 с.
14. Масла трансмиссионные. Технические условия: ГОСТ 23652-79. – Введ. 01.01.81. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 10 с.
15. Центрифуга лабораторная медицинская ОС-6М. Паспорт ШХ2. 779. 043 ПС. – М., 1982. – 28 с.
16. Леонов А.Н. Основы научных исследований и моделирования: учеб.-мет. компл. / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис. – Минск: БГАТУ, 2010. – 276 с.
17. Борщов, Т.С. Настройка и регулировка мелиоративных машин / Т.С. Борщов, И.В. Лисовский. – Л.: Агромпромиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 239 с.

Поступила 16.04.2015

THE RESULTS OF ANALYSIS OF OILS MIXTURE CENTRIFUGATION USING IN CUTTING DEVICES OF MULTIROTOR MOWING MACHINES

A. BORISOV

The necessity of studying a possibility of demixing of oils mixture using in cutting devices of multirotor mowing machines is proved in the article. The methods of analysis realization are described. The results are presented and analyzed.

УДК 669.018.95

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПЛАСТИЧНОЙ СМАЗКИ НА ОСНОВЕ СУЛЬФОНАТА КАЛЬЦИЯ

д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК; канд. техн. наук А.В. ИВАХИН
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН; А.А. ГУЩА
(Полоцкий государственный университет)

Исследуются особенности структуры дисперсной фазы и свойства комплексной сульфонат кальциевой смазки, полученной на основе химически синтезированных наноразмерных частиц кристаллической модификации карбоната кальция (кальцита). Разработанная смазка является универсальной смазкой для подшипников качения и скольжения машин и оборудования, работающих при низких и средних скоростях в условиях повышенной влажности. Показаны перспективные области применения разработанной смазки.

Введение. Модифицирование пластичных смазок введением в их состав функциональных добавок – один из эффективных способов улучшения свойств пластичных смазочных материалов. В настоящее время все большую актуальность приобретает использование в качестве подобных добавок наноразмерных компонентов различной природы. При этом наноразмерные частицы добавки вводятся в состав смазочного материала в виде агрегатов наночастиц, которые необходимо диспергировать для активации их структурообразующих качеств и улучшения реологических и трибологических свойств смазки [1–3]. Подобный подход относится к физическим принципам модифицирования смазочных материалов нанокомпонентами [1].

Однако для случая использовании физического принципа модифицирования смазочных материалов наноразмерными компонентами следует учитывать ряд негативных аспектов, к числу которых относятся необходимость проведения сложной и трудоемкой операции по диспергированию агрегатов наночастиц и равномерному распределению последних по объему реакционной массы, а также разрушение волокнистой структуры дисперсной фазы при длительной эксплуатации узла трения. Наряду с проблемами, обусловленными агрегированием наночастиц добавки, необходимо также соблюдать ряд требований, связанных с обеспечением химической чистоты вещества нанодобавки. Повысить степень управляемости процессом структурообразования смазочного материала, модифицированного наночастицами, можно в случае использования химического принципа модифицирования, при котором наночастицы добавки химически синтезируются в реакционной массе непосредственно в процессе получения смазочного материала [4].

Высокощелочные сульфонаты кальция, являющиеся основой для получения сульфонатных смазок, широко используются в качестве моющих и диспергирующих присадок к моторным маслам, а также ингибиторов коррозии. В сульфонатных присадках аморфные частицы карбоната кальция с размером 2…15 нм стабилизированы в масле сульфонатом кальция, образуя светлые и чистые дисперсии малой вязкости. Простейшим способом получения пластичных смазочных материалов (ПСМ) из сульфонатных соединений является их обработка при определенных условиях активными агентами, преобразующими аморфный карбонат кальция в одну из кристаллических его модификаций (кальцит), размеры частиц которого составляют 15…50 нм, без образования волокнистой структуры дисперсной фазы. Подобные ПСМ обладают хорошими антикоррозионными, противозадирными и противоизносными свойствами при высокой температуре каплепадения, однако характеризуются низкой механической стабильностью, плохой прокачиваемостью при низких температурах, что ограничивает область их применения [5].

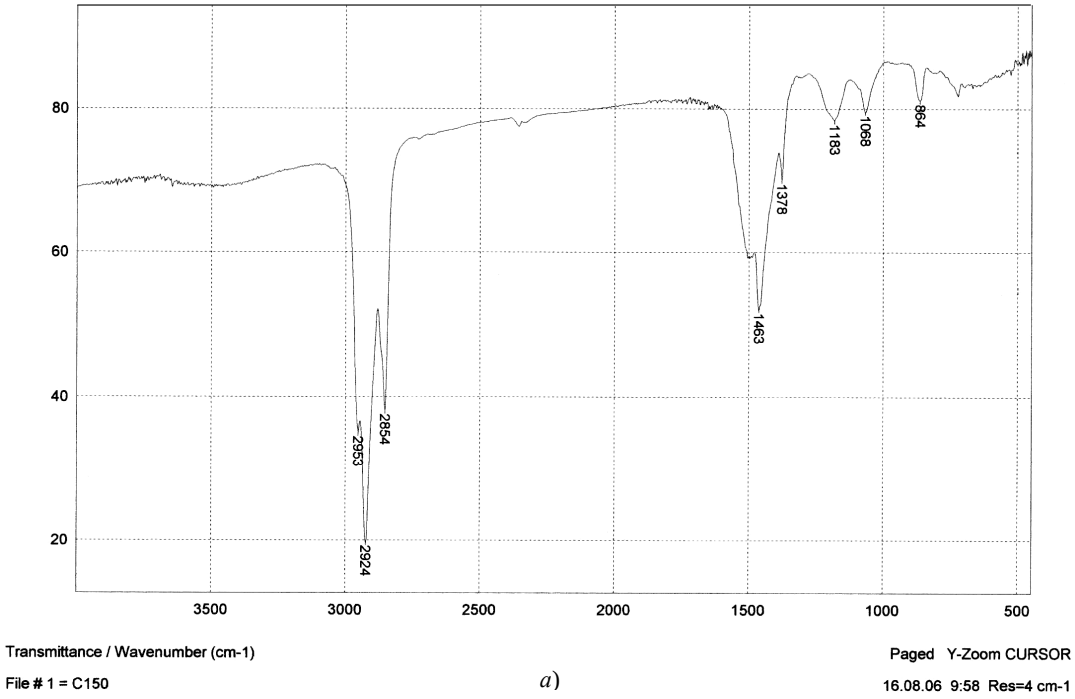
Эффективным направлением повышения реологических свойств сульфонат кальциевых ПСМ выступает формирование их дисперсной фазы на основе комплексных солей с образованием тиксотропных высокоструктурированных коллоидных дисперсий.

Методика проведения исследований. Изучение инфракрасных спектров образцов смазки проводилось на ИК-спектрометре M2000 Series фирмы MIDA (США) с обработкой спектров с помощью программы GRAMS/32 фирмы Golactic (США). Критическая нагрузка и нагрузка сваривания для смазочного материала определялись на четырехшариковой машине трения по ГОСТ 9490-75. Механическая стабильность смазочного материала оценивалась по изменению пенетрации после 10000, 50000 и 100000 циклов нагружения в соответствии с методикой DIN ISO 2137. Температура каплепадения определялась по ГОСТ 6793-74. Исследование структуры дисперсной фазы ПСМ осуществлялось с использованием средств сканирующей электронной микроскопии по методике [6].

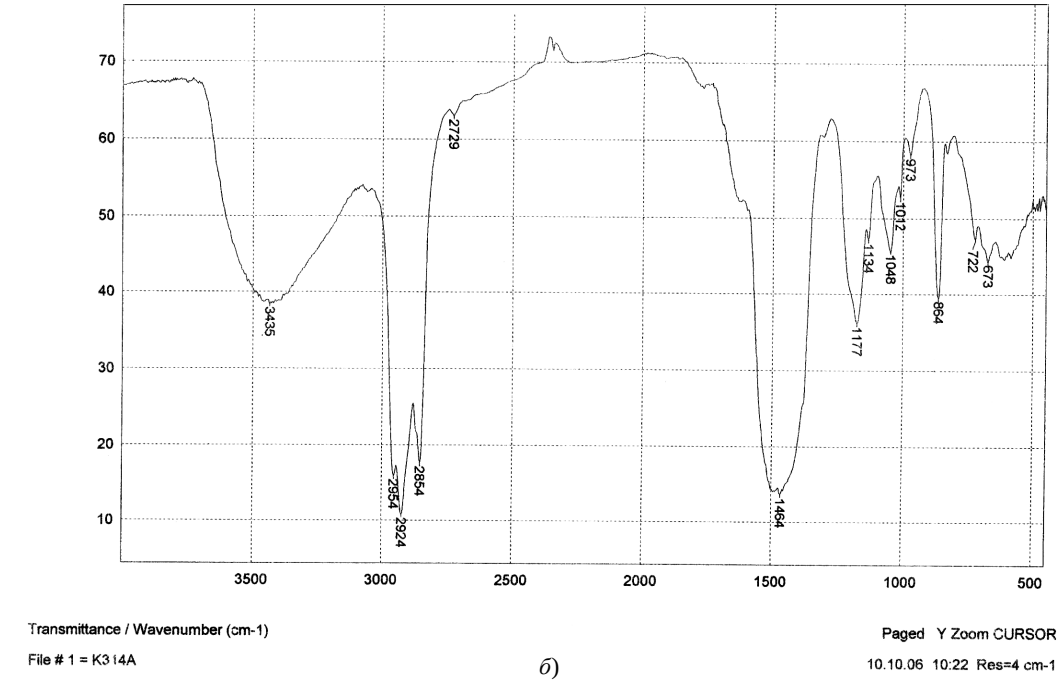
Результаты исследований и их обсуждение. Строение высокощелочных сульфонатных присадок в углеводородной среде представляет мицеллы, внутренняя часть которых состоит из полярных групп, а внешняя – из ориентированных наружу углеводородных радикалов. Такое мицеллообразование в неводной среде является результатом действия сил притяжения между полярными группами поверхностно-активных веществ и взаимодействия радикалов с растворителем. Размеры частиц карбоната $CaCO_3$ в большинстве присадок обычно не превышают ~5 нм. Изучение структуры $CaCO_3$ в коллоидных частицах

с помощью ИК-спектроскопии показывает, что существует четыре формы $CaCO_3$: аморфная и три кристаллических (кальцит, фатерит и арагонит). В природе $CaCO_3$ чаще всего встречается двух типов: кальцит и арагонит, фатерит – менее стойкая форма и в обычных условиях легко переходит в кальцит. Карбонат кальция поглощает инфракрасное излучение в областях 699…745, 842…874 и 1070…1084 $см^{-1}$. Каждой полиморфной модификации карбида кальция соответствует свой пик максимальной адсорбции, в частности, у аморфного $CaCO_3$ пик поглощения наблюдается при 860 $см^{-1}$, у фатерита – 745, 859 и 1070 $см^{-1}$, у кальцита – при 713, 874 $см^{-1}$ (сильная полоса) и обертон при 1084 $см^{-1}$. Ядра $CaCO_3$ в частичках сульфоната кальция (присадки) имеют некристаллическую (аморфную) структуру, что подтверждается широкоугловыми рентгеновскими снимками, в которых присутствует сильный пик поглощения приблизительно при 860 $см^{-1}$, характерный для аморфного $CaCO_3$ [7].

Полученные ИК-спектры сульфонатных присадок С-150 (щелочное число 150) производства ОАО «Нафтан» (Республика Беларусь) и К-314 (щелочное число 314) производства НПП «Квалитет» (Российская Федерация) представлены на рисунках 1, *а*, *б* соответственно.



а)



б)

Рис. 1. ИК-спектры сульфонатных присадок С-150 (*а*) и К-314 (*б*)

Инфракрасные спектры сульфонатных присадок (см. рис. 1) свидетельствуют о наличии полосы поглощения 864 $см^{-1}$ и отсутствии других полос, характерных остальным модификациям $CaCO_3$, что подтверждает наличие в присадках С-150 и К-314 карбоната кальция в аморфном состоянии.

В комплексных сульфонат кальциевых дисперсиях отдельные микромицеллы с индивидуальным наноразмерным ядром в составе нескольких солей и стабилизирующей оболочкой из сульфоната кальция и кальциевой соли 12-гидрооксистеариновой кислоты образуют макромицелярную трехмерную структуру, то есть непосредственно дисперсную фазу, которая может быть использована для приготовления пластичных смазок.

Для получения комплексных сульфонат кальциевых (kSulCa) ПСМ характерен химический принцип модифицирования наночастицами дисперсной фазы, в соответствии с которым сначала синтезируются центры кристаллизации в виде аморфноподобных частиц карбоната кальция (фатерита), затем они покрываются высокомолекулярной оболочкой, происходит переход аморфного центра в кристаллическую модификацию карбоната кальция (кальцит) (на рисунке 2 это отражает снижение пика 2θ = 18° и синхронное повышение пика 2θ = 29°), рост волокон и формирование трехмерной структуры дисперсной фазы.

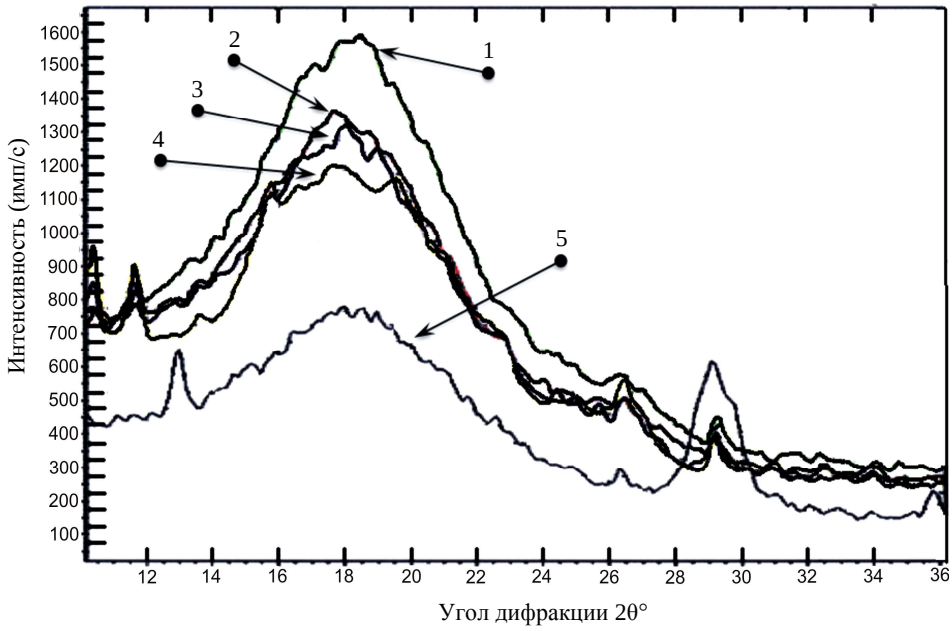


Рис. 2. Рентгенограммы kSulCa смазки на различных стадиях получения:
1 – 90 °С; 2 – 130 °С; 3 – 180 °С; 4 – 235 °С; 5 – готовая смазка

Для получения комплексной сульфонат кальциевой смазки с повышенными свойствами необходимо добиваться степени перехода аморфного карбоната кальция $CaCO_3$ в его кристаллическую кальцитную модификацию, характеризующуюся полосой поглощения ИК-спектра при 874 $см^{-1}$, до уровня более 60…70 %.

Структура единичного элемента дисперсной фазы kSulCa пластичной смазки представляет собой микромицеллу в виде нанокальцитного ядра (размером до 200 нм) и тонких игольчатых кристаллов кальцита толщиной порядка 100 нм и длиной 1…5 мкм (рис. 3).

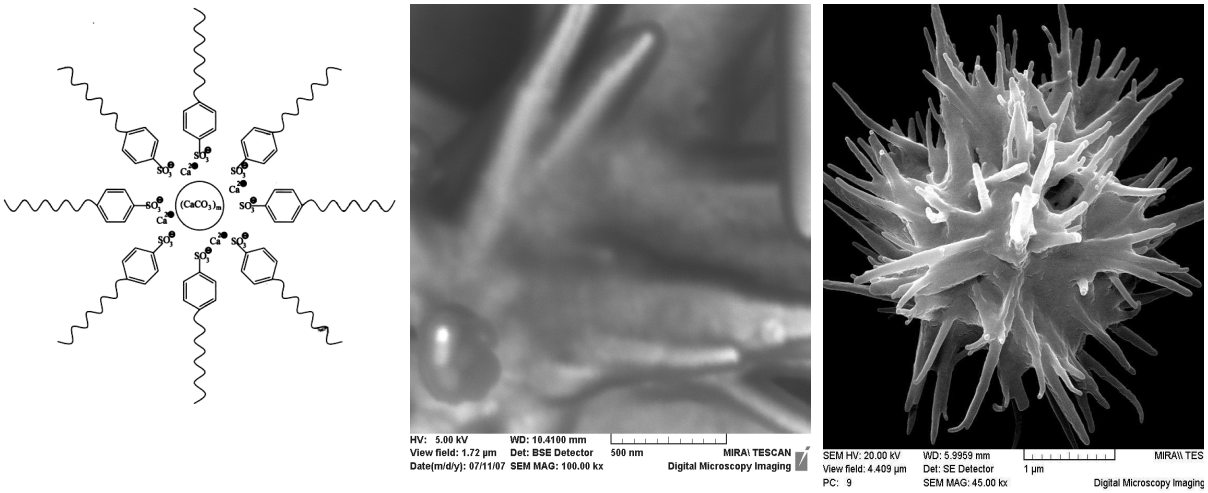
Единичные элементы дисперсной фазы скрепляются остатками фатерита и аморфноподобной модификации карбоната кальция в отдельные конгломераты микронных размеров (рис. 4, *а*). Они представляют собой макромицелярную трехмерную структуру и за счет сил различного межмолекулярного взаимодействия, в свою очередь, образуют в совокупности дисперсную фазу смазки (рис. 4, *б*).

Уникальное строение дисперсной фазы kSulCa ПСМ обеспечивает значительно более высокий уровень ее механической стабильности (испытания по ГОСТ 19295-73) по сравнению с комплексной литиевой (kLi) и комплексной кальциевой (kCa) смазками.

Механическая стабильность пластичных смазок различного состава проиллюстрирована в таблице.

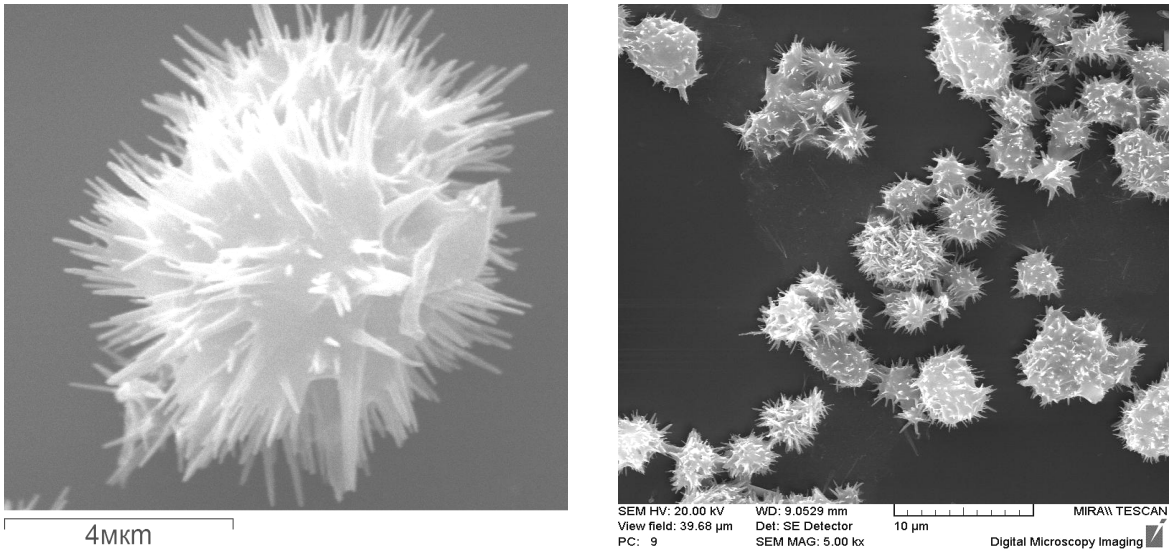
Микроструктура дисперсной фазы kSulCa ПСМ до и после испытаний, показанная на рисунке 5, свидетельствует о том, что ее изменения в процессе испытаний незначительны.

Определение противоизносных и противозадирных свойств ПСМ проводилось на четырехшариковой машине трения по ГОСТ 9490-75, нагрузочные кривые представлены на рисунке 6.



а) *б*) *в*)

Рис. 3. Модель (*а*) и микроструктура мицеллы kSulCa смазки (*б*, *в*)



а) *б*)

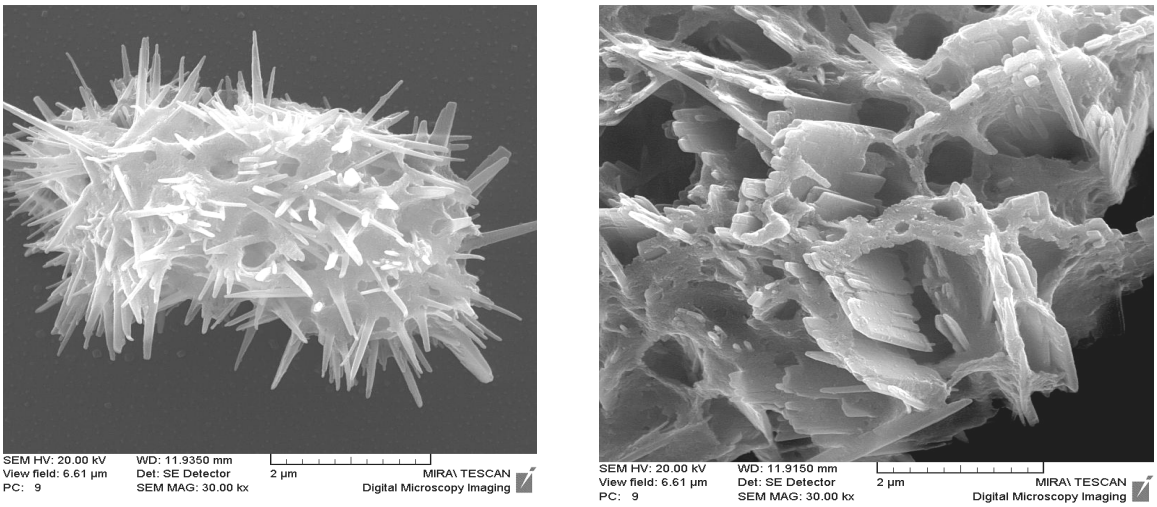
Рис. 4. Макромицелла (*а*) и структурированный подвижный каркас (*б*) дисперсной фазы kSulCa смазки

Механическая стабильность пластичных смазок различного состава

Количество циклов нагружения	Изменение пенетрации за период испытаний, 10^{-1} мм		
	kLi ПСМ с пакетом добавок	kCa ПСМ с пакетом добавок	kSulCa ПСМ
10 000	62	145	5
50 000	70	180	5
100 000	95	193	8

Из представленных данных видно, что kSulCa ПСМ обладает наиболее высоким уровнем противоизносных и противозадирных свойств. Так, критическая нагрузка составляет 2520 Н, а нагрузка сваривания – 6200 Н. Нагрузочная кривая kSulCa ПСМ практически не имеет скачков, носит равномерно возрастающий характер, что свидетельствует об отсутствии задиров и равномерном изнашивании шаров.

Полученный по разработанной технологии kSulCa ПСМ обладает высокой термостойкостью, температура его каплепадения составляет 320 °С.



а) *б*)

Рис. 5. Микроструктура дисперсной фазы kSulCa ПСМ до испытаний (*а*) и после (*б*)

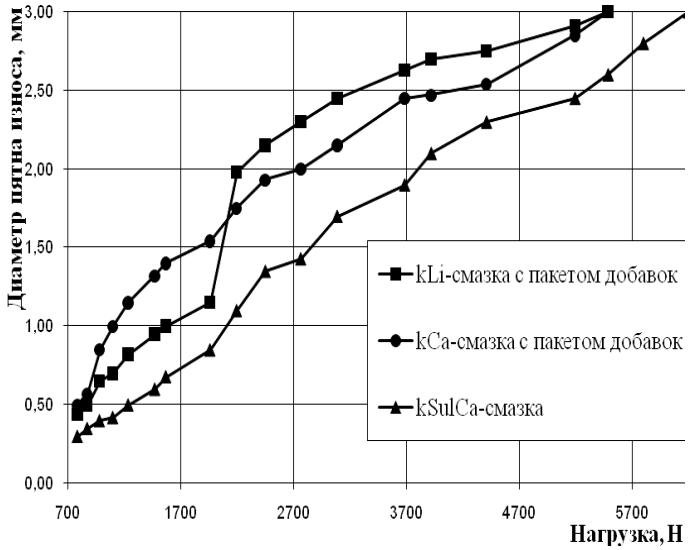


Рис. 6. Нагрузочные кривые пластичных смазок различного состава

Заключение. Химический синтез центров кристаллизации дисперсной фазы kSulCa ПСМ обеспечивает химическую чистоту и стабильность размеров наночастиц дисперсной фазы, высокую степень упорядоченности ее структуры, что в значительной степени предопределяет повышенные эксплуатационные характеристики kSulCa ПСМ. Форма структурированного подвижного каркаса дисперсной фазы kSulCa ПСМ обусловливает высокую ее адаптивность к уровню механической и термической нагруженности трибосопряжения. По совокупности эксплуатационных параметров (термостойкость, механическая и коллоидная стабильность, водостойкость, смазывающая способность, прокачиваемость и др.) kSulCa ПСМ существенно превосходят своих предшественников, в том числе комплексные литиевые, комплексные кальциевые, комплексные алюминиевые и полимочевинные смазки. Особенно эффективно использование kSulCa ПСМ в узлах трения, работающих в экстремальных условиях (при высоких (до 240 °С) температурах, в контакте с соленой водой, при высоких ударных нагрузках).

Разработанная смазка OIMOL KSC WR 2 (ТУ BY 190410065.017-2014) является универсальной смазкой для подшипников качения и скольжения машин и оборудования, работающих при низких и средних скоростях в диапазоне температур от –30 до +200 °С (кратковременно до +230 °С) в условиях повышенной влажности (до 100 %), что делает ее перспективной для использования в широком диапа-

зоне нагрузок и температур: в узлах трения строительно-дорожной и горно-шахтной техники; кузнечно-прессового и металлургического оборудования; автомобильного и железнодорожного транспорта; средств морского базирования; другой оснастки, работающей в условиях интенсивного изнашивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жорник, В.И. Влияние твердых наноразмерных добавок на структуру пластичной смазки и механизм изнашивания поверхности трения / В.И. Жорник, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 3(12). – С. 85–92.
2. Трибологические характеристики смазок с нанопорошками дихалькогенидов молибдена и вольфрама / К.Э. Гринкевич [и др.] // Смазочные материалы: тез. 9-й междунар. науч.-техн. конф., Бердянск, 4–8 сент. 2006 г. – Львов: Изд. Нац. ун-та «Львівська політехніка», 2006. – С. 22–24.
3. Смазочные масла и смазки, содержащие наночастицы: заявл. WO2006119502 США, МПК7 C10M159/24 / J.A. Waynick; заявитель Южно-западный НИИ; заявл. 03.05.2006; опубл. 09.11.2006 // Изобретение стран мира. – 2007. – № 11(44). – С. 32.
4. Химический принцип модифицирования пластичных смазочных материалов наноразмерными добавками / В.И. Жорник [и др.]// Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр., 2014. – Вып. 3. – С. 282–284.
5. Плескачевский, Ю.М. Структурные аспекты формирования дисперсной фазы пластичных смазок / Ю.М. Плескачевский, Л.В. Маркова, А.В. Ивахник // Проблемы химмотологии: материалы докл. I Междунар. науч.-техн. конф., Киев, 15–19 мая 2006 г.; Нац. авиац. ун-т. – Киев: Книж. изд-во НАУ, 2006. – С. 280–282.
6. Препарирование пластичных смазок для исследования их структурного каркаса методом сканирующей электронной микроскопии / В.А. Чекан [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – № 8. – С. 36–38.
7. Macwood, W. Calcium Sulfonate Grease / W. Macwood, R. Muir // NLGI Spokesman, Journal of the National Lubricating Grease Institute. – 1999. – № 5. – P. 58–63.

Поступила 22.06.2015

STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE CALCIUM SULFONATE BASED GREASE

V. ZHORNIK, A. IVAKHNIK, A. DUDAN, A. HUSHCHA

The article presents the features of the structure of dispersed phase and properties of the complex calcium sulfonate grease prepared on base of chemically synthesized nanosized particles of the crystalline modification of calcium carbonate (calcite). Разработанная смазка является универсальной смазкой для подшипников качения и скольжения машин и оборудования, работающих при низких и средних скоростях в условиях повышенной влажности. The promising fields of application of developed grease are shown.

УДК 621.9.048:669.017.3

СПОСОБЫ И МОДЕЛЬ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЗАДАНИЯ ПАМЯТИ ФОРМЫ СПЛАВАМ TiNi

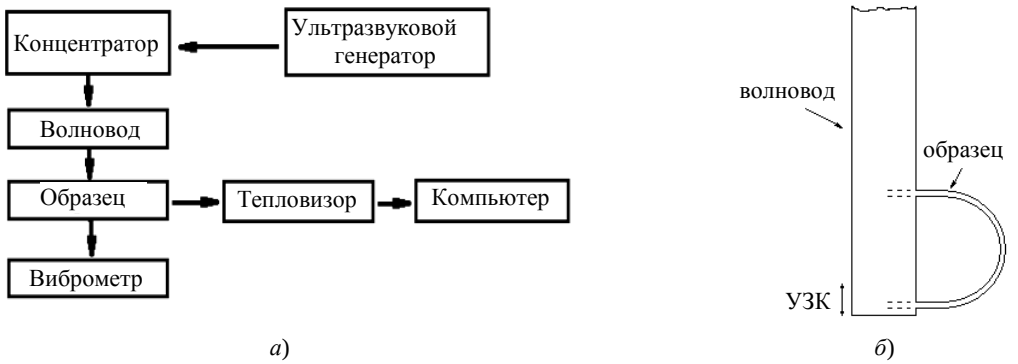
чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук В.В. РУБАНИК
(Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск);
канд. физ.-мат. наук, доц. В.В. РУБАНИК (мл.); С.Н. МИЛЮКИНА
(Витебский государственный технологический университет)

Представлены результаты исследований по влиянию низкотемпературной термической и ультразвуковой обработки на запоминаемую деформацию в сплаве Ti-50,4 ат.% Ni с эффектом памяти формы. Показано, что задание памяти формы конструкциям из сплавов TiNi можно осуществлять посредством термической обработки при температурах, не превышающих 200 ºС, а в случае использования ультразвуковой обработки максимальная температура материала не превышает ~ 72 ºС. Предложена модель процесса задания памяти формы при низкотемпературной обработке, устанавливающая связь между запоминаемой деформацией и температурой термообработки или интенсивностью УЗК и продолжительностью обработки, которая подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований зависимостей температуры окончания обратного мартенситного превращения в напряженном материале. Разработаны низкотемпературные способы обработки сплавов TiNi для задания памяти формы с использованием термической или ультразвуковой обработки.

Введение. При использовании сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в качестве конструкционных исполнительных элементов им необходимо предварительно задать требуемую форму. С этой целью традиционно осуществляют следующую последовательность операций: формообразование элемента в требуемую форму конструкции, жёсткая фиксация в этом состоянии и термообработка при температурах 400…500 °С с выдержкой от нескольких минут до нескольких часов [1]. Использование таких высоких температур делает невозможным обработку комбинированных элементов конструкции, помещенных в полимерную оболочку, приводит к изменению поверхности материала (образование окисного слоя), а также способствует изменению всего комплекса функциональных свойств TiNi сплава [2]. В связи с этим разработка низкотемпературных способов задания памяти формы является актуальной научно-технической задачей, решению которой и посвящена данная работа. С этой целью были проведены исследования по влиянию на задание памяти формы термообработки при температурах до 250 °С, в том числе и за счет ультразвукового воздействия.

Материал и методы исследования. При проведении исследований использовали прямолинейные образцы проволоки Ti-50, 4 ат.% Ni диаметром 0,65 мм, подвергнутые предварительному рекристаллизационному отжигу при 700 °С в течение 30 мин с последующей закалкой в воде. После чего во всех образцах при термоциклировании через интервал мартенситных превращений наблюдалось одностадийное фазовое превращение по схеме B2 ↔ B19'. Характеристические температуры, определенные методами дифференциальной сканирующей калориметрии, составили: $M_н$ = 30 °С; $M_к$ = 14 °С; $A_н$ = 41 °С; $A_к$ = 57 °С.

Образцы в мартенситном состоянии деформировали изгибом или кручением до различных степеней деформации, фиксировали в этом состоянии и осуществляли термообработку или подвергали ультразвуковому воздействию частотой 22 кГц в течение 60 с различной интенсивности при комнатных температурах. Образец TiNi сплава крепили в разрезном титановом волноводе полуволновой длины (рис. 1).



а) *б*)

Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для ультразвуковой обработки (*а*) и схема крепления проволочных образцов TiNi в волноводе (*б*)

Амплитуду ультразвуковых колебаний (УЗК), значения которой составляли до 8 мкм, измеряли на торце волновода с помощью бесконтактного виброметра.

В процессе ультразвукового воздействия при помощи тепловизионной камеры NEC 9100 с частотой записи 5 кадров в секунду фиксировали изменение температуры по поверхности образца.

Параметры формовосстановления при наведении изгибных деформаций определяли в соответствии с методикой, представленной в работе [3]. Прямолинейные образцы проволоки из сплава TiNi деформировали вокруг цилиндрических оправок разного диаметра *D*, снабженных специальным фиксатором. Значения деформаций ε определяли по формуле:

$$\varepsilon_t = \frac{d}{D} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где *d* – диаметр проволочного образца.

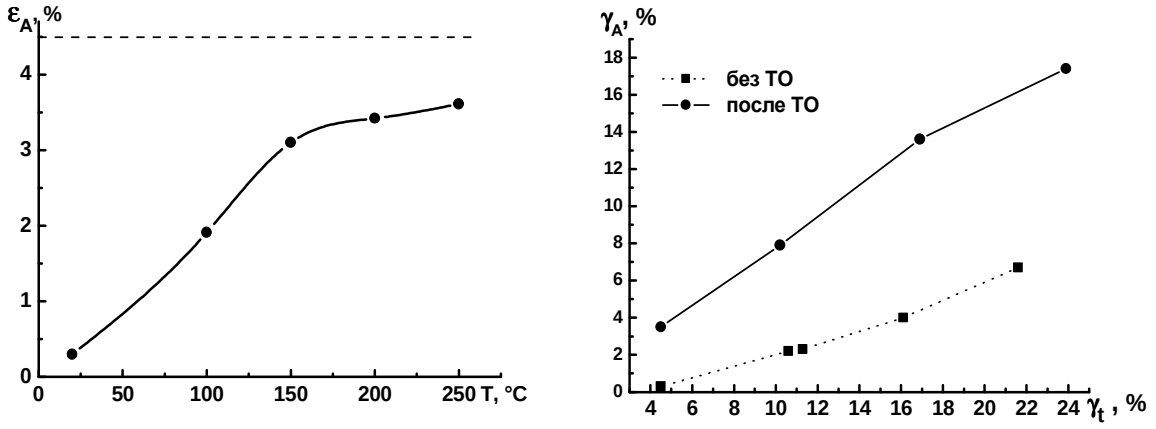
После снятия образца с оправки определяли значения наведенной деформации ε_i, упругую деформацию $\varepsilon_y = \varepsilon_t - \varepsilon_i$, а после нагрева через интервал обратного мартенситного превращения – значения восстанавливаемой деформации $\varepsilon_{пф} = \varepsilon_i - \varepsilon_A$ (ЭПФ) и остаточной деформации ε_A. Величину запоминаемой деформации рассчитывали по формуле:

$$\eta = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{пф}}{\varepsilon_i} \cdot 100\ \%. \qquad (2)$$

Результаты исследований и их обсуждение. Исследования влияния термообработки на задание памяти формы показали, что значения запоминаемых деформаций зависят от температуры некоторым нелинейным образом: до ~ 150 °С увеличиваются линейно, а затем следует замедление (рис. 2, *а*). Во всех образцах TiNi сплава наводили деформацию ~ 4,5 %. В результате термообработки деформированных и заневоленных образцов в течение 5 минут при 100 °С остаточная деформация $\varepsilon_A \approx 1{,}9$ %, что составляет всего ~ 42 % от наводимой; при 150 °С – 3,1 %, или ~ 69 % от наводимой; при 200 °С и 250 °С – уже ~ 76 и ~ 80 % соответственно.

Увеличение продолжительности термообработки образцов исследуемого TiNi сплава при рассматриваемых температурах не вызывает значительного изменения значений запоминаемых деформаций. Так, при увеличении длительности выдержки от 5 мин до 10 ч значения ε_A независимо от температуры обработки увеличиваются лишь на ~ 0,2 %, что, скорее всего, обусловлено изотермической ползучестью материала вследствие выдержки в заневоленном состоянии.

Для проведения дальнейших исследований зависимости запоминаемой деформации от наводимой использовали режим термообработки при температуре 200 °С в течение 5 мин, в результате чего установлено, что запоминаемая деформация составляет ~ 77…80 % от наводимой (рис. 2, *б*).



а) *б*)

Рис. 2. Зависимости запоминаемой деформации
от температуры термообработки (*а*) и наводимой деформации (*б*)

За такие кратковременные выдержки в результате термообработки при температурах до 250 °С никакого изменения фазового состава в сплаве Ti-50,4 ат.% Ni происходить не должно [4; 5], о чем также свидетельствуют данные проведенных нами калориметрических исследований: изменений кинетики мартенситных превращений не обнаружено.

Результаты исследований ультразвукового воздействия показали возможность задания памяти формы конструкциям из сплава TiNi только за счёт ультразвуковой обработки (рис. 3) [6].

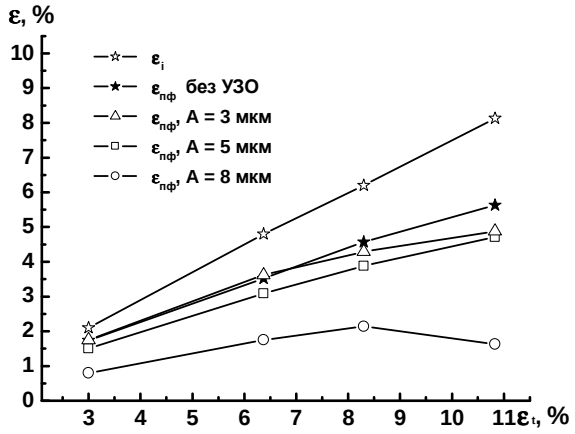


Рис. 3. Зависимости восстанавливаемой деформации
от наводимой после ультразвуковой обработки различной интенсивности

Исследования зависимости величины запоминаемой деформации от наводимой проводили следующим образом: проволочные образцы исследуемого TiNi сплава, находящиеся в мартенситном состоянии, деформировали изгибом до различных степеней деформации ε_t и определяли остаточную деформацию после упругого возврата ε_i, после чего образцы подвергали ультразвуковой обработке (УЗО) в заневоленном состоянии. Далее все образцы охлаждали после УЗО до температуры ниже температуры окончания прямого мартенситного превращения $M_к$, переводя в мартенситную фазу, а затем нагревали в свободном состоянии до температур ~ 100 ± 5 °С и определяли величину восстанавливаемой деформации $\varepsilon_{пф}$.

Обнаружено, что после ультразвуковой обработки деформированных и заневоленных образцов значения восстанавливаемой ими деформации уменьшаются, причём чем больше амплитуда переменных ультразвуковых механических напряжений, тем меньше значения восстанавливаемых деформаций при реализации эффекта памяти формы.

При увеличении наводимой в мартенсите деформации значения восстанавливаемой после ультразвуковой обработки деформации увеличиваются почти линейно, как и в образце без обработки, однако при превышении ~ 10 % несколько снижаются. Вероятно, это обусловлено большей пластической деформацией мартенсита и в связи с этим более значительным влиянием ультразвука в этом случае, так как его воздействие аккумулируется главным образом именно на дефектах кристаллической решетки [7].

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что в результате ультразвуковой обработки деформированного и заневоленного TiNi сплава восстанавливаемая им при нагреве деформация может уменьшаться до ~ 33 % от наводимой, а значит запоминаемая деформация составляет до ~ 67 %. Такое частичное «запоминание» деформации в процессе ультразвуковой обработки заневоленных образцов похоже на результаты, полученные после термообработки при температурах 100…250 ºС (рис. 4), что приводит к предположению об общих причинах запоминания деформации при таких низких температурах воздействия.

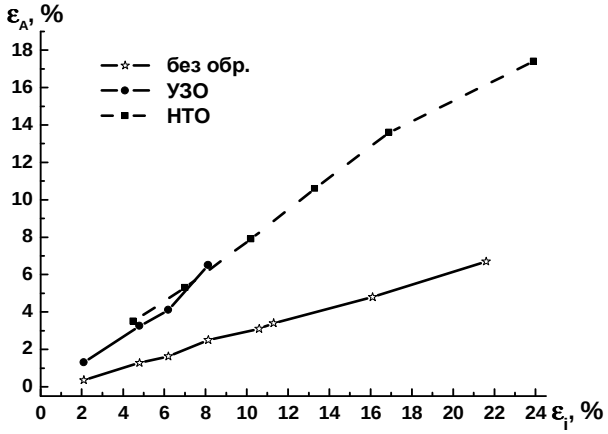


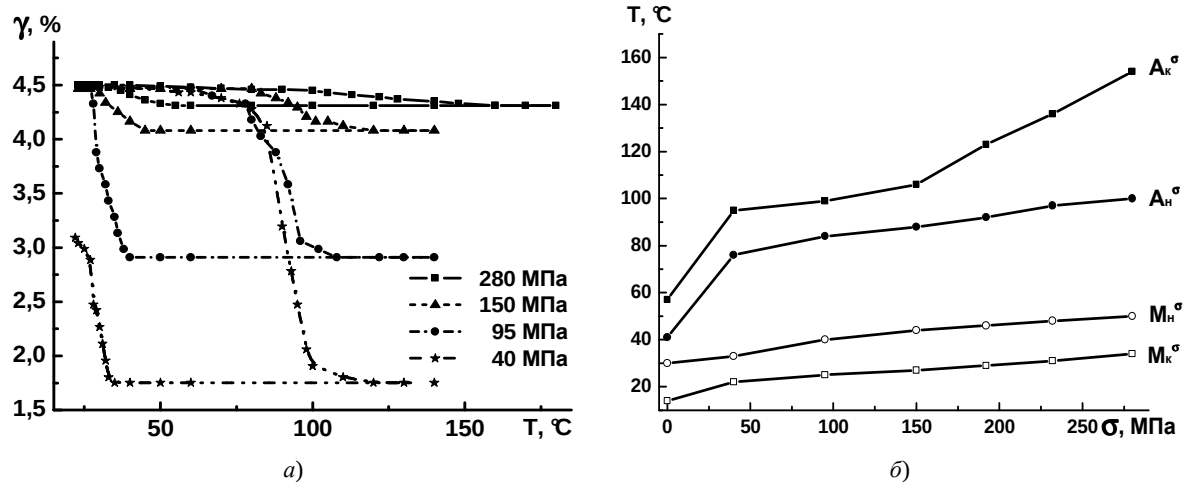
Рис. 4. Зависимости запоминаемых деформаций
в результате низкотемпературной термической и ультразвуковой обработки

Запоминание деформации в результате рассматриваемых видов обработки может быть обусловлено реализацией обратного мартенситного превращения в напряженном материале и связанной с ним частичной релаксацией внутренних напряжений вследствие перераспределения дефектов и перемещения их в новые устойчивые состояния.

В соответствии с уравнением Клаузиуса – Клапейрона характеристические температуры (ХТ) напряженного TiNi сплава могут значительно превышать ХТ материала в свободном состоянии, поэтому для их определения были проведены дополнительные экспериментальные и теоретические исследования.

Экспериментальные исследования температур начала и окончания мартенситных превращений для нагруженного материала проводили следующим образом: проволочные образцы сплава Ti-50,4 ат.% Ni деформировали кручением в мартенситном состоянии на 4,5 %, нагружали, а затем нагревали под действием постоянной нагрузки до температуры на ~ 15…20 °С, превышающей температуру окончания формовосстановления. Последующее охлаждение осуществляли, предварительно ограничив возможность образца деформироваться в обратном направлении на величину, превышающую 4,5 %, что необходимо для исключения накопления дополнительной деформации за счет пластичности превращения при реализации прямого фазового перехода под нагрузкой.

Анализ полученных зависимостей деформации от температуры при действии постоянного напряжения (рис. 5, *а*) показывает, что температуры начала и окончания реализации мартенситных превращений напряженного материала зависят от величины приложенного напряжения (рис. 5, *б*): чем это напряжение больше, тем выше температуры мартенситных переходов, в соответствии с уравнением Клаузиуса – Клапейрона. Наибольшее влияние приложенное напряжение оказывает на температуру окончания обратного мартенситного превращения под нагрузкой $A_к^\sigma$. Вместе с тем с увеличением напряжений уменьшается наклон линий $A_н$… $A_к$ и $M_н$ …$M_к$ и увеличивается температурный интервал формовосстановления. Значения восстанавливаемых деформаций уменьшаются с увеличением прикладываемой нагрузки, и при напряжениях, превышающих ~ 300 МПа, изменения деформаций при нагреве уже не наблюдаются.



а) *б*)

Рис. 5. Зависимости деформации образцов TiNi сплава от температуры под постоянным напряжением (*а*) и определённые по ним температуры прямого и обратного мартенситных превращений в напряженном материале (*б*)

Анализ полученных зависимостей позволяет предположить, что при нагреве заневоленных образцов (в этом случае ситуация аналогична большим значениям приложенных напряжений) обратный переход в них заканчивается при температурах ~ 150 °С, что как раз соответствует точке перегиба на графике зависимости запоминаемой деформации $\varepsilon_А$ от температуры термообработки (см. рис. 2, *а*).

Результаты дополнительно проведенных экспериментов показали, что при увеличении деформации кручением до 15 % и последующем нагреве при постоянном напряжении 500 МПа температура $A_к^\sigma$ увеличивается до ~ 160 °С.

Теоретические исследования температур начала и окончания обратного мартенситного превращения в напряженном материале проводили на основе структурно-аналитической теории прочности [8], согласно которой термоупругое фазовое превращение представляется посредством установления размерного и ориентационного соответствия между элементарными ячейками аустенитной и мартенситной фаз вещества. Характеристикой превращения служит тензор, представленный в базисе мартенсита, симметричная часть которого описывает деформацию решетки при ее превращении, а антисимметричная – поворот.

Уравнение для скорости изменения размера мартенситного кристалла имеет вид:

$$\dot{\Phi} = -\frac{\dot{T}^*}{(M_н - M_к)} \cdot H(-\dot{T}^*) \cdot H(1-\Phi_M) \cdot H(\Phi_0 - \Phi) \cdot H[M_н - \Phi(M_н - M_к) - T^*] + \\ + H(\dot{T}^*) \cdot H(\Phi_M) \cdot H(\Phi_H + \Phi) \cdot H[T^* + \Phi(A_к - A_н) - A_к] \cdot (A_к - A_н)^{-1}, \quad (3)$$

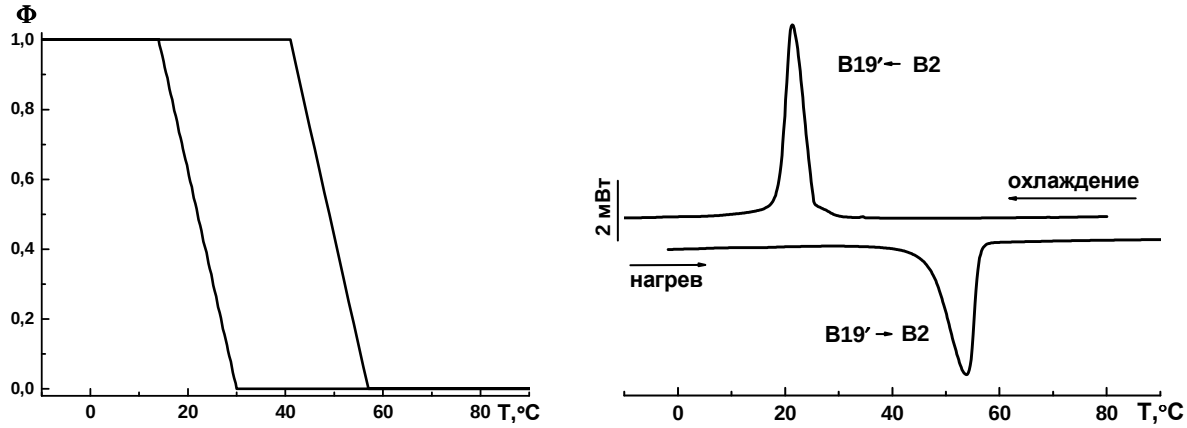
где Ф – количество мартенсита; $H(x)$ – функция Хевисайда; T^* – эффективная температура, которую для превращений первого рода обычно задают через уравнение Клаузиуса – Клапейрона:

$$\dot{T}^* = \dot{T} - \frac{T_0}{q_0} \cdot D_{ik} \cdot \sigma_{ik}, \quad (4)$$

где σ_{ik} – тензор напряжений, представленный в локальном базисе.

Первое слагаемое в (3) описывает кинетику превращения на этапе охлаждения в терминах эффективной температуры, а второе – на этапе нагрева.

Введя соответствующие температуры мартенситных превращений исследуемого TiNi сплава, получили зависимость $\Phi(T^*)$, которая хорошо описывает его калориметрические кривые (рис. 6).



а) *б*)

Рис. 6. Сравнение зависимости количества мартенсита Ф от температуры для модельного TiNi (*а*) и калориметрических зависимостей сплава Ti-50,4 ат.% Ni (*б*)

В результате проведенного моделирования нагрева деформированного в мартенситной фазе TiNi сплава при постоянной нагрузке получены зависимости количества мартенсита Ф от температуры (рис. 7).

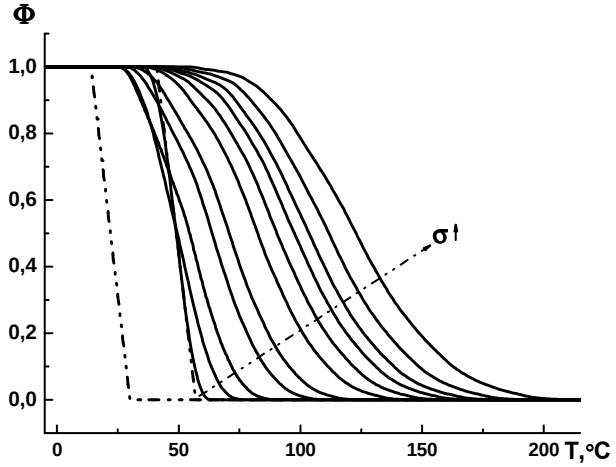
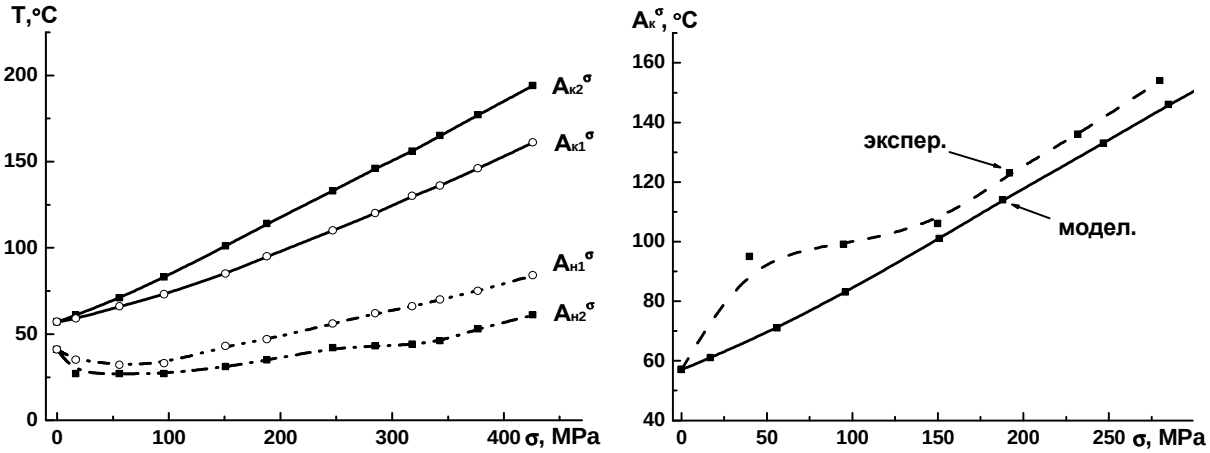


Рис. 7. Зависимости количества мартенсита Ф от температуры при постоянном напряжении для модельного TiNi сплава

Напряжение, при котором моделировали нагрев, увеличивали от 0 до 500 МПа, при этом видно, что с увеличением действующего напряжения уменьшается наклон кривых $A_н…A_к$ и увеличивается температурный интервал формовосстановления, то есть результаты аналогичны полученным при экспериментальном исследовании сплава Ti-50,4 ат.% Ni.

По полученным модельным зависимостям определяли температуры обратного мартенситного превращения под нагрузкой двумя способами: методом наклонных и по началу и окончанию изменения фазового состояния материала (рис. 8, *а*).

Сравнение температур $A_к^σ$, полученных в результате моделирования и при экспериментальных исследованиях, представлено на рисунке 8, *б* и свидетельствует о хорошем согласовании данных, начиная с напряжений ~ 150 МПа. Отклонения значений экспериментальных температур окончания превращения при напряжениях до ~ 150 МПа от расчётных результатов, скорее всего, связаны с инерционностью экспериментальной установки.



а) *б*)

Рис. 8. Температуры мартенситных превращений в напряженном материале:
а – в модельном TiNi; *б* – сравнение $A_к^σ$ модельного и сплава Ti-50,4 ат.% Ni

Таким образом, результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований показали, что при нагреве образцов TiNi сплава под нагрузкой в исследуемом диапазоне напряжений обратный переход в них заканчивается при температурах до 200 °С, то есть запоминание деформации осуществляется при нагреве деформированного и заневоленного мартенсита выше температуры $A_к^σ$, что и объясняет задание памяти при низкотемпературной термической обработке.

Однако в случае ультразвуковой обработки результаты тепловизионных исследований показывают более низкие температуры обратного мартенситного превращения в напряженном материале: обратный переход начинается при температуре ~ 40 ºС, что соответствует $A_н$ и ниже $A_н^σ$, а заканчивается при температурах ~ 65…72 ºС [9], что более чем на 100 ºС ниже $A_к^σ$. Полученные результаты можно объяснить, предположив, что при ультразвуковом воздействии обратный мартенситный переход в напряженном материале реализуется при значительно более низких температурах, чем при термическом.

Сведения об уменьшении температуры окончания обратного фазового превращения на 0…25 ºС при ультразвуковом инициировании ЭПФ впервые были представлены в работах [10; 11], где объясняются влиянием знакопеременных механических напряжений, которые ускоряют движение межфазных границ, ответственных за реализацию эффекта памяти формы. Однако в нашем случае уменьшение температур обратного перехода значительно больше, что, возможно, связано с дополнительным действием реактивных напряжений, появление которых обусловлено невозможностью восстановления деформации за счёт реализации ЭПФ, и снижением пластического течения материала под действием ультразвуковых колебаний (эффект Блага – Лангенекера) [12]. Именно действием силовой составляющей ультразвука можно объяснить увеличение запоминаемой деформации при увеличении амплитуды УЗК, так как максимальная температура нагрева в процессе УЗО варьируется в пределах ~ 65… 72 ºС.

Таким образом, и в случае ультразвуковой обработки задание памяти формы можно объяснить реализацией обратного перехода под действием УЗК в напряженном материале, когда деформация, со-

общенная материалу в мартенситной фазе, частично переходит в пластическую деформацию аустенита. Однако уже то, что обратное превращение реализуется при значительно более низких температурах, чем при термическом воздействии, не может не сказываться на полученных результатах.

Наблюдаемое деформационное поведение, по-видимому, главным образом обусловлено изменением дефектной структуры материала под действием ультразвука – генерацией и перераспределением дислокаций, а также частичной релаксацией напряжений, что и приводит к «запоминанию» наведённой в мартенсите деформации.

Так, в работе [12] рассматривается формирование устойчивой блочной дислокационной структуры под действием ультразвука, сохраняющейся и после его выключения, причём указывается на то, что структура границ блоков ультразвукового происхождения отличается от структуры границ термического происхождения (образовавшихся в процессе отжига). О релаксации внутренних напряжений в результате ультразвуковой обработки деформированного и заневоленного материала косвенно свидетельствует и снижение температуры образца до ~ $A_к$ после достижения максимального значения в процессе ультразвукового воздействия.

Заключение. Результаты проведенного исследования показали, что задание памяти формы конструкциям из сплавов TiNi можно осуществлять посредством термической обработки при температурах, не превышающих 200 ºС, а в случае использования ультразвуковой обработки максимальная температура материала не превышает ~ 72 ºС, при этом запоминаемая деформация составляет до ~ 80 % от наводимой.

На основании анализа полученных результатов предложена физическая модель процесса задания памяти формы при низкотемпературной обработке, заключающаяся в реализации обратного мартенситного превращения в деформированном и заневоленном материале и связанной с ним частичной релаксации внутренних напряжений, в результате чего часть деформации, наведенной в мартенситной фазе, переходит в пластическую деформацию аустенитной фазы. Модель также позволяет установить связь между запоминаемой деформацией и температурой обработки, которая подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований зависимости температуры окончания обратного мартенситного превращения в напряженном материале от параметров обработки.

Предложены новые низкотемпературные способы обработки сплавов TiNi для задания памяти формы, заключающиеся в деформации нормализованного материала в мартенситной фазе, заневоливании и последующем инициировании прямого и обратного фазовых превращений, при этом инициирование прямого перехода может осуществляться либо термическим, либо ультразвуковым воздействием. Главными преимуществами предложенных способов обработки в сравнении с известными являются:

- использование низких температур (до 200 ºС);
- кратковременность обработки (до 5 мин);
- отсутствие повреждений поверхностного слоя материала;
- возможность обработки комбинированных элементов конструкции и элементов с покрытиями, не допускающих температур, превышающих 200 ºС;
- упрощение требований к оснастке для заневоливания образцов в связи с использованием низких температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука [и др.]; под ред. Х. Фунакубо; пер. с японск. И.И. Дружинина. – М.: Металлургия, 1990. – 224 с.
2. Foundations of heat and thermomechanical treatments and their effect on the structure and properties of titanium nickelide-based alloys / V. Brailovski [et al.] // The physics of metals and metallurgy. – Vol. 97, supple 1. – 2004. – P. 3–55.
3. Prokoshkin, S. Shape memory alloys: fundamentals, modeling and applications / S. Prokoshkin [et al.]. – Montreal: ETS Publ., 2003. – 844 p.
4. Хачин, В.Н. Никелид титана: Структура и свойства / В.Н. Хачин, В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев. – М.: Наука, 1992. – 160 с.
5. Thermomechanical treatments and their influence on microstructure and stress-strain diagrams of Ni-Ti shape memory alloys / S.D. Prokoshkin [et al.] // Canadian Met. Quart. – 2004. – V. 43, No. 1. – P. 95–108.
6. Influence of Ultrasonic Treatment on Shape Memory Effects in Ti-50,4 at.% Ni Alloy / S.N. Miliukina [et al.] // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 738–739. – P. 362–366.
7. Тяпунина, Н.А. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами / Н.А. Тяпунина, Е.К. Наими, Г.М. Зиненкова. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 238 с.

8. Лихачев, В.А. Структурно-аналитическая теория прочности / В.А. Лихачев, В.Г. Малинин. – СПб.: Наука, 1993. – 471 с.
9. Динамика ультразвукового нагрева TiNi сплавов с эффектом памяти формы / С.Н. Милюкина [и др.] // Перспективные материалы и технологии: междунар. симпоз., Витебск, 27–29 мая 2015 г.: материалы конф. / Витебс. гос. технолог. ун-т. – Витебск, 2015. – С. 323–325.
10. Generation of shape memory effect in Ti-Ni alloy by means of ultrasound / V.V. Klubovich [et al.] // Shape Memory and Superelastic Technologies: Engineering and Biomedical Applications: Proceedings II Intern. Conference, California, USA, 2–6 March 1997; Ed. by A. Pelton [et al]. – Asilomar, California, 1997. – P. 59–64.
11. Изменение температуры резонансных образцов при ультразвуковом воздействии / В.В. Клубович [и др.] // Актуальные проблемы прочности: материалы XLIII междунар. конф., Витебск, 27 сент.–1 окт. 2004 г.: в 2 ч. – Витебск, 2004. – Ч. 1. – С. 336–340.
12. Северденко, В.П. Ультразвук и пластичность / В.П. Северденко, В.В. Клубович, А.В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1976. – 446 с.
13. Дегтярёв, В.Т. Динамика дислокаций в щелочно-галоидных кристаллах при наложении ультразвука: дис. … д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / В.Т. Дегтярёв. – М., 2007.

Поступила 17.08.2015

METHODS AND MODEL OF LOW-TEMPERATURE SHAPE MEMORY SETTING IN TiNi ALLOYS

V. RUBANIK, V. RUBANIK (jr.), S. MILIUKINA

The research results of low-temperature heat and ultrasonic treatment on setting strain in the samples of Ti-50,4 at.% Ni alloy with shape memory are presented in this paper. It is found that shape memory setting of TiNi actuators can be carried out by heat treatment at temperatures not exceeding 200 °C, and in the case of using ultrasonic treatment the maximum temperature will not be higher than ~ 72 °C. We offer a model of the low-temperature shape memory setting process, that establishes a connection between the setting strain and heat treatment temperature or the intensity of ultrasonic vibrations and treatment duration and confirmed by the results of theoretical and experimental investigations of the finish reverse martensite transformation temperature in a stressed material. The low-temperature methods of TiNi alloys processing for shape memory setting by heat or ultrasonic treatment are developed.

УДК 004.67/621.01

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМИНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ; Г.А. УВАРОВ; А.Н. ВАСЬКОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

Анализируется проблема совершенствования содержания стандартов в части определения системообразующих терминов в области определения технического состояния автомобильных агрегатов. Обоснована актуальность рассматриваемого вопроса. Предложены отраслевые уточнения для общетехнических терминов при их использовании применительно к ремонту автомобилей с учетом специфики диагностирования и ремонта.

Введение. Профессиональная терминология образует тезаурус данной предметной области, позволяющей достичь большей информативности в общении специалистов. При различиях в терминологии сообщаемая информация искажается, а часть ее теряется. Индивидуальный тезаурус получателя информации отражает его знания о данном предмете, поэтому количество информации оценивается степенью изменения его тезауруса, произошедшего после приема информации. Таким образом, количество воспринимаемой информации нелинейно зависит от состояния индивидуального тезауруса получателя. Получатели, имеющие разные тезаурусы, будут получать неодинаковое количество информации. Если индивидуальный тезаурус получателя информации близок к нулю (он не владеет профессиональной терминологией), то и количество воспринятой им информации также близко к нулю (получатель не понимает смысла сообщения или понимает его неверно) [1].

Для эксперта, определяющего причины неисправностей автомобильных агрегатов, необходимо также и правильно их описать. При этом, описывая свойства объекта исследования, необходимо опираться на стандартные термины. Однако стандартизированная терминология автомобильной отрасли до сих пор не обладает логической завершенностью. Действующие стандарты в области технической эксплуатации автомобилей опираются на документы, имеющие к автомобильному транспорту опосредованное отношение, следовательно, они в недостаточной степени отражают отраслевую специфику.

Основная часть. Рассмотрим устоявшуюся терминологическую практику эксплуатационников, опирающуюся на объективные причинно-следственные закономерности. Заметим при этом, что разработка онтологий – достаточно сложная и емкая задача. Наибольшую трудность в этом аспекте представляет разработка системы информации об объектах стандартизации, адекватной рассматриваемой области. Необходимо, чтобы терминология максимально приближалась к естественному типу, опиралась на свойства, достаточные для идентификации материальных объектов, процессов и явлений, а логика ее построения должна соответствовать структуре взаимодействия этих объектов. Также необходимо, чтобы она отражала объекты с их отношениями и учетом развития взаимосвязей. Только в этом случае стандартизированная терминология может выражать элементы структур, которые существуют в отражаемом ею мире, с учетом тенденций развития. Так как научно-технический прогресс динамично изменяет объекты, процессы и средства производства, актуальность введения новых и уточнения традиционных терминов не вызывает сомнений. Важным шагом в этом направлении представляется популяризация постулатов и терминологии общей теории систем.

Республика Беларусь унаследовала систему государственных стандартов Советского Союза. Согласно ГОСТ 25866-83 [2] термин «техническое обслуживание» определяется по ГОСТ 18322-78 [3], который, в свою очередь, при определении термина «техническое состояние» ссылается на авиационный ГОСТ 19919-74 [4]. Согласно [4] термин «техническое состояние» определяется как «совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта, характеризуемая в определенный момент времени признаками, установленными технической документацией на этот объект. При этом видами технического состояния являются работоспособность, неработоспособность, исправность, неисправность и др.». Таким образом, при разработке методики диагностирования, позволяющей устанавливать виды состояний, отличные от ранее установленных технической документацией, разработчик должен предложить производителю внести соответствующие изменения в техническую документацию на транспортное средство, что не всегда продуктивно на практике.

Ссылки на авиационные стандарты имеют историческую основу, неактуальную в настоящее время. Тезаурус авиационной области знаний апеллирует своим пониманием к эксплуатационной надежности, методологией оценки и управления состоянием технических объектов, связанных со спецификой их конструкций, к функционированию. Например, термин «обслуживание по состоянию» для авиаторов означает больший отход от практики строго регламентированных (по наработке) замен агрегатов; для

автомобилистов данный термин означает больший учет эксплуатационных факторов. Недостаточная определенность терминов для их практического применения в части идентификации технического состояния наглядно проявляется в авиационном ОСТ 1.02776-2001 [5] (подходящему по ряду положений и для автомобильного транспорта). В этом стандарте техническая эксплуатация «по состоянию» определяется как «эксплуатация, при которой замена изделия при всех видах технического обслуживания и ремонта для его восстановления или списания производится только при отказе изделия или достижении им предотказного состояния». Понятие «предотказное состояние» при этом опирается на «упреждающий допуск». В свою очередь, «упреждающий допуск определяющего параметра» трактуется как «диапазон изменения определяющего параметра, границы которого устанавливают область предотказного состояния изделия», что является циклической ссылкой без толкования сути. Некорректную перекрестную ссылку мы видим и при определении терминов «Техническая эксплуатация по состоянию (ТЭС)» и «Метод технической эксплуатации до предотказного состояния (ТЭП)». ТЭП – метод технической эксплуатации до достижения им предотказного состояния; ТЭС – эксплуатация, при которой замена изделия или его восстановление производится только при отказе изделия или достижении им предотказного состояния.

Анализ государственных стандартов, устанавливающих терминологию описания надежности продукции, также свидетельствует о несоответствии. Так, в ГОСТ 15467-79 [6] имеется как внутреннее противоречие, так и противоречие с технической литературой в области обслуживания и ремонта автомобилей. Традиционно в отечественных технических условиях на контроль и сортировку при ремонте использовался термин «дефект». В учебной литературе и справочниках по ремонту отмечают, что при входном контроле ремонтного фонда проверяется наличие или отсутствие дефектов, которые возникли ранее при использовании изделий по назначению. От этого происходит сам термин «дефектация» [7–11].

Согласно ГОСТ 27.002-89 [12] «переход объекта из одного состояния в другое *обычно* происходит вследствие повреждения или отказа. Переход объекта из исправного состояния в *неисправное работоспособное* состояние происходит из-за *повреждений*. Данный стандарт должен применяться совместно с [3]». «Повреждение – это событие, при котором происходит нарушение исправного состояния изделия вследствие влияния внешних воздействий, превышающих уровни, установленные нормативно-технической документацией на изделие». При трактовке термина «дефект» дается ссылка на ГОСТ, в котором указано, что, «находясь в неисправном состоянии, изделие имеет один или несколько дефектов» [6].

Обращает на себя внимание тот факт, что российский ГОСТ Р53480-2009 [13] дает другое определение термина «дефект», даже не ссылаясь на [6]. В [13] при определении термина «повреждение» термин «неисправность» не применяется. Этот ГОСТ в отношении неисправности указывает, что они могут быть «конструкционными», а не «конструктивными», как в [6], и «производственными». При этом термин «эксплуатационная неисправность» не устанавливается. Термин «дефект» применяется для готовой продукции промышленного производства – при контроле качества во время изготовления и ремонта. В то же время термин «дефект» не распространяется на последующее использование продукции. Также говорится, что дефектация – это контроль качества отремонтированной продукции. Но это также не совсем верно. Дефектация – это сортировка ремонтного фонда, то есть объектов, поступивших в ремонт, а отремонтированная продукция проходит приемочный (выходной) контроль. В данном случае речь идет не о дефектах, которые возникли в ремонте, а о дефектах (неисправностях, повреждениях), возникших при использовании продукции по назначению. Хотя такие дефекты можно было бы трактовать двояко, в том числе как дефекты деталей для последующей сборки при ремонте (вторичном производстве). Термин «вторичное производство» был введен профессором К.Т. Кошкиным во время развития индустриального ремонта [9].

Термин «дефект» следует отличать от термина «отказ». Отказом является событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия, которое ранее было работоспособным. Отказ может возникнуть в результате наличия в изделии одного или нескольких дефектов, но появление дефектов не всегда означает, что возник отказ, то есть изделие стало неработоспособным.

Техническое состояние объекта как «состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией, определяет ГОСТ 20911-89 [14]. Об изменении технического состояния объекта судят по значениям диагностических (контролируемых) параметров, позволяющих определить техническое состояние агрегата без его разборки. В ГОСТ 30848-2003 [15] применены термины согласно [14], а также следующие термины:

- *анализ технического состояния* как выявление сущности, закономерностей, тенденций, причин процессов деградации машины на основании мониторинга технического состояния в целях прогнозирования, планирования, коррекции, управления и принятия решений;

- *неисправность* (неисправное состояние) как состояние машины, возникающее в случае, когда вследствие деградации любой ее детали или узла устанавливается аномальный режим работы, что *может* привести к отказу машины. (Однако согласно [12] в *неисправном состоянии* изделие не соответствует хотя бы одному из требований технической документации, не обязательно приводящих к отказу);

- *отказ* как событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния машины, которое наступает, когда машина утрачивает *одну или несколько* своих *основных* функций. Отказ машины обычно происходит в том случае, когда *один или несколько* ее компонентов находятся в неисправном состоянии. (Не совсем понятны избыточность формулировки «одну или несколько» и термин «основная функция»).

По [13] «неисправность – состояние изделия, характеризующееся неспособностью выполнять требуемую функцию…», «отказ – потеря изделия выполнять требуемую функцию», то есть событие, а «неработоспособное состояние – состояние изделия, при котором оно неспособно выполнять требуемую функцию…». Формулировка «требуемая функция» [13] представляется нам более правильной, чем «основная функция» [12]. Однако [13] прямо противоречит [6]. Далее, «при наличии повреждения нарушается исправное состояние объекта, а работоспособное состояние сохраняется» [12]. Но при возникновении неисправности наступает неработоспособное состояние изделия [13].

Таким образом, при возникновении неисправности агрегат остается работоспособным в случае, если он может выполнять заданные функции, сохраняя при этом значения заданных выходных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Однако когда значение хотя бы одного выходного параметра не соответствует установленным требованиям, агрегат характеризуется как неработоспособный. Сформулированное согласно [6; 12; 13] совокупное определение «неисправности» в итоге лишается смысла.

Вышеуказанные ошибки определения терминов не так однозначны, как это может показаться на первый взгляд. По нашему мнению, проблема лежит гораздо глубже, чем несогласованность стандартов. Она заключается в искусственно упрощенной методологии в части определения видов состояний технического объекта.

Автомобиль с точки зрения теории надежности является сложным техническим объектом, состоящим из подсистем и элементов. Критичность неисправностей элементов определяет функциональность систем (узлов и агрегатов), которые в свою очередь могут являться подсистемами или элементами систем более высокого порядка. Использование основных постулатов общей теории систем позволяет разрешить трудность в определении терминов, характеризующих состояние элементов в зависимости от масштаба рассмотрения системы.

Подмена терминов общей теории систем «элемент», «подсистема», «система» терминами «компонент», «изделие», «машина» и т.п. приводит к разночтениям. Именно по этой причине определения терминов «неисправность» и «отказ» в [13] не соответствуют по форме и содержанию определениям в [12] и [6]. Отказ одного и того же объекта может трактоваться как критический или некритический, существенный или несущественный в зависимости от того, рассматривается ли объект как таковой или он является составной частью другого объекта. Несущественный отказ объекта, входящего в состав более ответственного объекта, может рассматриваться как существенный и даже критический в зависимости от последствий отказа сложного объекта. Для проведения классификации отказов по последствиям необходим анализ критериев, причин и последствий отказов и построение логической и функциональной связи между отказами. При классификации отказов по последствиям могут быть введены две и более категории отказов. Границы между этими категориями достаточно условны.

Рассмотрим устоявшуюся практику использования терминов в эксплуатации автомобилей. Очевидно, что термин «дефект» связан с термином «неисправность», но не является его синонимом. Неисправность представляет собой определенное состояние изделия, вызванное определенным событием – *повреждением*, которое заключается в нарушении исправного состояния изделия. Таким образом, в отличие от дефекта, возникающего при производстве, повреждение возникает при использовании агрегата по назначению, хранении и транспортировании. В то же время, находясь в неисправном состоянии, изделие может иметь один или несколько дефектов, возникших при его изготовлении. Следует отметить, что в ГОСТ не указываются такие понятия, как «эксплуатационный дефект» и «эксплуатационная неисправность», однако не содержатся и прямые запреты на использование подобных терминов. Если учесть, что согласно [6] допускается применение отраслевых терминов, не установленных настоящим стандартом, отражающих специфические особенности продукции отрасли, то применение подобных терминов можно считать допустимым до приведения отраслевых стандартов в состояние, не противоречащее в применении терминов друг другу.

Например, так как гарантийный ресурс автомобиля МАЗ составляет один год или 100 тыс. км пробега, то он не может отражать его *номинальный* ресурс *предполагаемый* потребителем при приобретении автомобиля или деталей (реальные ресурсы современных автомобилей такого типа лежат далеко за пределами одного миллиона километров пробега). Термин «дефектация» используется при контроле состояния автотранспортных средств *вне зависимости от их наработки по пробегу*. При *дефектации* определяют содержание и объем предстоящего ремонта. Правомерность использования данного термина связана со сложностью определения причин неисправности *в условиях эксплуатации*, так как некоторые дефекты конструкции изделия или свойств материала, или технологии его производства могут проявиться спустя значительное время как уменьшенный ресурс.

Термин «неисправность» используется эксплуатационниками в более широком смысле, чем термин «дефект». Данный термин используется в случаях, когда не известен объем предстоящего ремонта, точно не известна неисправная деталь, но при этом присутствует достоверный факт нарушения степени функциональности системы. При установлении снижения функциональности часто говорят что «неисправен (некий) агрегат или система», таким образом, указывая на локализацию неисправности. Действительные причины снижения функциональности агрегата или системы определяют путем диагностирования или проверки. Также может быть принято решение о замене неисправного агрегата без выяснения характера неисправности и конкретной неисправной детали, причин нарушения функциональности. Такой ремонт «заменой агрегатов» служит цели уменьшить время ремонта, для чего на предприятии создается обменный фонд агрегатов.

Термин «отказ» применяется *эксплуатационниками* для указания на высокую степень критичности или определенности неисправности. Критичность и определенность – разноплановые понятия, а их обобщение в термине «отказ», по-видимому, связано с желанием выразить необходимость производства ремонта. То есть термин «отказ» эксплуатационники применяют более широко, чем «технический отказ». Для них «отказ» означает направление агрегата в ремонт с его выводом из эксплуатационного процесса.

Тезаурус зарубежных эксплуатационников опирается на систему терминов, отличную от отечественной, что связано с объективными различиями в культуре и экономике. В международных документах ИСО, МЭК и ЕОКК [16–18] различают «рабочее состояние» (operating state) и «нерабочее состояние» (non-Operating state), при котором объект не применяется по назначению. В свою очередь, «нерабочее состояние» подразделяют на состояние дежурства (stand by state) и состояние планового простоя (idle, free state). Кроме того, различают «внутренне» неработоспособное состояние (internal disabled state), обусловленное отказом или незавершенностью планового технического обслуживания (ремонта), и внешне неработоспособное состояние (external disabled state), обусловленное организационными причинами. Чтобы проводить классификацию отказов по их последствиям, введено понятие критичности отказа. Различают критические (critical) и некритические (non-critical) отказы. Последние подразделяют на существенные (major) и несущественные (miner). Критерием для классификации могут служить прямые и косвенные потери, вызванные отказами, затраты труда и времени на устранение последствий отказов, возможность и целесообразность ремонта силами потребителя или необходимость ремонта изготовителем или третьей стороной, продолжительность простоев из-за возникновения отказов, степень снижения производительности при отказе, приводящем к частично неработоспособному состоянию, и т.п.

Нам представляется актуальным при определении видов состояний систем автомобиля использовать пояснение к терминам «Техническое состояние», «Контроль технического состояния» и «Контроль функционирования»: «Зависимости между входными и внутренними переменными изделия, описываемой функционалом (оператором и т.п.), можно поставить в соответствие фазовое пространство технических состояний, присущих данному изделию. Причем каждому попрано различимому сочетанию значений указанных переменных соответствует точка этого пространства. Все множество точек фазового пространства установленной функцией качества можно разбить на два или более подмножеств» [6].

В ГОСТ Р 27.302-2009 [19] говорится: «При качественном методе вероятность событий или частоту их возникновения не рассматривают. Это метод заключается в детальном анализе совокупности событий/неисправностей. Его применяют, когда необходимо выявить возможные причины неисправностей безотносительно реальной вероятности их возникновения. Иногда некоторые события, рассматриваемые при проведении качественного анализа, оценивают и количественно, но такие расчеты не связаны с попытками расчета общей безотказности. При количественном методе в процессе детального анализа дерева неисправностей полностью моделируют изделие, процесс или систему и оценивают вероятность возникновения базисных событий, неисправностей или событий, выявленных в ходе анализа. В данном случае окончательный результат представляет собой вероятность появления завершающего события, свидетельствующего о вероятности возникновения неисправности или отказа. (Настоящий стандарт разработан с учетом основных нормативных положений международного стандарта МЭК 61025:2006 «Анализ дерева неисправностей» (IEC 61025:2006 «Fault tree analyses», NEQ)).

По нашему мнению, при определении вида технического состояния агрегатов автомобилей с использованием инструментальных программно-аппаратных средств и методик диагностирования и последующим назначением ремонтных работ «по состоянию» востребовано использование термина «предотказное состояние» с указанием количественного значения *степени принадлежности к отказу* согласно приводимой функции (в рамках теории нечетких множеств). При этом возможно использовать алгоритмы (методы) определения достоверности диагностирования, которые опираются на отличающиеся от статистических методы: теорию очевидностей Демпстера – Шейфера, теорию возможностей Дюбуа – Прада и другие модели квазивероятности [20].

Заключение. Проведенное исследование указывает на необходимость уточнения стандартов в области технической эксплуатации автомобильного транспорта. Важность полноты и точности определе-

ния технического состояния агрегатов возрастает с ростом сложности автомобилей, их технического обслуживания и ремонта. Обращено внимание на тот факт, что согласно действующим стандартам при диагностировании автомобилей необходимо опираться на термины и определения технического состояния, определенные как стандартами, так и технической документацией производителя транспортных средств. В результате, сегодня в эксплуатации автомобилей нет однозначно стандартизированных терминов для описания неисправностей, которые бы не вызвали противоречий с одним из действующих стандартов.

Введение в техническую эксплуатацию автомобилей стандартизированных терминов «предотказное состояние» и «техническая эксплуатация по состоянию» с указанием степени принадлежности к отказу позволит совершенствовать организацию ремонта со снижением затрат и повышением коэффициента технической готовности парка автомобилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саак, А.Э. Информационные технологии управления: учебник для вузов / А.Э. Саак, Е.В. Пахомов, В.Н. Тюшняков. – СПб.: Питер, 2009. – 320 с.
2. Эксплуатация техники (термины и определения): ГОСТ 25866-83. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1990.
3. Система технического обслуживания и ремонта техники: ГОСТ 18322-78. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004.
4. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники (термины и определения): ГОСТ 19919-74. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1974.
5. Эксплуатация техническая авиационной техники по состоянию: ОСТ 1.02776-2001. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.
6. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 15467-79 (СТ СЭВ 3519-81). – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1981.
7. Хрулев, А.Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей / А.Э. Хрулев. – М.: Изд-во «За рулем», 1999. – 480 с.
8. Петросов, В.В. Ремонт автомобилей и двигателей / В.В. Петросов. – М.: Академия, 2005 – 224 с.
9. Технология авторемонтного производства: учебник для вузов / А.И. Асриянц [и др.]; под ред. К.Т. Кошкина. – М.: Транспорт, 1969. – 568 с.
10. Техническая эксплуатация автомобилей: учебник для вузов / Ю.П. Баранов [и др.]; под ред. Г.В. Крамаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 488 с.
11. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-89. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
12. Надежность в технике. Термины и определения: ГОСТ Р53480-2009. – М.: Изд-во стандартов, 2009.
13. Техническая диагностика. Термины и определения: ГОСТ 20911-89. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
14. Диагностирование машин по рабочим характеристикам. Общие положения: ГОСТ 30848-2003 (ИСО 13380:2002). – М.: Изд-во стандартов, 2003.
15. Data Processing Vocabulary. Section 14. Reliability, Maintenance and Availability. – Geneva: ISO 2382, 1976. – 16 p.
16. International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 191. Reliability, Maintainability and Quality of Service (draft). – Geneva: International Electrotechnical Commission, 1987. – 75 p.
17. EOQC Glossary. – Bern: EOQC. 1988. – 24 p.
18. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей: ГОСТ Р 27.302-2009. – М.: Изд-во стандартов, 2010.
19. Пытьев, Ю.П. Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение / Ю.П. Пытьев. – М.: Физматлитиздат, 2007. – 464 с.

Поступила 06.07.2015

PERFECTION OF TERMINOLOGY OF DIAGNOSING CARS SYSTEMS

V. IVANOY, G. UVARAY, A. VASKOVICH

The problem of perfection of standards regarding definition of backbone terminology in a range of definition of a technical condition of automobile units is proved. Offered article to give branch specifications for terminology at use with reference to car systems taking into account specificity of diagnosing and repair.

УДК 66.013.8

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ЭМУЛЬСИИ НА ОСНОВЕ ОТРАБОТАВШИХ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ

В.А. ДРОНЧЕНКО
(Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния содержания воды на стабильность эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов приготовленной с помощью ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя. На основе проведенных исследований определено оптимальное содержание воды в эмульсии, позволяющее получить эмульсию со стабильностью, достаточной для ее промышленного использования в качестве смазки форм при производстве железобетонных изделий. Приведены рекомендации по совершенствованию технологии, позволяющие решить вопросы охраны труда и здоровья работников предприятий, а также защиты окружающей среды от вредного воздействия отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств.

Развитие промышленности Республики Беларусь тесно связано с интенсификацией переработки нефти, применением различных типов топлив и смазочных материалов. В результате на предприятиях накапливаются различные нефтесодержащие отходы, оказывающие негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека. Токсичность и канцерогенность отработавших нефтесодержащих продуктов (НСП) и растворов технических моющих средств (ТМС) обусловлены разложением их компонентов в процессе эксплуатации, а также посторонними загрязнениями. Исследования [1] показали, что в ряде отработавших НСП, по сравнению с товарными, наблюдается рост биологически активных полициклических аренов. Биологическая активность данных соединений проявляется в их канцерогенности (при воздействии на организм вызывают злокачественные опухоли), слабой мутагенности (воздействие на генетический код), тератогенности (повреждение зародыша, приводящие к аномалиям его развития, уродствам), эмбриотоксичности (воздействие на плод, приводящие к его гибели до рождения) и ряду других расстройств организма [1].

Отработавшие НСП и растворы ТМС относятся к числу наиболее вредных химических загрязнителей окружающей среды [2], которые подлежат обязательному сбору и утилизации, а в отдельных случаях уничтожению. Однако сбору, регенерации и утилизации отработавших нефтесодержащих продуктов (НСП) и технических моющих средств уделяется недостаточное внимание. В результате в настоящее время на территории машиностроительных, ремонтных и нефтеперерабатывающих предприятий Беларуси находятся значительные запасы отработавших НСП. Во многом это объясняется теми требованиями, которые предъявляются к отработавшим нефтепродуктам, предназначенным для регенерации, очистки и использованию взамен или наряду с другими нефтепродуктами. Так, согласно [3] смеси отработавших нефтепродуктов, предназначенные для использования в качестве компонента котельного топлива, должны удовлетворять следующим требованиям: массовая доля механических примесей не более 1 %; массовая доля воды не более 2 %; отсутствие загрязнений.

Для удовлетворения требованиям ГОСТ [3] требуется дорогостоящее специализированное оборудование, что в сочетании со сравнительно небольшими объемами отработавших НСП и большими расходами на транспортировку к местам централизованной приемки для большинства малых и средних предприятий делает сбор, регенерацию и утилизацию экономически нецелесообразными. Для таких предприятий перспективным является поиск способов применения отработавших НСП непосредственно на предприятии либо на предприятиях данного региона, причем желательно с минимальными затратами на очистку и переработку. Один из возможных способов такого применения – получение эмульсий и эмульсолов на основе отработавших НСП и растворов ТМС с помощью ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя, с последующим использованием для различных целей как самим предприятием, так и другими предприятиями [4; 5]. Однако применение этого способа для получения эмульсии с требуемой стабильностью является серьезной проблемой.

Цель экспериментов данного исследования – изучение влияния содержания воды на стабильность эмульсии.

Методика определения влияния содержания воды в эмульсии на её стабильность. В настоящее время на промышленных предприятиях разработаны и применяются следующие методы получения эмульсий: конденсационный, дисперсионные, ультразвуковые и прерывистого встряхивания с применением различного вида смесителей, шестеренчатых насосов, коллоидных мельниц, гомогенизаторов и др. [6; 7]. Наиболее широко используются способы механического перемешивания, позволяющие получать эмульсию с

размером капель 200…500 мкм, что не дает возможности получить эмульсию на основе отработавших НСП и растворов ТМС с требуемой стабильностью, так как такая эмульсия быстро расслаивается.

Для получения мелкодисперсной эмульсии с требуемой стабильностью в настоящей работе применен способ получения эмульсии с помощью ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя [4; 5; 8]. Сжатый воздух в пневмокамеру пневматического излучателя может подаваться как от компрессора или баллона со сжатым воздухом, так и от заводской сети сжатого воздуха через рампу управления. При превышении в пневмокамере заранее установленного давления она срабатывает, производя в окружающую среду выхлоп сжатого воздуха, вследствие чего давление в рабочем объеме этой камеры резко падает. Затем сжатый воздух поднимает давление во всех пневмокамерах до первоначального, срабатывает активная пневмокамера, и описанный выше процесс повторяется. Частоту выхлопов камеры пневматического излучателя можно регулировать рампой управления.

Следует отметить, что при погружении пневматического излучателя на глубину свыше полуметра образующаяся при выхлопе сжатого воздуха воздушная полость резко расширяется и совершает несколько (как правило, до четырех) постепенно затухающих по амплитуде пульсаций. Пульсирующая газовая полость является источником чередующихся импульсов давления-разряжения за промежуток времени. После пульсаций происходит схлопывание воздушного пузыря, в результате давление во фронте в 2,5…3,0 раза превышает давление в пневматическом излучателе вследствие несжимаемости жидкости. Все это способствует получению мелкодисперсной эмульсии.

Для оценки возможности приготовления эмульсии с требуемой стабильностью, а также для последующего рационального использования сырья для производства эмульсии необходимо определить зависимость между процентным содержанием воды в эмульсии и её стабильностью.

В настоящее время используются методы испытания нефтяных эмульсолов и паст, описанные в [9]. Согласно данному стандарту устанавливаются следующие параметры испытаний: внешний вид; коррозионная агрессивность; стабильность; pH эмульсии; стабильность эмульсола при низких температурах; стабильность эмульсола при хранении; содержание свободной щелочи, кислотного числа; общее содержания высокомолекулярных органических кислот.

Эмульсии – это дисперсные системы, состоящие из двух жидкостей, малорастворимых или нерастворимых друг в друге. В зависимости от того, что является дисперсной фазой, различают эмульсии «масло в воде» (прямые эмульсии) и эмульсии «вода в масле» (обратные эмульсии). В [9] метод испытания стабильности эмульсии предназначен для эмульсий типа «масло в воде».

В представляемой работе исследуются эмульсии типа «вода в масле», поэтому метод исследования несколько отличается от изложенного в [9].

Для всех экспериментальных исследований использовались одинаковые по первоначальному химическому составу отработавшие НСП и растворы СМС. Их химический состав определялся в соответствии с методическими указаниями [10] с целью получить раствор нефтесодержащих фракций отработавших НСП и раствор СМС в гексане с предварительным подкислением соляной кислотой и экстрагированием хлороформом с последующим взаимодействием с активированным оксидом алюминия [10]. После отгонки раствора измерялась масса нефтепродуктов. Кроме того, измерялась концентрация поверхностно-активных веществ (ПАВ) в отработавших НСП и растворах СМС, играющих немаловажную роль при последующем получении эмульсии. Исследования проводились фотометрическим методом, основанным на образовании сложных комплексов йода, активированного хлористым барием с неионогенными ПАВ. Измерялось помутнение раствора в результате реакции, интенсивность которого пропорциональна концентрации ПАВ.

С целью повышения достоверности экспериментов в каждой серии опытов создавались одинаковые условия – давление в сети сжатого воздуха, частота импульсов, температура, процентное содержание веществ, влияющих на стабильность эмульсии и время перемешивания.

Способ подготовки компонентов к опыту: в ёмкость заливалась вода (её объем определялся по высоте столба жидкости); затем добавлялся эмульгатор (объём которого измерялся мерной колбой), жидкость перемешивалась до полного растворения эмульгатора при помощи пневматического излучателя; после этого добавлялся отработавший смазочный материал НСП, который предполагалось использовать в качестве основы для приготовления эмульсии. Компоненты нагревались при помощи трубчатого электронагревателя.

Схема проведения экспериментов была следующей: после перемешивания в течение 15 минут (так как большее время перемешивания не даёт ощутимого влияния на стабильность) бралась проба с поверхности и со дна жидкости; добавлялась вода для получения нового процентного соотношения вода – НСП (в которую уже был введён эмульгатор с целью сохранения процентного соотношения жидкость/эмульгатор); затем проверялась температура жидкости (при необходимости проводился дополнительный подогрев); компоненты вновь перемешивались в течение 15 минут и т.д.

Измерение объёмов жидкости проводилось путем измерения её глубины в рабочей ёмкости, диаметр которой известен.

Стабильность приготовленной эмульсии оценивалась по количеству выделившейся воды за промежутки времени от 1 до 30 дней. Расслоение измерялось по высоте столба жидкости в пробирках.

Стабильность эмульсии (X) (содержание в эмульсии избыточной воды, находящейся в неэмульгированном состоянии) в процентах вычислялась по формуле

$$X = \frac{\nu_1}{\nu} \cdot 100,$$

где ν_1 – объем воды, выделившейся из эмульсии, мл; ν – объем испытуемой эмульсии, мл.

Экспериментальное исследование влияния содержания воды в эмульсии на её стабильность. Исследования проводились на опытно-промышленной установке по приготовлению эмульсии ударно-волновым способом на ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт».

В качестве основы для приготовления эмульсии использовались отработавшие НСП и СМС, смазка ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт». С целью экономного расхода материалов, необходимых для экспериментов, была изготовлена небольшая ёмкость (объёмом 40 л), в которую для проведения экспериментов из опытно-промышленной установки переставлялся пневматический излучатель.

При помощи пульта управления устанавливалась частота импульсов (1 импульс в секунду) при давлении в сети подвода сжатого воздуха 0,4 МПа. В качестве эмульгатора использовались поочередно составы 1 и 2, взятые в количестве 1 % от приготовленной эмульсии [4; 5].

Результаты проведенных экспериментов проиллюстрированы рисунками 1–6.

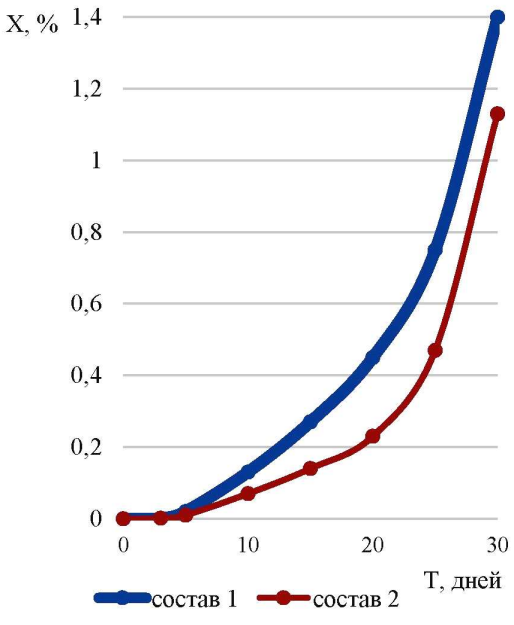


Рис. 1. Зависимость стабильности эмульсии X от времени T при содержании воды 30 %

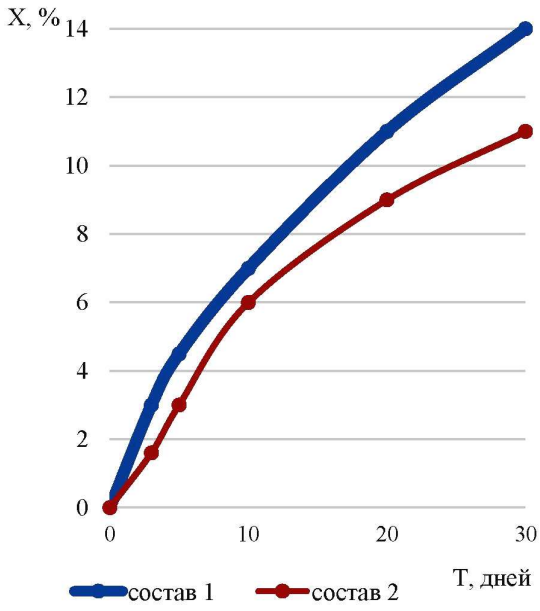


Рис. 2. Зависимость стабильности эмульсии X от времени T при содержании воды 40 %

Установлено, что с увеличением процентного содержания воды стабильность эмульсии уменьшается. При содержании воды 70…80 % получается нестабильная эмульсия, которая практически сразу начинает расслаиваться: при содержании воды 80 % в течение первых трех дней объём выделившейся воды составил 40…45 % от первоначального объема эмульсии (рис. 6); при содержании воды 70 % в течение первых пяти дней объём выделившейся воды составил 30…37 % (рис. 5).

Результаты экспериментальных исследований показали, что промышленное использование эмульсий, содержащих 50…60 % воды, крайне затруднительно, так как в течение первых 10 дней объем выделившейся воды составляет 17…22 % от первоначального объема эмульсии с содержанием воды 60 % (рис. 4), а при содержании воды 50 % – 10…12 % (рис. 3).

В эмульсии с содержанием воды 40 % в течение первых трех дней после изготовления объем выделившейся воды, как правило, не превышал двух процентов (см. рис. 2). Такая стабильность позволяет предприятиям по производству железобетонных изделий, имеющих у себя на предприятии установку по

производству эмульсии с помощью пневматического излучателя, приготавливать эмульсию для смазки форм при изготовлении железобетонных изделий непосредственно перед использованием. В результате предприятия смогут экономить значительные объемы сырья для производства эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов.

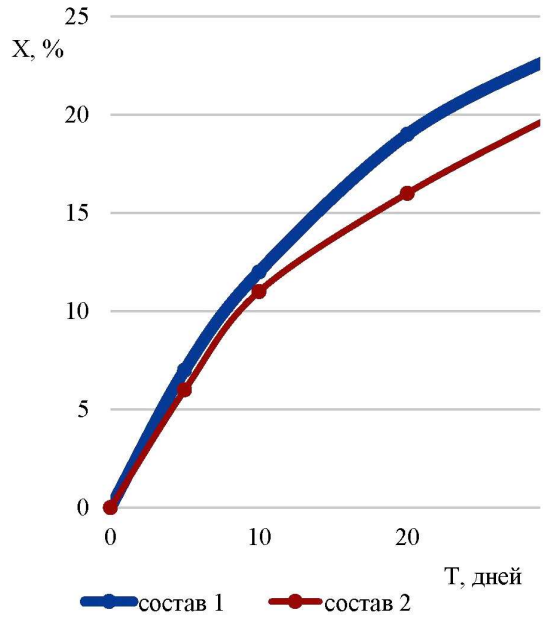


Рис. 3. Зависимость стабильности эмульсии X от времени *T* при содержании воды 50 %

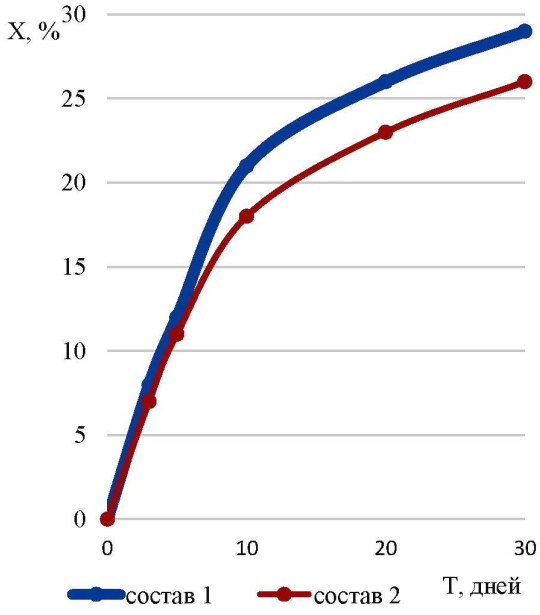


Рис. 4. Зависимость стабильности эмульсии X от времени *T* при содержании воды 60 %

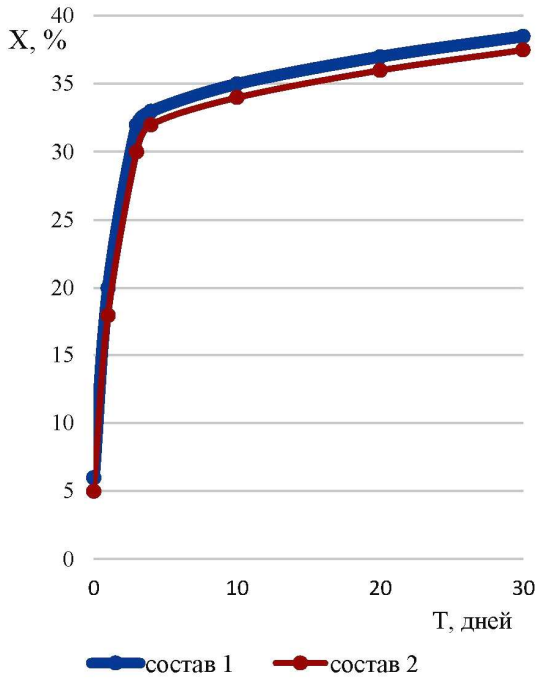


Рис. 5. Зависимость стабильности эмульсии X от времени *T* при содержании воды 70 %

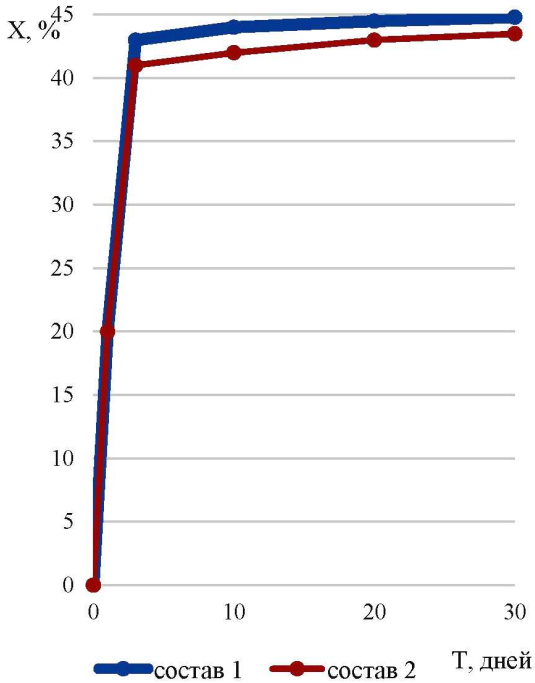


Рис. 6. Зависимость стабильности эмульсии X от времени *T* при содержании воды 80 %

При содержании воды 30 % от объема эмульсии получается стабильная эмульсия, в которой объем выделившейся воды в течение 30 дней после изготовления 0,8…1,5 % (см. рис. 1), что делает возможным приготовление эмульсии не только для нужд самого предприятия, но и для коммерческой реализации другим предприятиям. Такую эмульсию можно использовать в качестве смазки для форм при изготовлении железобетонных изделий либо добавки к топливу для котельных [4; 5].

При использовании предприятиями технологии приготовления эмульсии с помощью ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя, особое внимание следует обратить на отработавшие растворы ТМС, имеющиеся на предприятии. Эти растворы содержат в своем составе, наряду с НСП, значительное количество различных поверхностно-активных веществ, которые практически невозможно выделить из раствора и утилизировать. Добавление к отработавшим НСП (вместо воды) растворов отработавших ТМС позволить не только экономить воду, НСП и эмульгаторы, необходимые для приготовления стабильной эмульсии, но и значительно улучшить экологическую обстановку в регионе за счет снижения объемов растворов отработавших ТМС попадающих в сточные воды.

Выводы

1. Доказана возможность приготовления эмульсии с требуемой стабильностью на основе отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств с помощью ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя.

2. Определено оптимальное содержание воды в эмульсии, позволяющее получить эмульсию со стабильностью, достаточной для ее промышленного использования в качестве смазки форм при производстве железобетонных изделий.

3. Результаты исследований позволяют усовершенствовать технологию приготовления эмульсии с помощью ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя.

4. Использование предприятиями предложенной технологии позволяет решить вопросы охраны труда и здоровья работников предприятий, а также защиты окружающей среды от вредного воздействия отработавших НСП и растворов ТМС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко, Б.А. Полициклические ароматические углеводороды и их влияние на окружающую среду / Б.А. Руденко, Э.Б. Шлихтер. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1994.
2. Гриценко, А.И. Экология. Нефть и газ / А.И. Гриценко, Г.С. Акопова, В.М. Максимов. – М.: Наука, 1997.
3. Нефтепродукты отработанные. Общие технические условия: ГОСТ 21046-86. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2012.
4. Kuzmich, R. Emulsol on the basis of used oil product / R. Kuzmich, A. Maksimchuk, V. Dronchenko // National and European dimension in research: Materialsof junior researches III conf.: in 3 parts. – Part 1. Tecnology. – Novopolotsk, PSU, 2011. – P. 40–41.
5. Дронченко, В.А. О возможности использования отработанных нефтепродуктов для производства эмульсола / В.А. Дронченко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2009.
6. Gopal, E.S.R. Rheology of Emulsions / E.S.R. Gopal. – Oxford, 1963. – 130 p.
7. Эмульсии / под ред. Ф. Шермана; пер с англ. под ред. А.А. Абрамзона. – Л.: Химия, 1972. – 448 с.
8. Иванов, В.П. Разрушение поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей при эмульгировании / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестн. БрГТУ. – 2014. – № 4(88): Машиностроение. – С. 38 – 42.
9. Эмульсолы и пасты. Методы испытаний: ГОСТ 6243-75. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2012. – 12 с.
10. Акалович, В.В. Методические указания по проведению химического анализа сточных вод / В.В. Акалович, В.А. Малявко. – Минск: Наука и техника, 1989. – 37 с.

Поступила 06.08.2015

THE INFLUENCE OF WATER CONTENT ON THE STABILITY OF THE EMULSION BASED ON OILY EXHAUST PRODUCTS

V. DRONCHENKO

Results of experimental researches of influence of water content on the stability of the emulsion based on oily exhaust products are prepared with the help of shock waves arising from the operation of the pneumatic transducer. On the basis of studies determined the optimal water content in the emulsion, allowing to obtain an emulsion with sufficient stability for its industrial use as a lubricant forms in the production of concrete products. Recommendations to improve the technology, allowing to solve the issues of occupational safety and health of employees and the protection of the environment from the harmful effects of spent oil-containing products and technical solutions of detergents.

УДК 629.033

КОМПЛЕКСНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, А.Н. ВАСЬКОВИЧ, Г.А. УВАРОВ
(Полоцкий государственный университет)

Демонстрируются результаты разработки метода диагностирования двигателей по давлению прорвавшихся в картер газов. Изложено содержание метода. Описано оборудование, используемое для проведения исследований. Представлены методика комплексного диагностирования двигателей, а также результаты оценки диагностирования двигателей. Определены направления развития предложенного метода диагностирования.

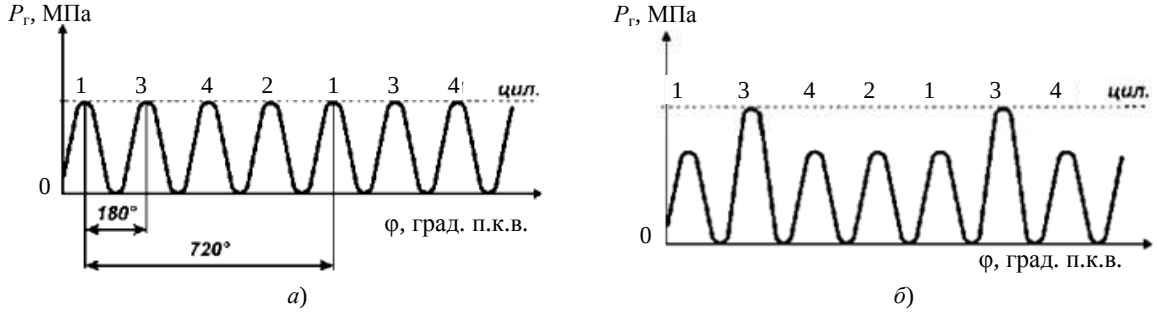
Введение. Состояние отечественного автотранспортного комплекса характеризуется ростом количества транспортных средств и недостаточным развитием систем их сервисного обслуживания. Организация технической эксплуатации подвижного состава должна обеспечить высокую эффективность его использования с экономией топливно-энергетических ресурсов и снижением негативного влияния на окружающую среду в части уменьшения токсичности отработавших газов. Ведущее место в технической эксплуатации автомобилей принадлежит системе технического обслуживания и ремонта, ее научной обоснованности и совершенству. Неотъемлемой частью указанной системы является техническая диагностика.

Существуют различные методы диагностирования двигателей внутреннего сгорания, каждый из которых имеет свои недостатки: одни методы не универсальны; другие – трудоемки; третьи – сложны и требуют применения дорогостоящего технологического оборудования. При проведении диагностирования двигателей техническое состояние цилиндропоршневой группы (ЦПГ) оценивается обычно с помощью измерения компрессии и плотности ЦПГ. Оба названных метода имеют ряд недостатков, не позволяющих объективно оценить состояние двигателя, тем более что в большинстве случаев измерения дают противоречивые результаты. Отсюда возникает необходимость в получении дополнительной информации, что возможно, осуществляя измерение давления газов, прорвавшихся в картер двигателя [1].

Диагностирование двигателей по давлению газов в картере. Работоспособность ЦПГ в основном определяется зазором между поршнем и гильзой, износом компрессионных и маслосъемных колец. Указанные параметры достаточно тесно коррелируют с расходом газов, прорывающихся в картер. Увеличение неплотностей ЦПГ двигателя вызывает повышение расхода этих газов, а также давления в картере [2].

Увеличение количества прорвавшихся газов в картер инициирует негативные процессы: снижение мощности двигателя; повышение удельного расхода топлива и температуры деталей ЦПГ; потерю упругости колец; повышенный износ цилиндров и колец; загрязнение масла с образованием отложений на деталях; коксование масла в канавках поршней с последующей потерей подвижности колец; ухудшение работы системы вентиляции картера; потерю масла из картера через систему вентиляции и сальниковые уплотнения. Прорыв газов в картер приводит к быстрому окислению масла и потере его свойств.

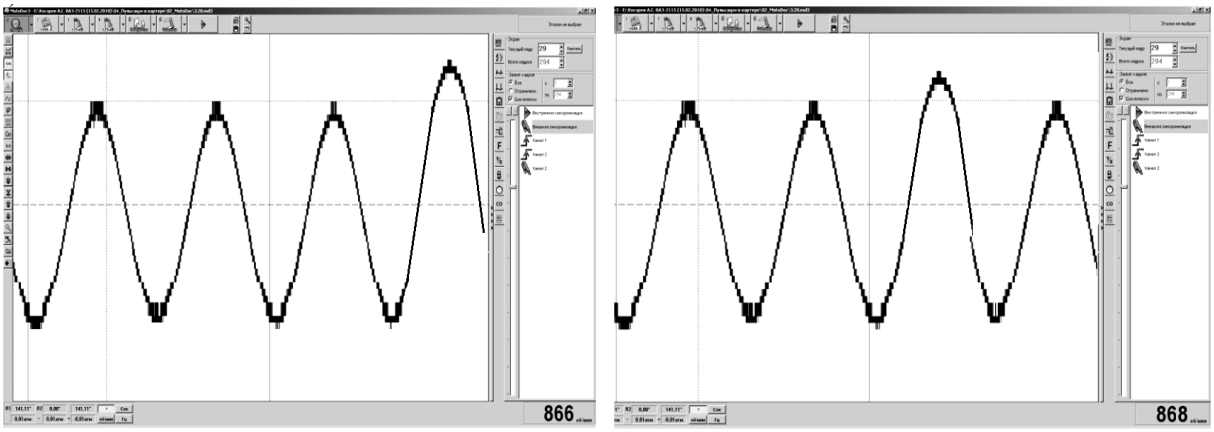
При диагностировании ЦПГ по давлению газов в картере в маслоналивную горловину или в трубку щупа для измерения уровня масла устанавливают датчик пульсаций давления газов. Кривая пульсаций давления газов в картере в зависимости от угла поворота коленчатого вала имеет синусоидальную форму. Амплитуда давления с увеличением неплотностей в цилиндре возрастает (в том числе из-за поломки или закоксовывания поршневых колец, износа или прогорания поршневых канавок, износа гильз цилиндров, задиров или царапин на них и др.). Осциллограммы пульсаций давления газов, прорывающихся в картер четырехцилиндрового двигателя при нормальном техническом состоянии ЦПГ и при неплотностях, имеющихся, например, в третьем цилиндре, приведены на рисунке 1.



а) *б*)

Рис. 1. Осциллограммы давления $p_г$ газов, прорывающихся в картер двигателя, в зависимости от угла поворота коленчатого вала φ:
а – при исправном техническом состоянии ЦПГ; *б* – при нарушении герметичности в третьем цилиндре

При анализе необходимо учитывать особенности кинематики кривошипно-шатунного механизма, а именно различие в скоростях поршней, движущихся от верхней мертвой точки (ВМТ) к нижней мертвой точке (НМТ), которые создают в картере пульсации давления газов (так называемый газодинамический фон) независимо от прорыва газов в картер. Поэтому осциллограммы давления дают суммарную характеристику – газодинамический фон, на который накладываются амплитуды давления, возникающие от прорыва газов. На рисунке 2 показаны осциллограммы пульсаций давления газов в картере при выключенных втором и четвертом цилиндрах соответственно. У этих цилиндров наблюдается только газодинамический фон [3].



а) *б*)

Рис. 2. Осциллограммы пульсаций давления газов в картере:
а – при выключенном втором цилиндре; *б* – при выключенном четвертом цилиндре

Оборудование для исследований. Оборудование, используемое для диагностирования двигателей: мотор-тестер MotoDoc III; аналого-цифровой преобразователь ZET 210 Sigma USB; усилитель ZET 411; датчик давления наддува воздуха 47.3829; преобразователь тока АРРА-32; компрессометр; пневмотестер; газоанализатор и ноутбук.

Рис. 3. Датчик давления наддува воздуха 47.3829

Для измерения давления в картере двигателя использовался датчик давления наддува воздуха 47.3829, серийно выпускаемый ОАО «Автоэлектроника», который используется в составе системы управления двигателями на автомобилях ГАЗ-3110 с дизельными двигателями STEYR (двигатель ГАЗ-560). Для питания датчика давления наддува воздуха необходимо стабилизированное напряжение +5 В, сила потребляемого тока составляет 6…10 мА, диапазон измерения абсолютного давления – от 0,25 до 2,4 бар, выходное напряжение – от 0,5 до 4,5 В.

Порядок работы цилиндров 1–3–4–2. Датчик давления наддува воздуха (рис. 3) имеет встроенный усилитель выходного сигнала и обладает высоким быстродействием. Результаты испытаний датчика на различных двигателях позволяют использовать его для практического применения в диагностической практике.

Методика комплексного диагностирования двигателей. Для оценки возможности диагностирования двигателей по давлению газов в картере была разработана методика, которая включает в себя следующие работы.

Проверяют состояние системы зажигания, анализируют осциллограммы напряжения в ее вторичной цепи (в том числе напряжение пробоя искрового промежутка свечи, время накопления катушкой энергии, длительность горения дуги и др.). Чем ниже компрессия в цилиндре, тем ниже при прочих равных условиях напряжение пробоя искрового промежутка свечи зажигания.

Пример осциллограммы вторичного напряжения показан на рисунке 4 (причина пониженного напряжения пробоя – плохая герметичность камеры сгорания).

В четвертом цилиндре с низкой компрессией напряжение пробоя занижено.

Оценивают состояние двигателя по силе тока, потребляемого стартером при прокрутке двигателя (без его запуска). Чем герметичнее надпоршневое пространство цилиндра, тем больше давление сжимаемо-

го при прокрутке двигателя стартером воздуха (смеси), тем больше сопротивление вращению коленчатого вала, когда данный цилиндр находится в такте сжатия, тем большую силу тока потребляет стартер.

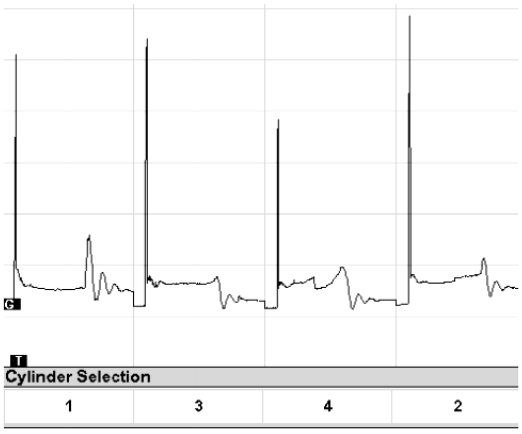


Рис. 4. Осциллограмма вторичного напряжения

Для цилиндров двигателя с одинаковой компрессией характерна одинаковая амплитуда пульсаций стартерного тока. При снижении компрессии в отдельных цилиндрах наблюдается соответственное уменьшение амплитуды пульсаций силы тока. Измерение силы тока производится с помощью преобразователя тока. Осциллограмма силы тока, потребляемого стартером при прокрутке двигателя, представлена на рисунке 5.

Кроме измерения силы тока, потребляемого стартером, регистрируют падение напряжения на клеммах аккумуляторной батареи при прокрутке двигателя. Осциллограммы пульсаций напряжения с нормальной и уменьшенной компрессией, например, в первом, втором, пятом и шестом цилиндрах шестицилиндрового двигателя приведены на рисунке 6.

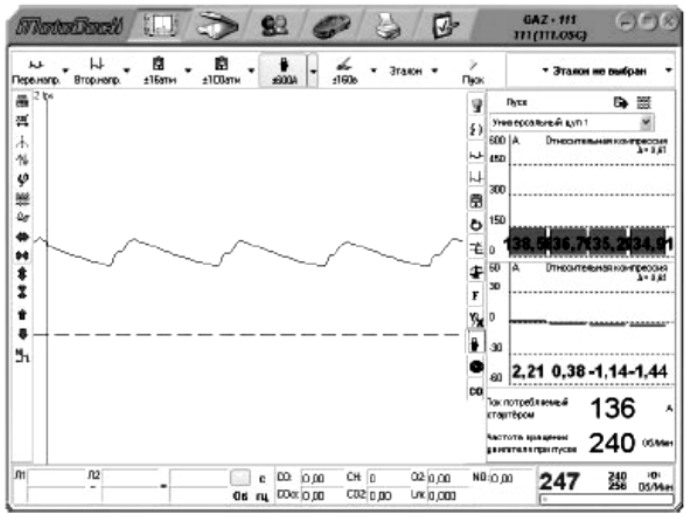


Рис. 5. Осциллограмма силы тока,
потребляемого стартером при прокрутке двигателя

В отработавших газах определяют содержание оксидов углерода CO, диоксида углерода CO_2, углеводородов CH и кислорода O_2. Оксид углерода CO – основной показатель состава смеси, чем выше его концентрация, тем богаче смесь. Диоксид углерода CO_2 является индикатором эффективности сгорания, содержание CO_2 достигает максимума при коэффициенте избытка воздуха, равном примерно единице, и уменьшается при бедных или богатых смесях. Углеводородные соединения CH содержатся в отработавших газах в виде продуктов неполного окисления и разложения топлива и паров топлива при всех режимах работы двигателя, включая режимы его наилучшей экономичности. Уменьшение количества углеводородов может быть достигнуто посредством правильного сгорания топлива в камере сгорания, правильной регулировки угла опережения зажигания и использования нейтрализатора. Высокое содержание CH часто вызвано проблемами в системе зажигания [4]. При оптимальных условиях работы двигателя содержание кислорода, присутствующего в выхлопных газах, должно быть ниже 2 %. Высокое содержание O_2 обусловлено нарушением герметичности камеры сгорания и неисправностями в системе зажигания. Таким образом, на основе анализа содержания различных компонентов в отработавших газах можно сделать заключение о состоянии двигателя, процессах смесеобразования и сгорания.

Проверяют компрессию с использованием компрессометра, герметичность камеры сгорания – пневмотестером. Измеряют давление газа в цилиндре при работе двигателя на холостом ходу и на повышенной частоте вращения коленчатого вала (2500 $мин^{-1}$) с использованием датчика с пределом измерения давления до 16 бар, который устанавливают вместо свечи зажигания проверяемого цилиндра. Пример осциллограммы давления газов в цилиндре показан на рисунке 7.

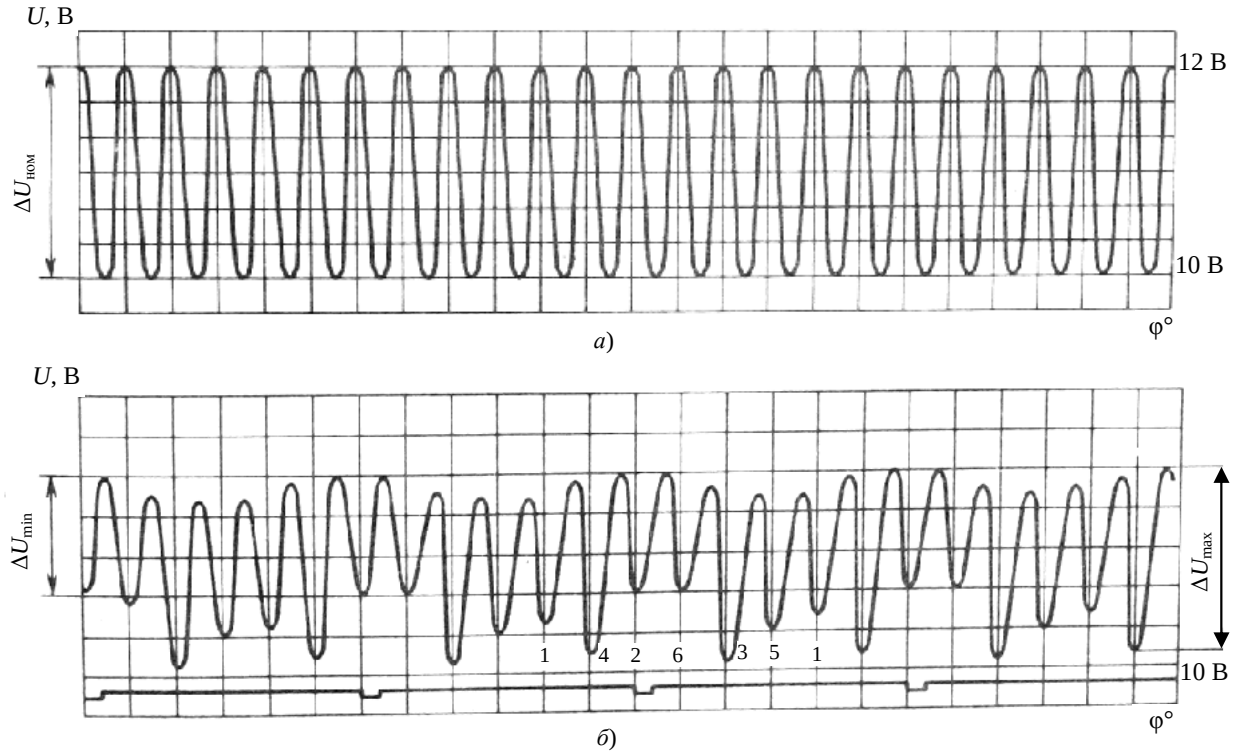


Рис. 6. Осциллограммы пульсаций напряжения U на клеммах аккумуляторной батареи при прокрутке двигателя стартером: *а* – при нормальной компрессии в цилиндрах; *б* – при уменьшенной компрессии в 1, 2, 5 и 6-м цилиндрах; φ – угол поворота коленчатого вала; $\Delta U_{ном}$, ΔU_{min} и ΔU_{max} – размахи напряжения номинальный, минимальный и максимальный, соответственно

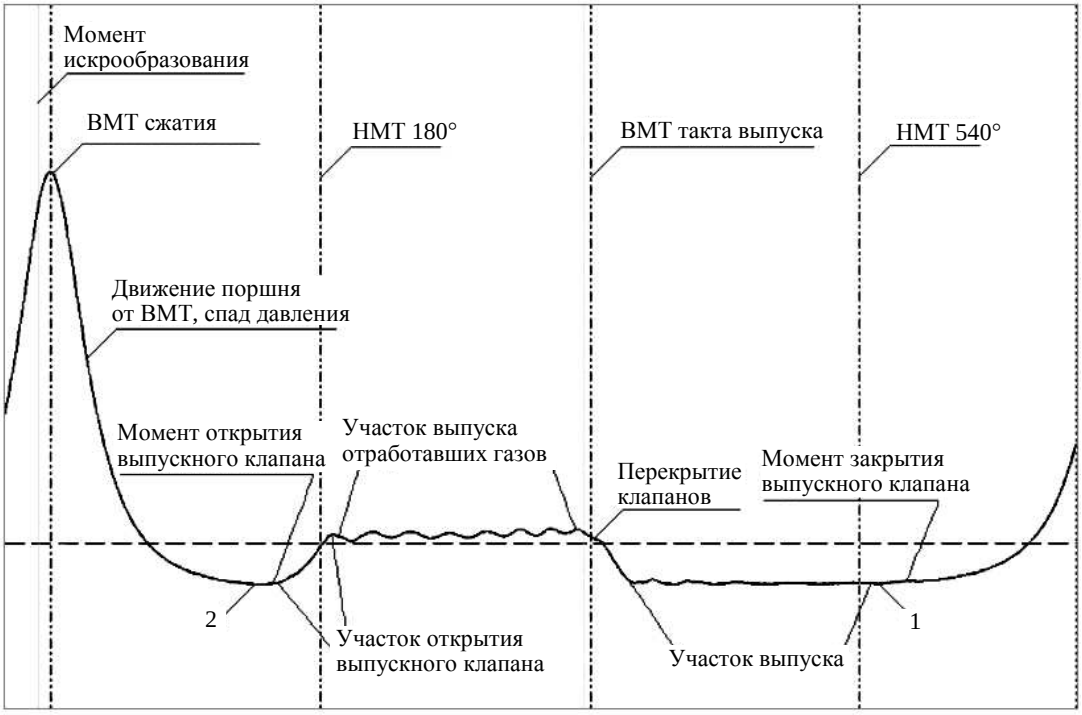


Рис. 7. Осциллограмма давления газов в цилиндре двигателя

Осциллограмма давления газа в цилиндре позволяет определить угол опережения зажигания, состояние механической части двигателя, правильность установки распределительных валов, управляющими впускными и выпускными клапанами, проходимость выпускной системы, разрежение во впускном коллекторе на такте впуска и др. [5].

Измеряют пульсации давления газов в картере с помощью датчика давления (см. рис. 3). Режимы проверки при измерении давления в картере включают следующие способы измерений: на холостом ходу; на холостом ходу с дополнительной нагрузкой (обогрев заднего стекла, дальний свет фар); на повышенной частоте вращения коленчатого вала (1300, 1800, 2200 и 2700 мин$^{-1}$). Затем поочередно отключают каждый из цилиндров и измеряют давление в картере на режимах холостого хода и повышенной частоте вращения коленчатого вала (2500 мин$^{-1}$).

Целью представленной методики диагностирования двигателей является всесторонняя оценка герметичности камеры сгорания, оценка состояния ЦПГ, плотности прилегания клапанов, правильности сгорания смеси. Все данные анализируют в совокупности и сопоставляют с давлением газов в картере.

Порядок обработки полученных данных. Анализ осциллограммы давления газов в картере заключается в следующем. Первоначально осциллограмму давления подвергают осреднению в виде определения среднего арифметического всех значений. По осредненной осциллограмме определяют максимумы давлений от прорыва газов из каждого цилиндра (рис. 8). Полученные значения разбиваются на циклы в соответствии с количеством цилиндров и порядком их работы.

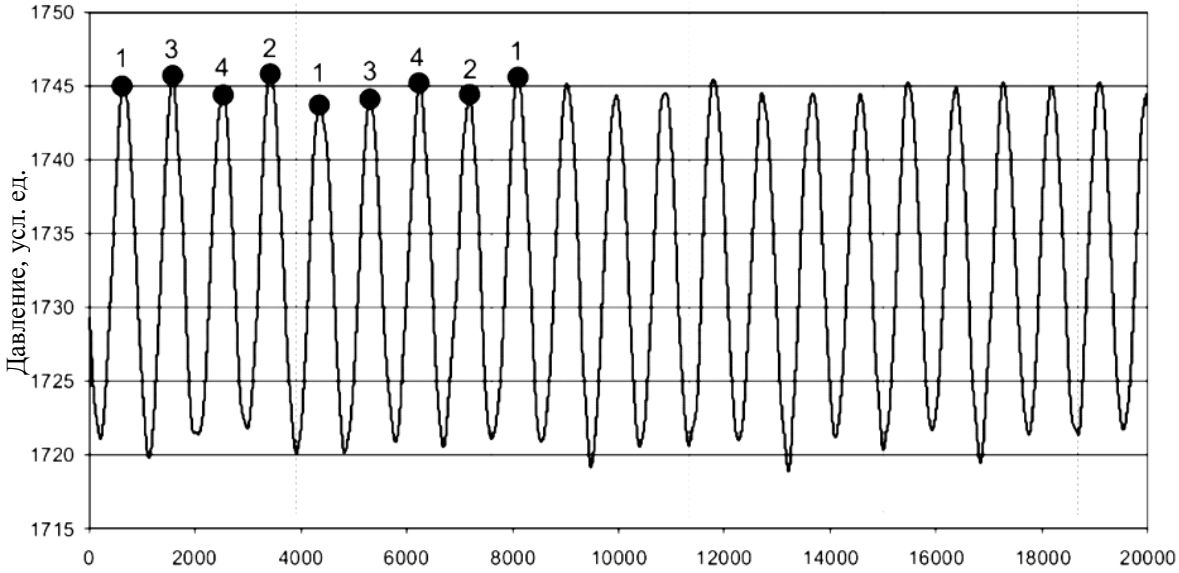


Рис. 8. Осредненная осциллограмма давления в картере.
Порядок работы цилиндров 1–3–4–2

Аналогично обрабатывают осциллограммы давления в картере при отключенных по очереди цилиндрах. Всю обработку осциллограмм давления газа в картере производят с использованием разработанного программного обеспечения.

Таким образом, имеются максимумы давления в картере при всех работающих цилиндрах и при отключении каждого из них по очереди. Среднее арифметическое всех значений максимумов осредненной кривой давления в картере при работающих цилиндрах и при выключении одного из них показано на рисунке 9 (на примере автомобиля ВАЗ-2112 с двигателем ВАЗ-2112).

Производят сравнение падения давления при отключении того или иного цилиндра от давления, полученного при работе всех цилиндров. Как видно из графика, представленного на рисунке 9, при отключении четвертого цилиндра среднее давление в картере уменьшается намного больше, чем при отключении первого, второго и третьего цилиндров. Это говорит о неисправности в четвертом цилиндре. Проверка в соответствии с вышеуказанной методикой свидетельствует о том, что в данном цилиндре значение компрессии составляет около 8,3 бар (у остальных цилиндров – 12,6…13,2 бар), показания пневмотестера составили 60 %.

Таким образом, при отключении одного из цилиндров среднее давление газа в картере снизится тем больше, чем больше прорыв газов от данного цилиндра. При одинаковом состоянии герметичности камер сгорания всех цилиндров падение давления будет одинаковым.

Повышенное давление в картере при нормальном состоянии ЦПГ (определенное с использованием компрессометра, пневмотестера и других методов) указывает на неисправность системы вентиляции картера (например, ее загрязнение). Если показания компрессометра занижены, а амплитуда пульсаций давления в картере находится в норме, то это свидетельствует о проблемах с деталями газораспределительного механизма, прокладки головки цилиндров и др.

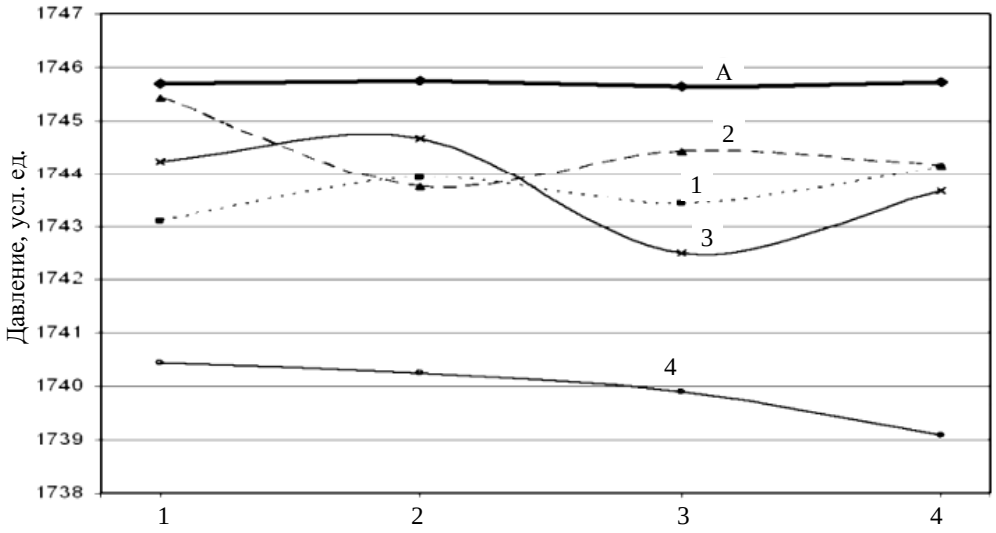


Рис. 9. Изменение давления в картере при всех работающих цилиндрах (А)
и при их последовательном отключении (1–4 – номер отключенного цилиндра)

Заключение. В процессе работы было проверено 20 автомобилей различных марок и с различным пробегом. Первоначальные результаты оценки метода диагностирования двигателей по давлению в картере свидетельствуют о возможности его применения в практике. ***Достоинствами*** данного метода являются: *универсальность* (метод позволяет проводить проверку как для двигателей с искровым зажиганием, так и для дизельных двигателей); *простота реализации* (не требуются разборочные работы); *экономия времени* при определении состояния деталей ЦПГ (для некоторых двигателей проверка с использованием компрессометра и пневмотестера является трудоемкой); *полученная с использованием данного метода информация может быть использована для подтверждения или опровержения диагноза*, поставленного с использованием других методов диагностирования.

Недостатки метода (на данной стадии исследования) – *сложность оценки состояния двигателя* при различных неисправностях в различных цилиндрах (в случаях, если имеются проблемы как с деталями ЦПГ, так и деталями газораспределительного механизма).

Дальнейшая работа должна проводиться в следующих направлениях: сбор и обработка статистических данных о давлении газов в картере для различных двигателей с различным пробегом и состоянием ЦПГ; подбор более чувствительной аппаратуры для измерения давления газов в картере; регистрация осциллограмм давления газов в картере на различных скоростных и нагрузочных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярошевич, В.К. Технология производства и ремонта автомобилей / В.К. Ярошевич, А.С. Савич, В.П. Иванов. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2011. – 589 с.
2. Клюев, В.В. Технические средства диагностирования / В.В. Клюев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
3. Стрельцов, В.В. Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигателей / В.В. Стрельцов. – 2-е стер. изд. – М.: Колос, 1995. – 170 с.
4. Мирошников, Л.В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях / Л.В. Мирошников, А.П. Болдин, В.И. Пал. – М.: Транспорт, 1977. – 263 с.
5. Беднарский, В.В. Организация капитального ремонта автомобилей / В.В. Беднарский. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 592 с.

Поступила 06.07.2015

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE OF COMPLEX DIAGNOSING OF TECHNICAL CONDITION OF PISTON GROUP OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

V. IVANOV, A. VASKOVICH, G. UVAROV

The paper presents the results of investigation the engine's diagnostics method by measuring gas pressure in crank case of engine. The general ideas of the given method, used equipment, procedure of the complex technology of engine's diagnostics and the results have been considered. Some ways of further development of the given diagnostics method have been defined.

УДК 656

ТРАНСПОРТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБСЛУЖИВАНИЕ КРУПНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ

канд. техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ; Д.В. МОЗОЛЕВСКИЙ; В.Н. КУЗЬМЕНКО; А.С. ПОЛХОВСКАЯ; А.В. КОРЖОВА; Н.В. КИСЕЛЕВИЧ; Н.С. ЕРМАКОВА; Е.Н. ГОРЕЛИК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлены результаты исследования условий движения и транспортного обеспечения в районе застройки, ограниченной магистральными улицами Филимонова, Макаенка, Скорины и проспектом Независимости, а также экспериментальных исследований параметров транспортной и пешеходной нагрузки в рассматриваемых узлах улично-дорожной сети города Минска. Определены уровни загрузки для различных периодов будних и выходных дней. На основе анализа условий и характеристик дорожного движения обоснованы предпроектные решения по повышению качества дорожного движения в исследуемом районе с учетом перспективы строительства транспортной развязки на пересечении проспекта Независимости и улицы Филимонова. Даны рекомендации по улучшению условий движения и повышению качества дорожного движения в целом на исследуемых объектах, прилегающих к зоне проектируемого объекта.

Введение. Дорожное движение – сложный технико-социальный процесс, в котором участвует всё население страны, и оно должно быть организовано таким образом, чтобы издержки движения были минимальны, а комфортность и безопасность участников движения – максимальны [1–3]. Организация дорожного движения (ОДД) – неотъемлемая составляющая проектов транспортной планировки городов и районов. Однако до сих пор в Беларуси ОДД включается в состав работ, входящих в дорожную деятельность по содержанию автомобильных дорог и улиц. При этом уровень потерь, возникающий от несовершенства ОДД, огромен и сопоставим с потерей 8 % ВВП [3–5]. Это определило отношение к проблемам ОДД, которые не рассматриваются на должном уровне с точки зрения необходимой регламентации, учета и контроля на всех уровнях, особенно на градостроительном.

Повышение качества ОДД обеспечивает потребную пропускную способность дорожной сети наряду с ее развитием, совершенствование парковочной политики и рациональное использование парковочного пространства, оптимальное управление светофорными объектами. С помощью наилучшей организации движения формируются и новые положительные стереотипы поведения участников дорожного движения, а места притяжения населения становятся более доступными, следовательно, более привлекательными. Вместе с тем следует отметить, что остро стоит проблема переосмысления роли ОДД как в проектных решениях, так и в их реализации с целью придания ей заслуженной значимости. Иначе издержки так и останутся регулярным и нарастающим явлением, что неизбежно приведет к потере устойчивости функционирования транспортных систем в целом [3; 6–8].

Постановка проблемы. На перекрестке улицы Филимонова и проспекта Независимости в Минске планируется строительство многофункционального комплекса ОАО «Газпром», который сгенерирует дополнительную транспортную и пешеходную нагрузку. Для этого требуется провести исследования и разработать варианты транспортного обеспечения данного комплекса.

Анализ условий движения. Объектами исследования транспортно-пешеходной нагрузки являются:

1) проспект Независимости – улица Филимонова;
2) местный проезд вдоль проспекта Независимости – улица Филимонова;
3) проспект Независимости – местный проезд около НПО «Агат»;
4) улица Филимонова – улица Ф. Скорины.

Интенсивность и состав транспортных потоков определялись путем натурного эксперимента по методике Белорусского национального технического университета в рабочие дни недели [9; 10].

Состав транспортного потока был разбит на восемь групп, обозначенных символами: Л (мотоциклы, легковые автомобили); К (микроавтобусы); Г (грузовые автомобили средней грузоподъемности); Р (грузовые автомобили большой грузоподъемности); С (сочлененные автобусы); Т (троллейбусы); О (маршрутные автобусы); П (автопоезда, тракторные поезда); А (немаршрутные автобусы).

Исходные данные обрабатывались в программном комплексе «RTF-Road traffic flows» [11], в результате чего получены картограммы интенсивности и неравномерности движения, диаграммы состава потока и таблицы параметров.

Расположение проектируемого многофункционального комплекса предполагается на месте существующего автовокзала «Московский» в Первомайском районе города Минска. Проспект Независимости, улицы Филимонова и Ф. Скорины являются магистральными улицами общегородского значения (категория «А» [12]).

Основные пешеходные потоки формируются близлежащей жилой и торгово-офисной застройкой, остановочными пунктами и социально-бытовыми объектами. Рядом с проектируемым объектом:

- универсам «Европейский»;
- торгово-развлекательный центр «Александров Пассаж»;
- Национальная библиотека;
- НПО «Агат»;
- другие торгово-офисные объекты.

Через исследуемый участок улично-дорожной сети проходят большое количество маршрутов пассажирского транспорта (автобусы и троллейбусы – около 20 маршрутов; маршрутные такси – около 10 маршрутов).

По данным, предоставленным УГАИ ГУВД Мингорисполкома, данный участок улично-дорожной сети характеризуется достаточно высоким уровнем аварийности. Главными причинами высокой аварийности являются: наличие пешеходных переходов через 8-полосную дорогу без островка безопасности; превышение водителями допустимой скорости движения; отсутствие выделенных полос для право- и левоповоротного транспорта; наличие большого количества конфликтных точек в межфазном и внутрифазном режимах движения; высокая интенсивность движения транспорта во всех направлениях; отсутствие резервов для нормального функционирования транспортных магистралей в одном уровне.

Интенсивность движения на перекрестке проспекта Независимости и улицы Филимонова составляет:

- транзитного транспорта по проспекту Независимости – около 1700…1900 автомобилей в час (авт./ч) в одном направлении («пиковая» интенсивность 2200…2600 авт./ч);
- транзитного транспорта по улице Филимонова – около 350…400 авт./ч («пиковая» интенсивность 450…550 авт./ч) в одном направлении;
- левоповоротного транспорта с проспекта Независимости в сторону улицы Ф. Скорины – около 350…450 авт./ч;
- правоповоротного транспорта с проспекта Независимости в сторону улицы Ф. Скорины – около 350…400 авт./ч;
- левоповоротного транспорта с улицы Филимонова в сторону центра города – около 300…400 авт./ч;
- правоповоротного транспорта с улицы Филимонова в сторону МКАД – около 320…520 авт./ч.

Интенсивность движения на перекрестке улиц Филимонова и Ф. Скорины составляет:

- транзитного транспорта по улице Филимонова – около 650…750 авт./ч («пиковая» интенсивность 800…900 авт./ч) в одном направлении;
- левоповоротного транспорта с улицы Филимонова в сторону МКАД – около 350…500 авт./ч;
- правоповоротного транспорта с улицы Филимонова в сторону МКАД – около 150…200 авт./ч;
- левоповоротного транспорта с улицы Ф. Скорины – около 200…250 авт./ч;
- правоповоротного транспорта с улицы Ф. Скорины – около 300…350 авт./ч.

На основании интенсивности движения и схемы организации дорожного движения выполнен расчет уровней загрузки, проиллюстрированный рисунками 1–3.

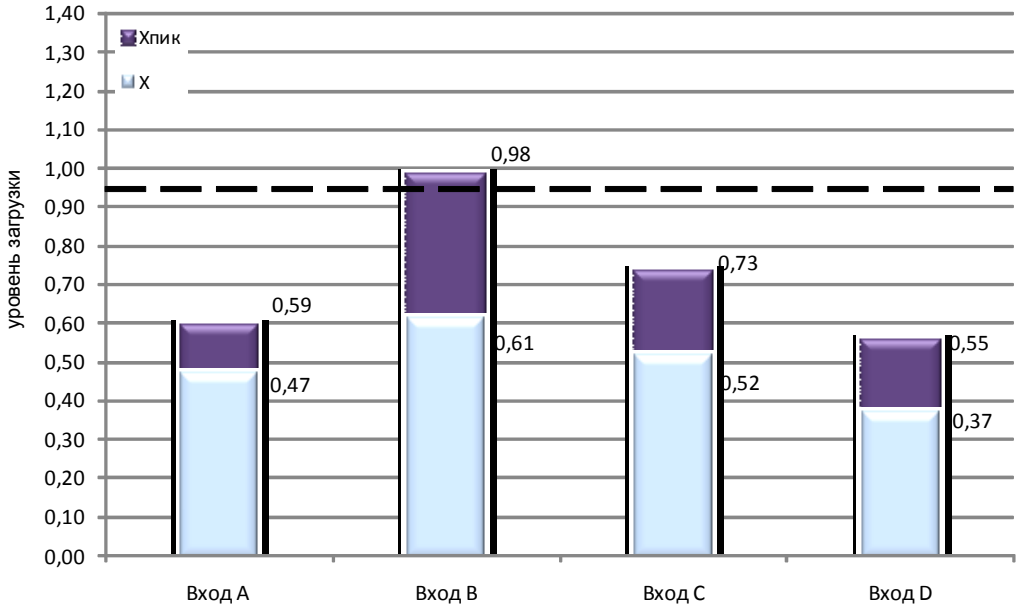


Рис. 1. Уровень загрузки на перекрестке проспекта Независимости и местного проезда к НПО «Агат»

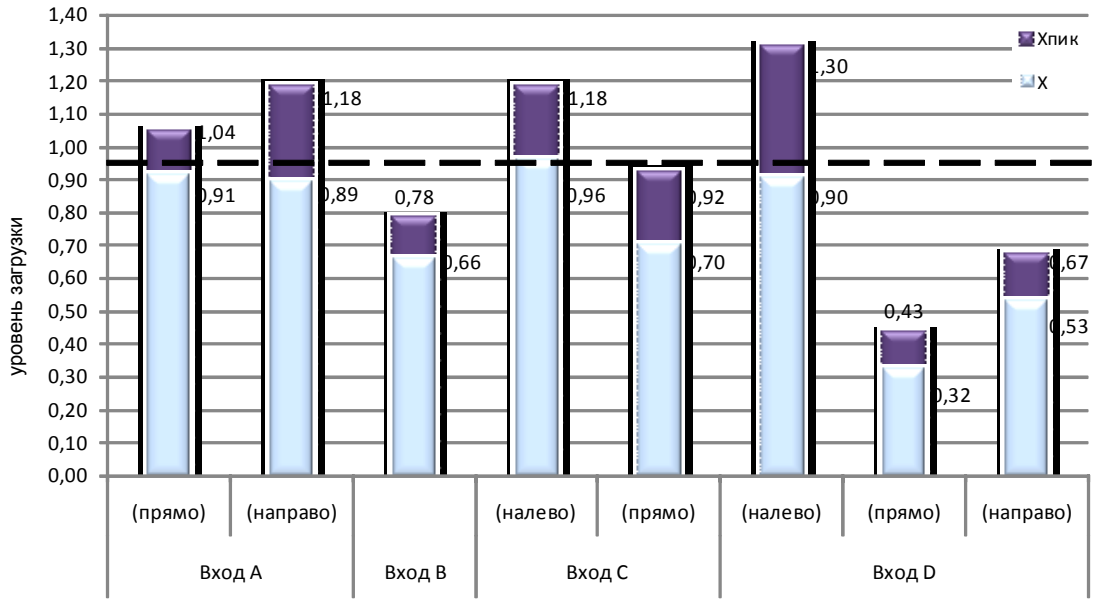


Рис. 2. Уровень загрузки на перекрестке проспекта Независимости и улицы Филимонова

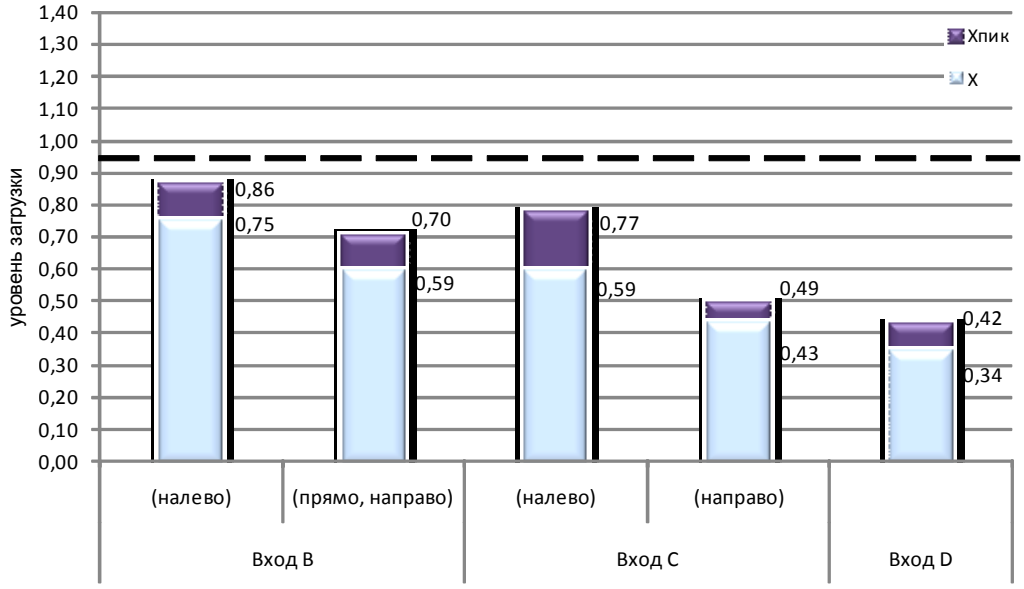


Рис. 3. Уровень загрузки на перекрестке улицы Филимонова и улицы Скорины

Расчет распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта. Исходными данными для расчета распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта являются ведомость проектируемых зданий и сооружений с указанием площади, а также количество мест для стоянки автомобилей на всех уровнях паркинга.

Интенсивность движения транспортных средств, въезжающих и выезжающих с территории проектируемой зоны многофункционального комплекса, складывается из движения транспортных средств:

- сотрудников и работников штаб-квартиры, офисов, медцентра и др., прибывающих к началу рабочего дня в утренний «час пик» и выезжающих в конце рабочего дня в вечерний «час пик», – *работники*;
- посетителей офисов, гостиницы и здания штаб-квартиры – *посетители офисов*;
- посетителей медицинского центра, спортивного комплекса и обслуживающего грузового транспорта – *посетители медцентра и грузовой транспорт*;
- сотрудников и работников штаб-квартиры, офисов и т.д., совершающих въезды на территорию и выезды из неё, связанные со служебной необходимостью, – *служебные разъезды*.

Для расчета интенсивности движения *работников* территория города разбивается на ряд районов с заранее известной в процентном распределении численностью жителей. В зависимости от взаимного расположения района и улично-дорожной сети (МКАД, магистральные улицы и т.д.) выполнено распределение интенсивности движения транспорта, въезжающего и выезжающего с территории многофункционального комплекса по времени суток (табл. 1).

Таблица 1

Интенсивность движения транспортных средств *работников*

Пути подъезда к проектируемой зоне	Интенсивность движения транспортных средств, въезжающих на территорию (паркинг) в «час пик» (утро), авт./ч	Интенсивность движения транспортных средств, выезжающих с территории (из паркинга) в «час пик» (вечер), авт./ч
МКАД (по проспекту Независимости – съезд на улицу Филимонова)	220	185
Улица Скорины	203	167
Улица Филимонова (от улицы Кедышко)	78	92
Улица Филимонова (от улицы Парниковая)	125	139
Проспект Независимости (из центра города)	493	538
ВСЕГО	**1119**	**1121**

Для расчета интенсивности движения: *посетители офисов*, *посетители медцентра и грузовой транспорт*, *служебные разъезды* – используются данные об интенсивности движения на улично-дорожной сети, прилегающей к проектируемому объекту. В зависимости от процентного распределения существующей интенсивности движения выполнено распределение перспективной интенсивности движения транспорта, въезжающего на территорию многофункционального комплекса (табл. 2) и выезжающего с территории многофункционального комплекса по времени суток (табл. 3).

Следует отметить, что распределение перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта по прилегающим улицам значительно зависит от размещения въездов и выездов с территории комплекса, организации дорожного движения на прилегающих участках улично-дорожной сети, организации движения на территории многофункционального комплекса.

В графической части работы приведены схемы распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта для двух вариантов:

- *вариант 1* (на основании предоставленного генерального плана) предусматривает заезд на территорию проектируемого объекта с проспекта Независимости, улицы Филимонова и улицы Ф. Скорины, а выезд только на улицу Филимонова или улицу Ф. Скорины, а также на проспект Независимости, но только в направлении МКАД. Причем заезд с проспекта Независимости со стороны МКАД, с улицы Филимонова и улицы Скорины выполняется через перекресток улицы Филимонова и улицы Ф. Скорины, а выезд практически во всех направлениях, только через перекресток улицы Филимонова и улицы Ф. Скорины (рис. 4);

- *вариант 2* (предлагаемый) предусматривает не только заезд на территорию проектируемого объекта с проспекта Независимости, улицы Филимонова и улицы Ф. Скорины, но и выезд транспорта на эти магистрали. Для реализации данного варианта организации дорожного движения необходимо устройство светофорного объекта с возможностью выезда транспорта с территории комплекса в направлении центра города в месте заезда с проспекта Независимости. Такой вариант организации движения транспорта позволит снизить прогнозируемую нагрузку на перекресток улицы Филимонова и улицы Ф. Скорины и левоповоротный съезд в направлении центра города проектируемой транспортной развязки. Для предотвращения перегрузки существующего перекрестка улицы Филимонова и улицы Ф. Скорины и уменьшения количества фаз движения необходимо организовать на нем только заезд транспорта в направлении комплекса. А для выезда транспорта со стороны комплекса на улицу Филимонова устроить отнесенный дополнительный светофорный объект с возможностью выезда во всех направлениях (рис. 5).

Таблица 2

Интенсивность движения транспортных средств посетителей и служебных разъездов, въезжающих на территорию комплекса

Пути подъезда к проектируемой зоне		Интенсивность движения транспортных средств, въезжающих на территорию комплекса							
		Утренний «час пик»	Утренний «час пик»	День	День	День	Вечерний «час пик»	Вечерний «час пик»	Вечерний «час пик»
		посетители офисов	посетители медцентра и грузовой транспорт	посетители офисов	посетители медцентра и грузовой транспорт	служебные разъезды	посетители офисов	посетители медцентра и грузовой транспорт	служебные разъезды
проспект Независимости	от МКАД	75	59	218	59	94	102	86	62
	от Центра	62	49	179	49	77	84	70	51
улица Филимонова	от улицы Кедышко	19	15	56	15	24	26	22	16
	от улицы Парниковая	21	17	61	17	26	29	24	18
улица Скорины	от МКАД	15	12	45	12	19	21	18	13
ВСЕГО		**192**	**152**	**559**	**152**	**240**	**262**	**220**	**160**

Таблица 3

Интенсивность движения транспортных средств посетителей и служебных разъездов, выезжающих с территории комплекса

Пути подъезда к проектируемой зоне		Интенсивность движения транспортных средств, выезжающих с территории комплекса							
		Утренний «час пик»	Утренний «час пик»	Утренний «час пик»	День	День	День	Вечерний «час пик»	Вечерний «час пик»
		посетители офисов	посетители медцентра и грузовой транспорт	служебные разъезды	посетители офисов	посетители медцентра и грузовой транспорт	служебные разъезды	посетители офисов	посетители медцентра и грузовой транспорт
проспект Независимости	к МКАД	62	49	51	179	49	77	62	49
	к Центру	75	59	62	218	59	94	75	59
улица Филимонова	к улице Кедышко	21	15	18	61	15	26	21	15
	к улице Парниковая	19	17	16	56	17	24	19	17
улица Скорины	к МКАД	15	12	13	45	12	19	15	12
ВСЕГО		**192**	**152**	**160**	**559**	**152**	**240**	**192**	**152**

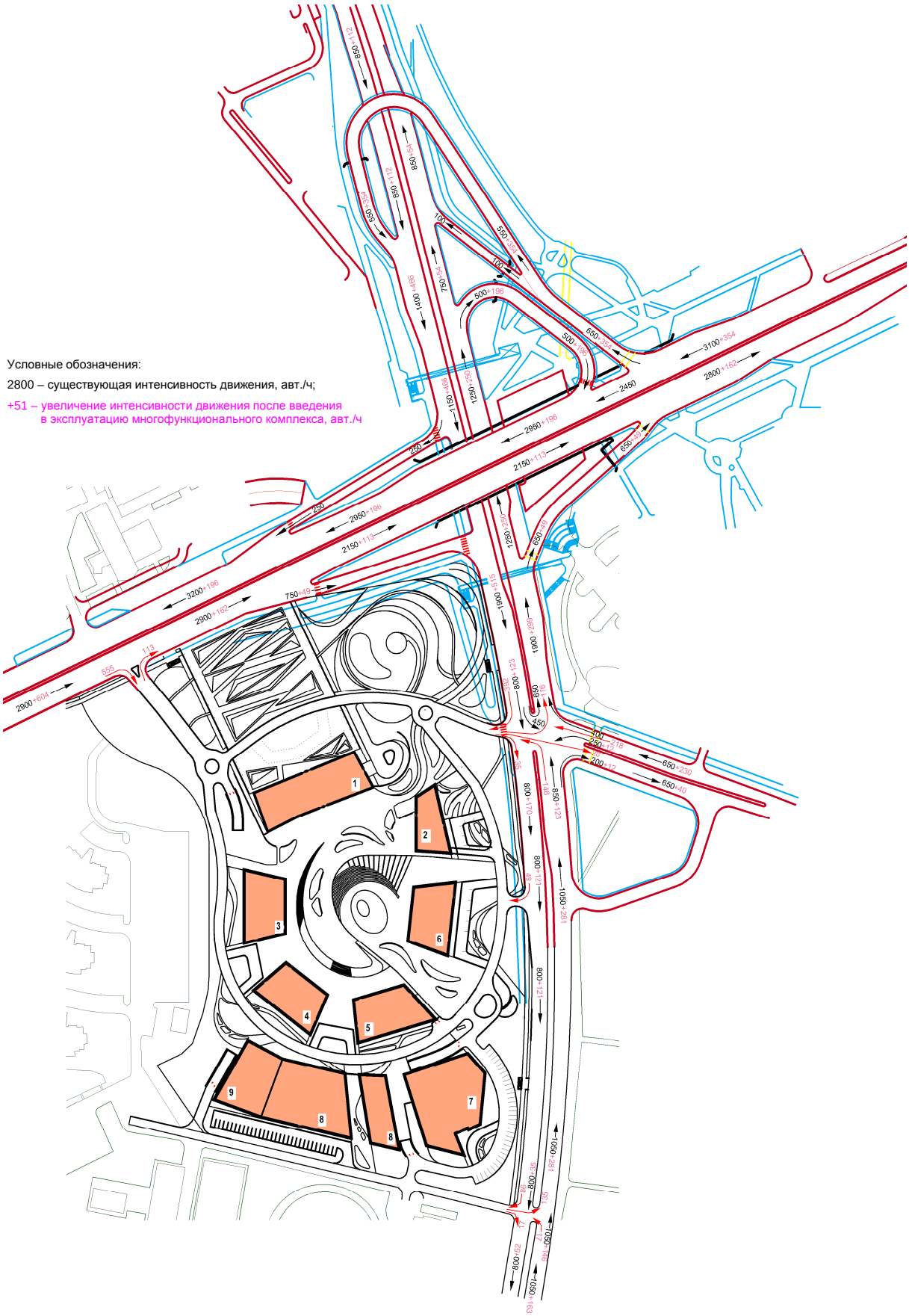


Рис. 4. Распределение перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта (вариант 1)

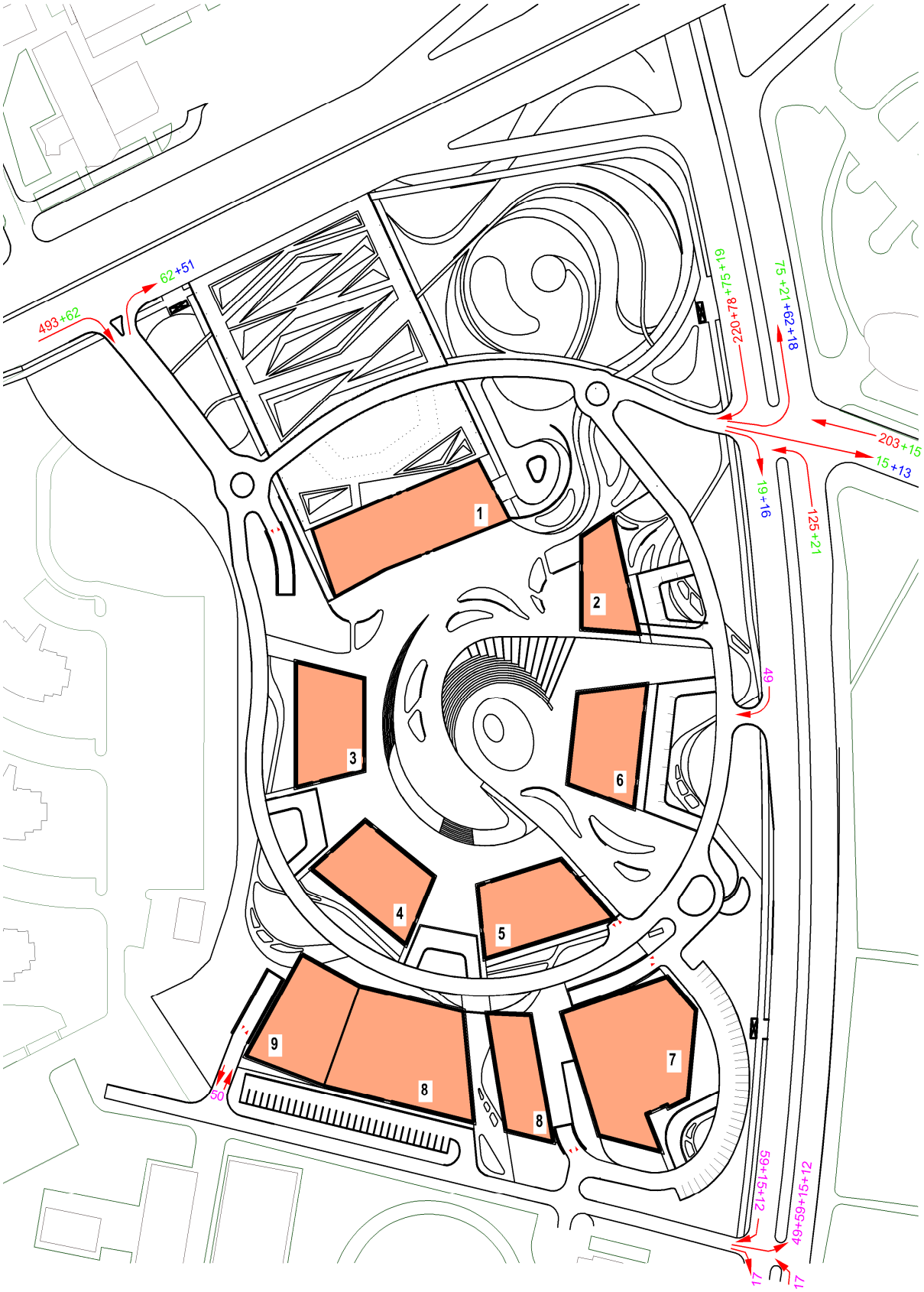


Рис. 5. Распределение перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта (вариант 2)

Расчет распределения интенсивности движения транспортных потоков по улично-дорожной сети. Исходными данными для расчета распределения интенсивности движения транспортных потоков по улично-дорожной сети являются существующая интенсивность движения транспорта в транспортных узлах в районе проектируемого комплекса и транспортной развязки, а также результаты расчетов распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта.

Расчет распределения интенсивности движения транспортных потоков по улично-дорожной сети выполнен с учетом устройства транспортной развязки, разрабатываемой УП «Минскинжпроект». Ниже приведены схемы распределения интенсивности движения транспортных потоков по улично-дорожной сети для двух вариантов: *вариант 1* – на основании предоставленного генерального плана (рис. 6); *вариант 2* – предлагаемый (рис. 7).

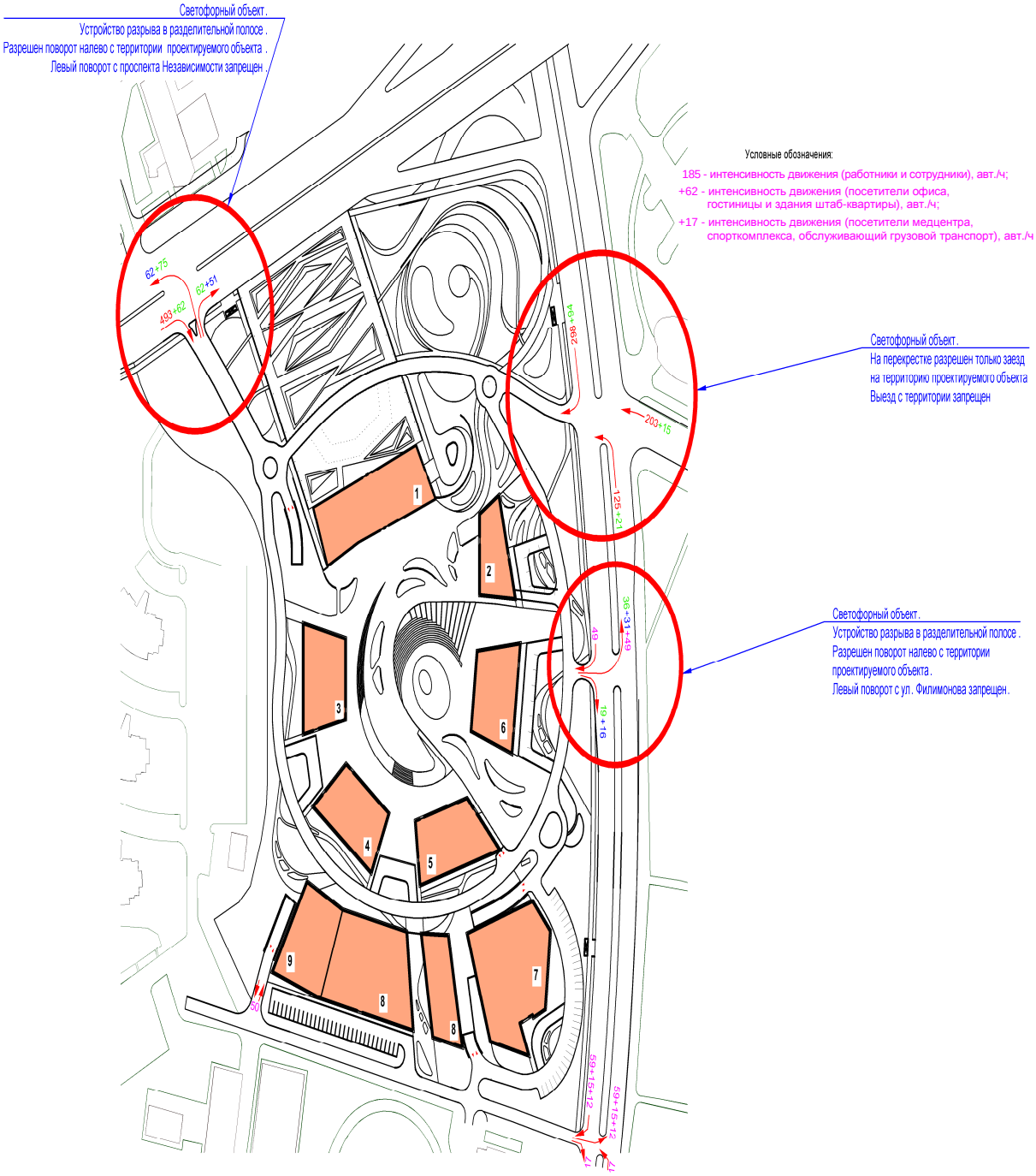


Рис. 6. Распределение перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта (вариант 1)

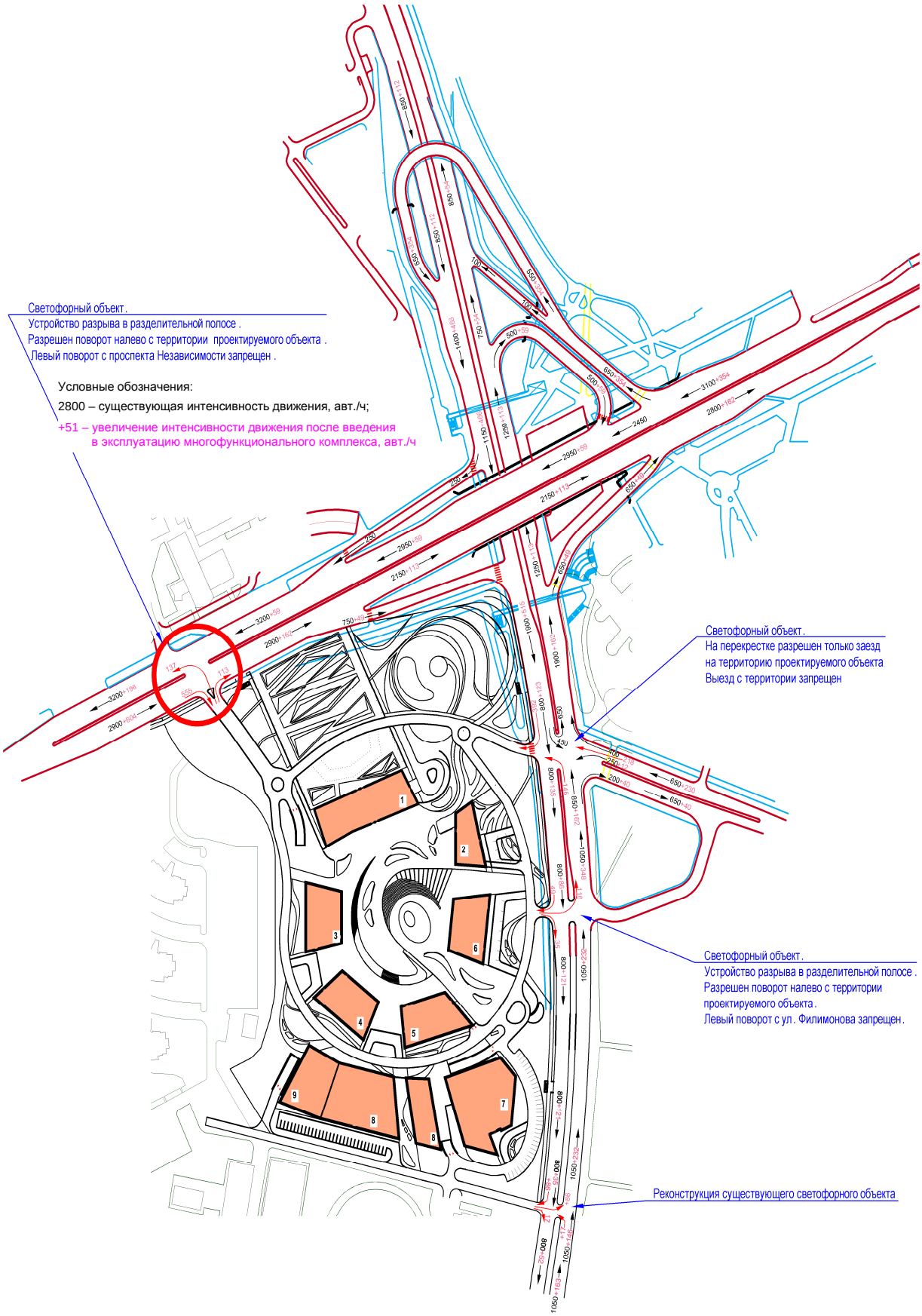


Рис. 7. Распределение перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта (вариант 2)

Итоговая цифрограмма распределения интенсивности движения по улично-дорожной сети будет зависеть от окончательных схем организации дорожного движения и схем пофазного движения в транспортных узлах, примыкающих к транспортной развязке на пересечении проспекта Независимости и улицы Филимонова, разрабатываемой УП «Минскинжпроект», а также от размещения въездов и выездов с территории многофункционального комплекса на улично-дорожную сеть и организации движения транспорта внутри него.

При принятии окончательного решения и разработке строительного проекта необходимо увязать планировочные решения и схемы организации дорожного движения по транспортной развязке с особенностями схем транспортного обслуживания многофункционального комплекса (наличие гостиницы, VIP-выездов, подземных паркингов большой вместимости и т.д.).

Заключение. На основе результатов проведенного анализа существующей транспортно-пешеходной нагрузки, особенностей существующей организации дорожного движения и условий движения с учетом устройства транспортной развязки и многофункционального комплекса, а также расчета распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта и разработки схем распределения интенсивности движения транспортных потоков по улично-дорожной сети предложены планировочные решения, предусматривающие устройство светофорных объектов на проспекте Независимости и улице Филимонова для организации заезда на территорию и выезда с неё транспорта комплекса во всех направлениях, а также реконструкцию существующего светофорного объекта на улице Филимонова (выезд с автовокзала) для возможности организации заезда транспорта со стороны улицы Парниковая на территорию комплекса. При этом необходимо рассмотреть возможность заезда со стороны местного проезда на подземные паркинги (основные – офисов и штаб-квартиры), а не только для обслуживания медицинского и спортивного центров и заезда грузового обслуживающего транспорта. Заезд на территорию комплекса со стороны местного проезда является перспективным с учетом развития данного участка сети и продлением существующего местного проезда до улицы Макаенка.

Обязательным условием для нормального функционирования всех устраиваемых или реконструируемых светофорных объектов, попадающих в зону проведения работ, служит организация схем пофазного движения с количеством фаз не более 3.

Данные мероприятия позволят снизить дополнительную транспортную нагрузку от проектируемого комплекса на наиболее нагружаемый перекресток улицы Филимонова и улицы Ф. Скорины и предотвратить возникновение заторовых ситуаций при заезде или выезде транспорта с улицы Филимонова на территорию многофункционального комплекса.

Полученные результаты исследований можно использовать для разработки более детальной планировки (строительного проекта) строительства развязки, разработки решений по организации дорожного движения по территории многофункционального комплекса и прилегающей улично-дорожной сети. Разработанные предложения по транспортному обслуживанию снизят совокупные аварийные, экономические и экологические потери в исследуемом районе.

Таким образом, организация дорожного движения в рассматриваемом районе застройки учитывает распределение перспективных транспортных и пешеходных потоков, объекты тяготения пешеходного и транспортного движения, а также режимы функционирования различных объектов, входящих в состав строящегося многофункционального комплекса ОАО «Газпром».

ЛИТЕРАТУРА

1. Врубель, Ю.А. Водителю о дорожном движении: пособие для слушателей учебного центра подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров автотракторного факультета / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. – 3-е изд., дораб. – Минск: БНТУ, 2010. – 139 с.
2. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д.В. Капский. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
3. Капский, Д.В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности: в 2-х т. / Д.В. Капский. – Минск, 2013. – Т. 1. – 282 с.
4. Постановление расширенного заседания коллегии Министерства транспорта Рос. Федерации от 24.10.12 2012, № 3.
5. Врубель, Ю.А. Опасности в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. – М.: Новое знание, 2013. – 244 с.
6. Ваксман, С.А. Моделирование ДТП – градостроительный аспект / С.А. Ваксман, Л.И. Свердлин // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: сб. докл. шестой междунар. конф.; СПбГАСУ. – СПб., 2004. – С. 305–307.

7. Трофименко, Ю.В. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов / Ю.В. Трофименко, М.Р. Якимов. – М.: Логос, 2013. – 464 с.
8. Ваксман, С.А. Принципы разработки и содержание КСОД столичного города (на примере Минска) / С.А. Ваксман, Ф.Г. Глик, Д.В. Капский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы седьмой междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 267–268.
9. Транспорт в планировке городов: пособие для студентов спец. 1-44 01 02 «Организация дорожного движения» / Д.В. Капский, А.В. Коржова, С.В. Скирковский. – Минск: БНТУ, 2015. – 144 с.
10. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
11. Свидетельство № 222 от 17.09.10 о регистрации компьютерных программ в Национальном центре интеллектуальной собственности / Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, М.К. Мирошник, А.В. Коржова; В.Н. Кузьменко; А.С. Полховская; Е.Н. Костюкович.
12. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования = Вуліцы населеных пунктаў. Будаўнічыя нормы праектавання: ТКП 45-3.03-227-2010 (02250). – Введ. 01.07.2011. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2011. – 46 с.

Поступила 06.07.2015

DECISION MAKING ON TRANSPORT PLANNING AND MAINTENANCE OF LARGE ROAD JUNCTIONS

D. KAPSKI, D. MOZOLEVSKY, V. KUZMENKO, A. POLKHOVSKY'S, A. KORZOVA, N. KISILEVICH, N. ERMAKOVA, E. GORELIK

The article presents the results of the study traffic conditions and transport support in the area of development, the limited main streets Filimonova, Makaenka, Scorina and Nezavisimosti Avenue. Experimental studies were carried out parameters of transport and pedestrian load in the test sites of the road network of the city of Minsk, the levels of loading for different periods on weekdays and weekends. Based on these studies the conditions and characteristics of the traffic study performed pre solutions to improve the quality of traffic in the study area to accommodate the construction of the transport interchange at the intersection of Nezavisimosti Avenue and streets Filimonova. The recommendations for the improvement of traffic conditions and the quality of traffic as a whole to study sites adjacent to the area of object.

УДК 656

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ УСТРОЙСТВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В ЗОНЕ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ В ДВУХ УРОВНЯХ

канд. техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ; Д.В. МОЗОЛЕВСКИЙ; В.Н. КУЗЬМЕНКО; А.С. ПОЛХОВСКАЯ; А.В. КОРЖОВА; Н.В. КИСЕЛЕВИЧ; Н.С. ЕРМАКОВА; Е.Н. ГОРЕЛИК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Приведены результаты исследования условий движения и интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков на перекрестках улиц Могилевской и Володько, Аранской и Маяковского, Маяковского и Оранжерейной, образующих исследуемый район транспортной застройки, в котором планируется устройство многофункционального комплекса «Червенский» с торговым, развлекательным, оздоровительным и деловым центрами и двухуровневой подземной парковкой. Выполнен анализ существующего способа организации дорожного движения, а также расчет распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта. Определен уровень загрузки на улично-дорожной сети с учетом интенсивности движения транспортных потоков от проектируемого многофункционального комплекса для оценки различных вариантов транспортного обслуживания исследуемого объекта. Разработаны варианты транспортной планировки узлов и организации движения в исследуемом районе застройки, которые будут способствовать повышению качества дорожного движения.

В дорожном движении участвует каждый гражданин страны и от качества этого важнейшего социально-производственного процесса зависит не только благосостояние каждого, но и государства в целом [1–3]. На стадии разработки проектных решений при разработке генеральных планов и планов детального проектирования отдельных районов застройки требуется первоначально учитывать требования организации дорожного движения, что будет способствовать устойчивому развитию транспортных систем города [3–8].

Постановка проблемы. На перекрестке улиц Маяковского и Аранской в городе Минске – мощном транспортном узле, образующемся пересечением магистральных улиц общегородского значения радиального и кольцевого функционального назначения, – планируется осуществить застройку многофункционального комплекса «Червенский» с торговым, развлекательным, оздоровительным и деловым центрами и двухуровневой подземной парковкой. Это расширит высоко нагруженный транспортный узел дополнительными потоками. Для снижения уровня загрузки и выбора альтернативных вариантов развития планировочно-организационной ситуации, во избежание транспортного коллапса требуется выполнить:

- исследование транспортно-пешеходной нагрузки в транспортных узлах, прилегающих к территории проектируемого многофункционального комплекса;
- анализ существующей организации дорожного движения и расчет существующего уровня загрузки на перекрестке улиц Аранская и Маяковского;
- расчет и распределение интенсивности движения транспорта при реконструкции транспортного узла улица Аранская – улица Маяковского с устройством дополнительного съезда для выполнения отнесенных левых поворотов при различных схемах организации дорожного движения;
- расчет и распределение прогнозируемой интенсивности движения транспорта проектируемого объекта;
- разработку расчетных схем распределения интенсивности движения транспортных потоков по улично-дорожной сети с учетом реконструкции перекрестка и строительства многофункционального комплекса; схем организации дорожного движения на территории проектируемого комплекса с учетом разработки принципиальных схем в транспортных узлах при выезде с проектируемого комплекса;
- расчет уровней загрузки для различных вариантов организации дорожного движения в транспортных узлах, прилегающих к проектируемому многофункциональному комплексу.

Анализ условий движения. Объектами исследования транспортно-пешеходной нагрузки являются:

- объект № 1: улица Могилевская – улица Володько;
- объект № 2: улица Аранская – улица Маяковского;
- объект № 3: улица Маяковского – улица Оранжерейная.

Интенсивность и состав транспортных потоков определялись путем натурного эксперимента по методике Белорусского национального технического университета в рабочие дни недели [9; 10 и др.].

Состав транспортного потока был разбит на восемь групп, которые были обозначены символами: Л (мотоциклы, легковые автомобили); К (микроавтобусы); Г (грузовые автомобили средней грузоподъемности); Р (грузовые автомобили большой грузоподъемности); С (сочлененные автобусы); Т (троллейбусы); О (маршрутные автобусы); П (автопоезда, тракторные поезда); А (немаршрутные автобусы).

В программном комплексе «RTF-Road traffic flows» [11] затем были обработаны исходные данные, в результате чего получены картограммы интенсивности и неравномерности движения, диаграммы состава потока и таблицы параметров.

Следует отметить, что на картограмме часть левоповоротного транспорта (направление AB и направление CD) составляет разворотный транспорт. Доля разворотного транспорта в составе левоповоротного достаточно высока на протяжении всего дня (табл. 1).

Таблица 1

Доля разворотного транспорта в составе левоповоротного транспорта на входе A и C

Время замера	вход A, %	вход C, %
08:00	60	15,3
11:00	77,8	9,6
14:00	65,2	9,8
17:00	37,5	5,1
20:00	66,7	13,8

Расположение проектируемого многофункционального комплекса «Червенский» с торговым, развлекательным, оздоровительным и деловым центрами и двухуровневой подземной парковкой на пересечении улиц Маяковского и Аранской в Минске предполагается на территории бывшего Червенского рынка в Ленинском районе столицы. Проектируемый комплекс расположен в границах улиц Аранская, Маяковского, Оранжерейная и Проектируемая, вдоль существующих железнодорожных путей. Улицы Аранская и Маяковского являются магистральными, общегородского значения (категория А по ТКП 45-3.03-227).

Через исследуемый участок улично-дорожной сети проходит большое количество маршрутов пассажирского транспорта (автобусы и троллейбусы – около 20 маршрутов; маршрутные такси – около 10 маршрутов).

На основании исследований транспортно-пешеходной нагрузки и анализа существующей схемы организации дорожного движения выполнен расчет уровня загрузки на перекрестке улиц Аранская и Маяковского (рис. 1).

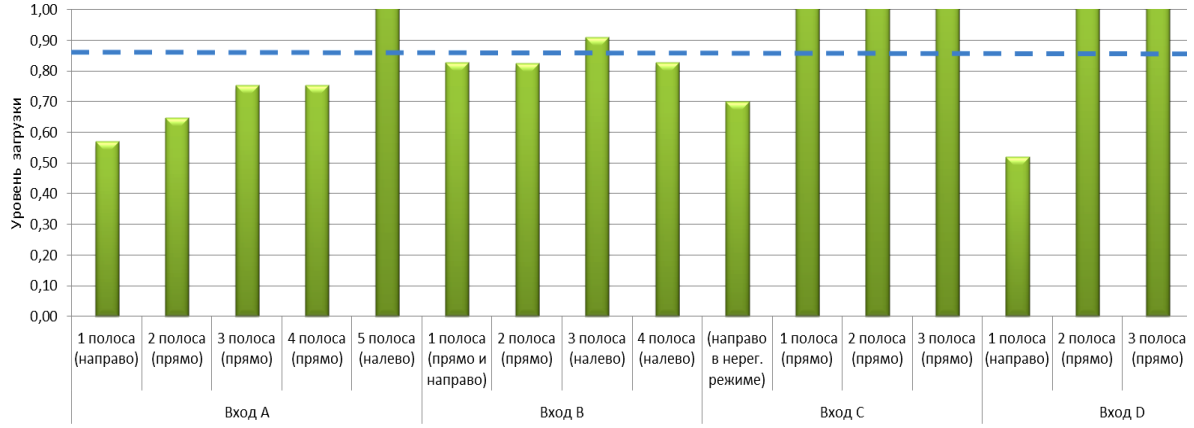
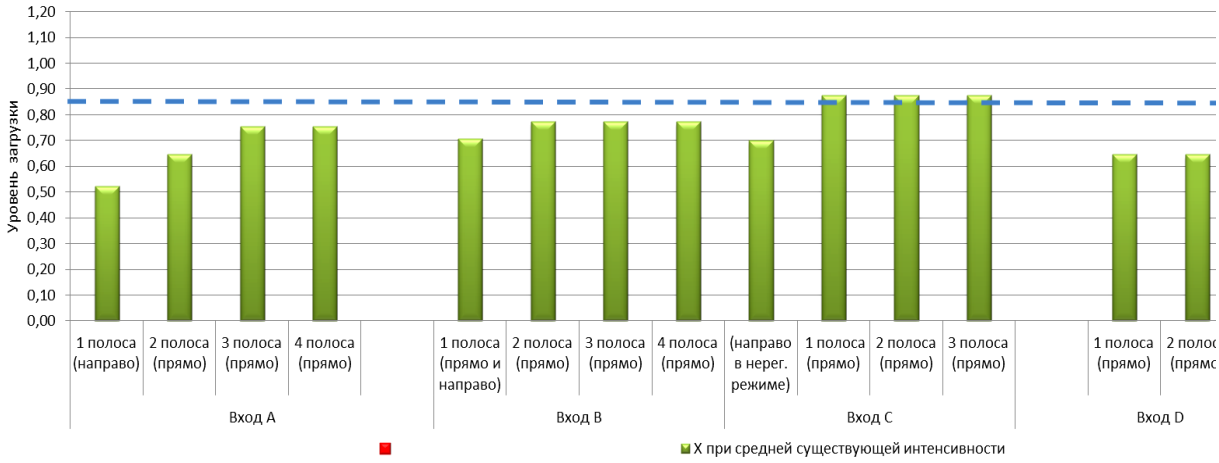


Рис. 1. Существующий уровень загрузки на перекрестке улиц Аранская и Маяковского (при средней существующей интенсивности)

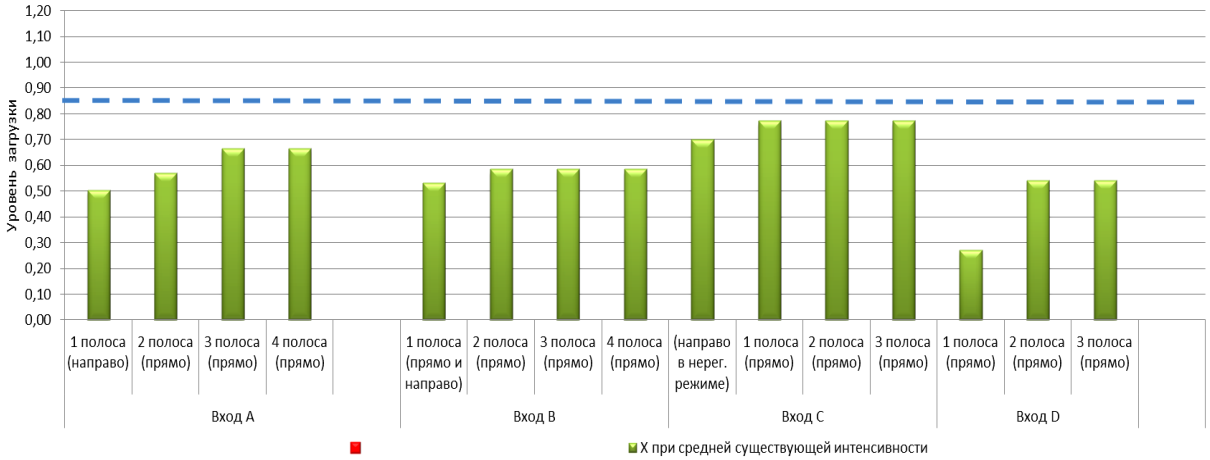
В настоящее время на данном перекрестке наблюдаются перегрузки не только в пиковые часы, но и в межпиковый период. Для повышения пропускной способности данного перекрестка специалистами УП «Минскинжпроект» и БНТУ НИЦ ДД была разработана реконструкция данного узла с устройством левоповоротного съезда. Реконструкция данного перекрестка позволит повысить безопасность движения, снизить уровень загрузки, уменьшить длину очередей на подходе к перекресту и в целом уменьшить потери и задержки участников дорожного движения. Прогнозируемые уровни загрузки для различных схем представлены на рисунке 2 (фрагмент).

Анализ прогнозируемых уровней загрузки показал, что на перекрестке улиц Аранская и Маяковского необходимо применение 2-фазной схемы регулирования с запрещением левого поворота с улицы Маяковского (в сторону улицы Могилевской), с организацией отнесенных левых поворотов с улицы Сверд-

лова в сторону Партизанского проспекта и с улицы Аранской в сторону улицы Свердлова через проектируемый левоповоротный съезд, с сохранением существующего отнесенного левого поворота с улицы Аранской в сторону улицы Маяковского. Также существует резерв на перекрестке улиц Маяковского Оранжерейной для устройства заезда или выезда на территорию многофункционального комплекса. Устройство транспортной развязки в разных уровнях на перекрестке улиц Аранская и Маяковского в ближайшее время нецелесообразно.



а)



б)

Рис. 2. Предполагаемый уровень загрузки на перекрестке улиц Аранская и Маяковского:
а – схема организации дорожного движения с устройством левоповоротного съезда
и сохранением левоповоротного движения с улицы Маяковского (в сторону ул. Могилевской).
На перекрестке улиц Аранская и Маяковского применяется 3-хфазная схема регулирования;
б – схема организации дорожного движения с устройством левоповоротного съезда
и запрещением левоповоротного движения с улицы Маяковского (в сторону улицы Могилевской).
На перекрестке улиц Аранская и Маяковского применяется 2-фазная схема регулирования

Расчет распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта. Исходными данными для расчета распределения перспективной интенсивности движения транспорта от проектируемого объекта являются ведомость проектируемых зданий и сооружений с указанием их площади, а также расчёт количества мест для стоянки автомобилей на всех уровнях паркинга, предоставленные заказчиком работ.

Интенсивность движения транспортных средств, въезжающих и выезжающих с территории проектируемой зоны многофункционального комплекса, складывается из следующих составляющих:

- сотрудников проектируемого комплекса, офисов, торгово-развлекательных центров и др., прибывающих к началу рабочего дня в утренний «час пик» и выезжающих в конце рабочего дня в вечерний «час пик»;

- посетителей проектируемого комплекса, офисов, торговых центров и др., прибывающих в течение рабочего дня, как правило, в «межпиковый период»;

- посетителей торгово-развлекательных центров, боулинга, ресторана, кафе, кинотеатра и т.д., прибывающих в вечерний «пиковый период» и позже.

Исходя из сказанного распределение интенсивности движения в течение суток будет характеризоваться отсутствием ярко выраженных «пиковых» периодов въезда и выезда с территории комплекса.

Расчет прогнозируемого увеличения интенсивности движения на прилегающей улично-дорожной сети, связанного со строительством (введением в эксплуатацию) проектируемого многофункционального комплекса, выполнен с учетом расчетного количества парковочных мест, предоставленного заказчиком.

Для распределения рассчитанной прогнозируемой интенсивности движения по улично-дорожной сети используются данные об интенсивности движения на улично-дорожной сети, прилегающей к проектируемому объекту. В зависимости от процентного распределения существующей интенсивности движения выполнено распределение перспективной интенсивности движения транспорта въезжающего на территорию многофункционального комплекса и выезжающего с территории многофункционального комплекса (табл. 2). Распределение прогнозируемой интенсивности движения выполнено для различных вариантов в зависимости от организации дорожного движения на близлежащих перекрестках.

Таблица 2

Прогнозируемое увеличение интенсивности движения транспортных средств

Пути подъезда к проектируемой зоне	Интенсивность движения транспортных средств, въезжающих на территорию (паркинг), авт./ч	Интенсивность движения транспортных средств, выезжающих с территории (паркинг), авт./ч
Улица Свердлова (со стороны вокзала)	192	192
Улица Аранская (со стороны проспекта Партизанского)	222	222
Улица Маяковского (от улицы Денисовской)	155	155
Улица Могилевская (со стороны улицы Жуковского)	170	170
ВСЕГО	**739**	**739**

Следует отметить, что распределение перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта по прилегающим улицам значительно зависит от размещения въездов и выездов с территории комплекса, организации дорожного движения на прилегающих участках улично-дорожной сети, организации движения на территории многофункционального комплекса.

Схемы распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта для трех вариантов приведены на рисунках 4–6.

Вариант 1. На перекрестке улиц Маяковского и Оранжерейная: с улицы Оранжерейной разрешен только поворот направо; с улицы Маяковского (со стороны улицы Денисовской) разрешено движение только прямо и направо.

Таким образом, заезд на территорию проектируемого комплекса и выезд осуществляется в основном на перекрестке улиц Аранская и Проектируемая.

Заезд на территорию проектируемого комплекса возможен:

- по улице Аранской со стороны улицы Могилевской (правый поворот) и со стороны улицы Маяковского (левый поворот);
- по улице Маяковского – со стороны улицы Свердлова (правый поворот).

Выезд с территории проектируемого комплекса допустим:

- по улице Оранжерейной – только направо на улице Маяковского в направлении улицы Денисовской;
- по Проектируемой улице – направо на улицу Аранскую и налево на улицу Могилевскую;

Вариант 2. На перекрестке улиц Маяковского и Оранжерейная: с улицы Оранжерейной разрешен только поворот направо; с улицы Маяковского (со стороны улицы Денисовской) разрешено движение во всех направлениях.

Таким образом, заезд на территорию проектируемого комплекса возможен в равной степени на перекрестках улиц Аранская и Проектируемая, улиц Маяковского и Оранжерейная. Выезд преимущественно осуществляется на перекрестке улиц Аранская и Проектируемая.

Заезд на территорию проектируемого комплекса допустим:

- по улице Аранской – со стороны улицы Могилевской (правый поворот) и со стороны улицы Маяковского (левый поворот);
- по улице Маяковского – со стороны улицы Свердлова (правый поворот) и со стороны улицы Денисовской (левый поворот).

Выезд с территории проектируемого комплекса может быть осуществлен:
- по улице Оранжерейной – только направо на улицу Маяковского в направлении улицы Денисовской;
- по Проектируемой улице – направо на улицу Аранскую, налево – на улицу Могилевскую.

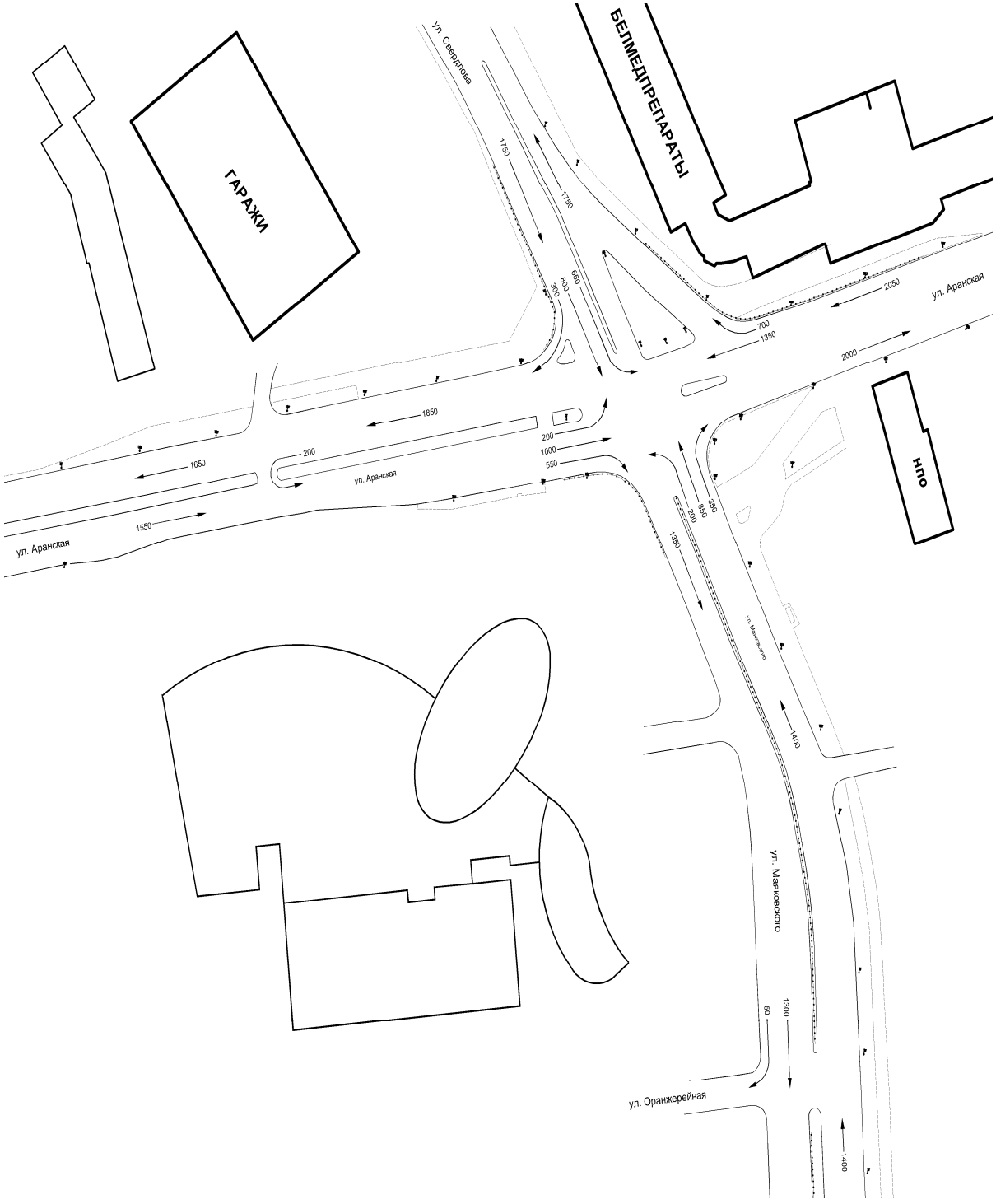


Рис. 4. Организация дорожного движения в исследуемом районе (вариант 1)

Вариант 3. На перекрестке улиц Маяковского и Оранжерейная: с улицы Оранжерейной разрешено движение во всех направлениях; с улицы Маяковского (со стороны улицы Денисовской) – во всех направлениях.

Таким образом, заезд на территорию проектируемого комплекса и выезд с комплекса возможны в равной степени на перекрестках улиц Аранская и Проектируемая, Маяковского и Оранжерейная.

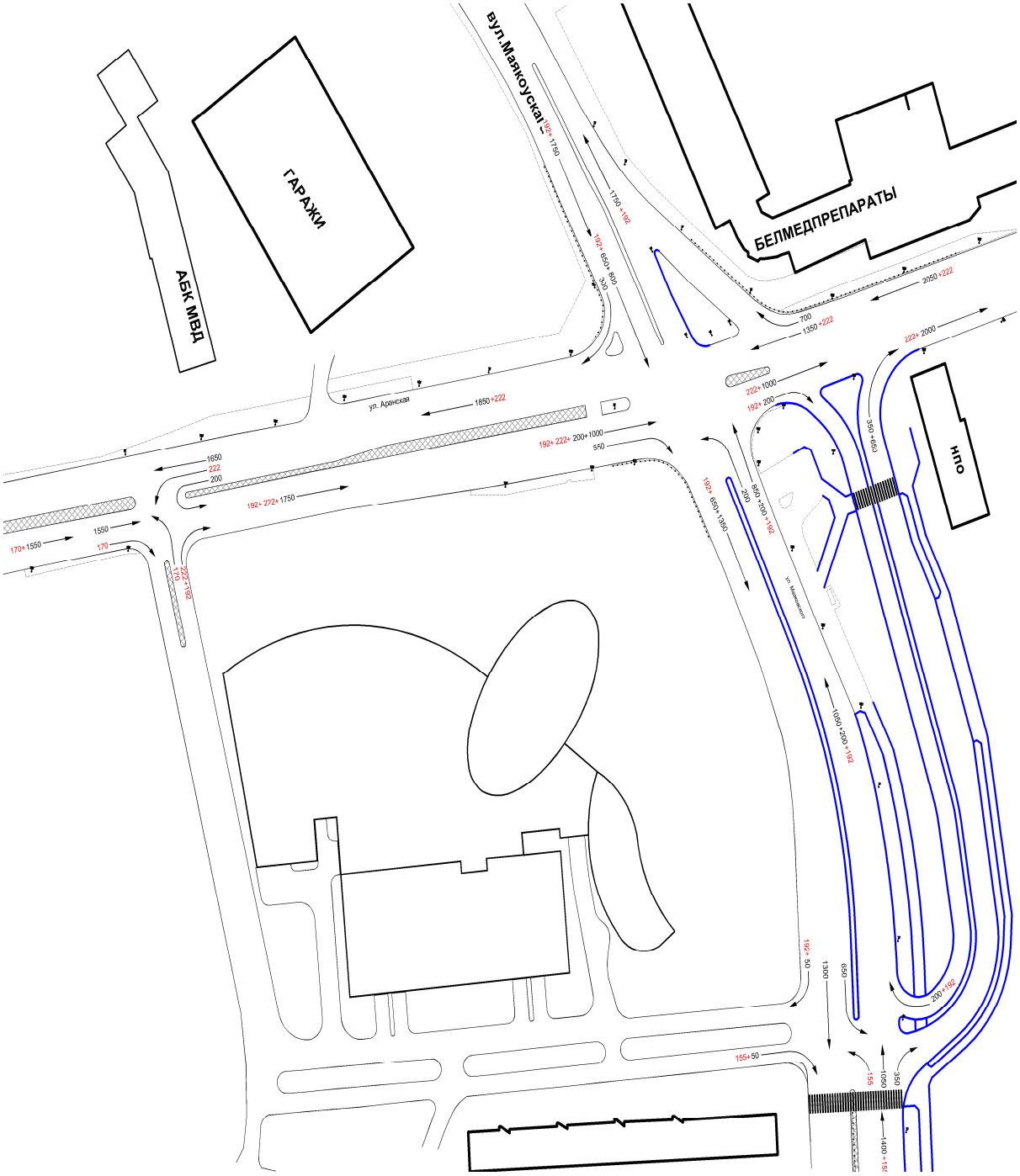


Рис. 5. Организация дорожного движения в исследуемом районе (вариант 2)

Обязательное условие функционирования проектируемого комплекса – введение светофорного регулирования на перекрестках улиц Маяковского и Оранжерейная, Аранская и Проектируемая.

Расчет уровней загрузки на улично-дорожной сети с учетом интенсивности движения транспортных потоков от проектируемого многофункционального комплекса. Расчет уровней загрузки выполнен с учетом реконструкции перекрестка улиц Аранская и Маяковского и применения на этом перекрестке двухфазной схемы регулирования (непосредственно на перекрестке запрещены все левые повороты, возможно выполнение отнесенных левых поворотов).

Рассчитано несколько вариантов уровней загрузки с учетом различных разрешенных направлений движения на перекрестке и, соответственно, различного распределения транспортных потоков по направлениям (рис. 7–10).

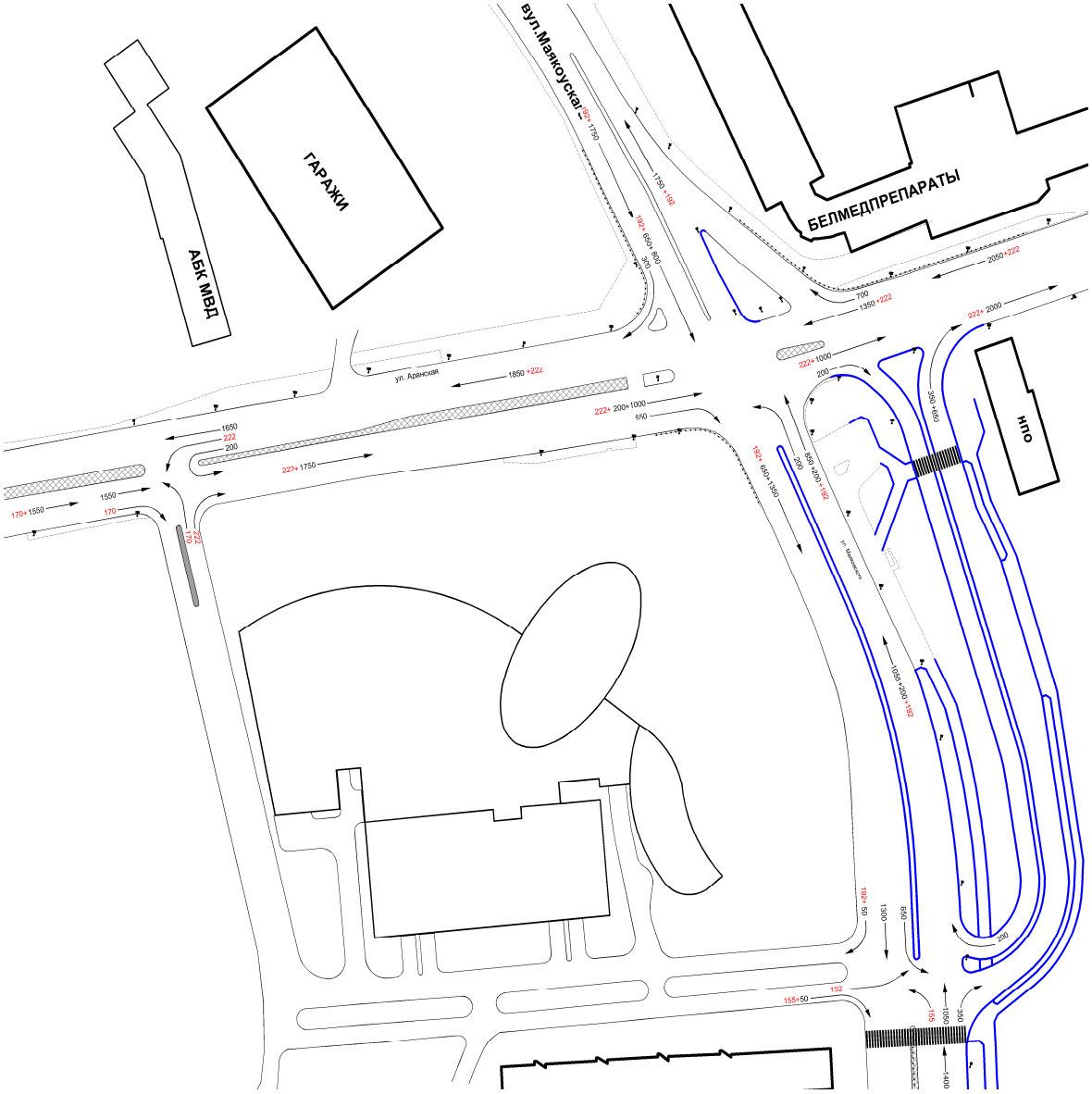


Рис. 6. Организация дорожного движения в исследуемом районе (вариант 3)

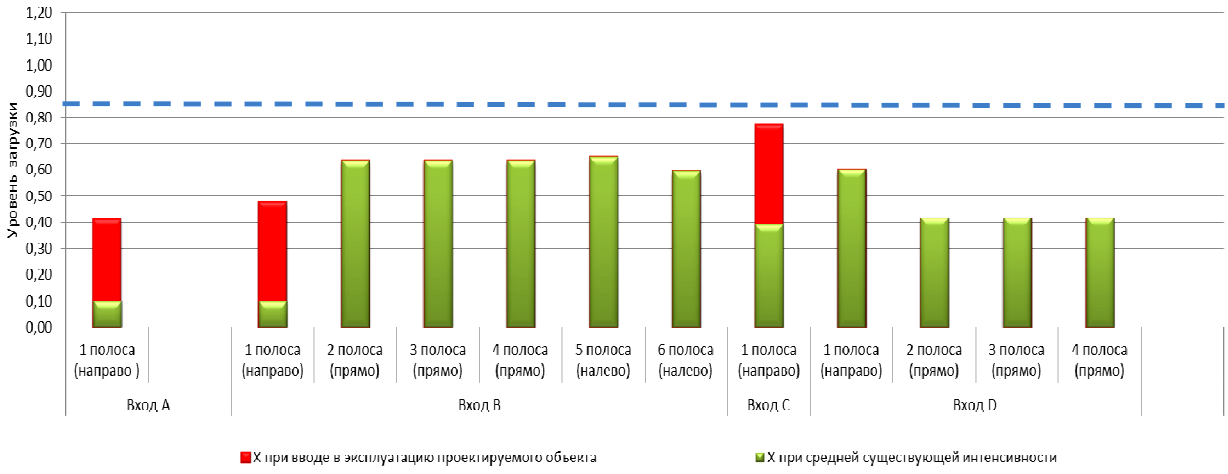


Рис. 7. Предполагаемый уровень загрузки на перекрестке улиц Маяковского и Оранжерейная (2 фазы с улицы Оранжерейной только направо; В – со стороны улицы Аранской)

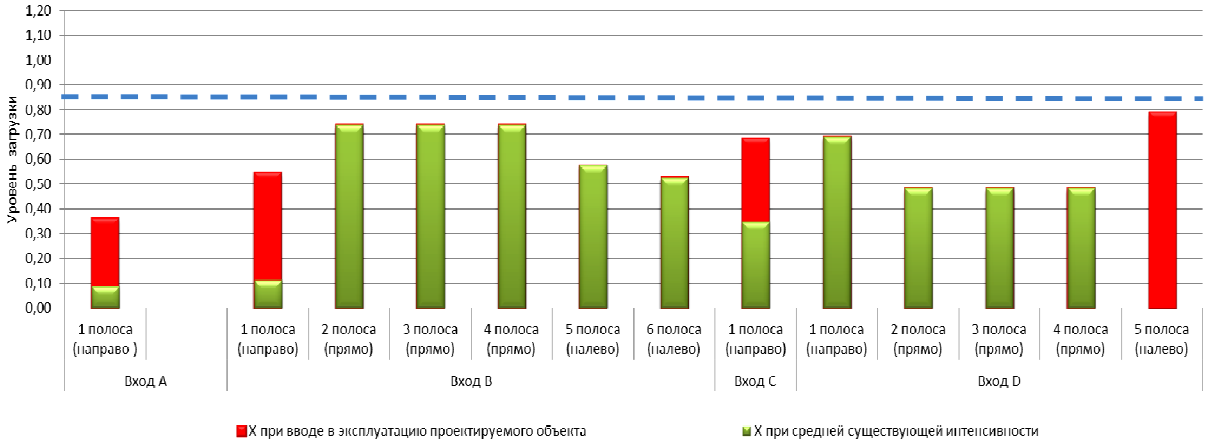


Рис. 8. Предполагаемый уровень загрузки на перекрестке улиц Маяковского и Оранжерейная
(3 фазы, с улицы Оранжерейной только направо, разрешен левый поворот с улицы Маяковского на Оранжерейную)

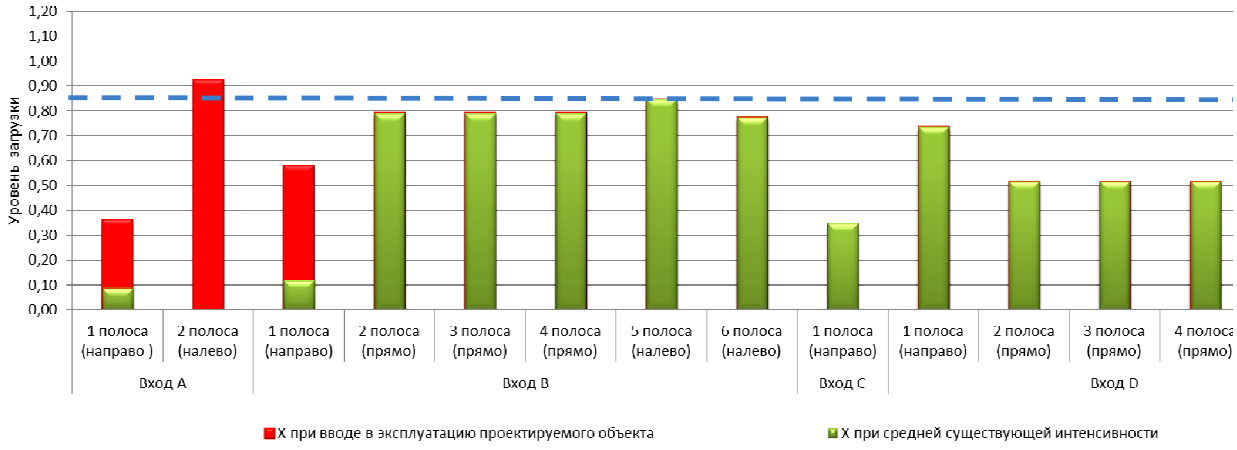


Рис. 9. Предполагаемый уровень загрузки на перекрестке улиц Маяковского и Оранжерейная
(3 фазы, с улицы Оранжерейной во всех направлениях, разрешен левый поворот с улицы Маяковского на Оранжерейную)

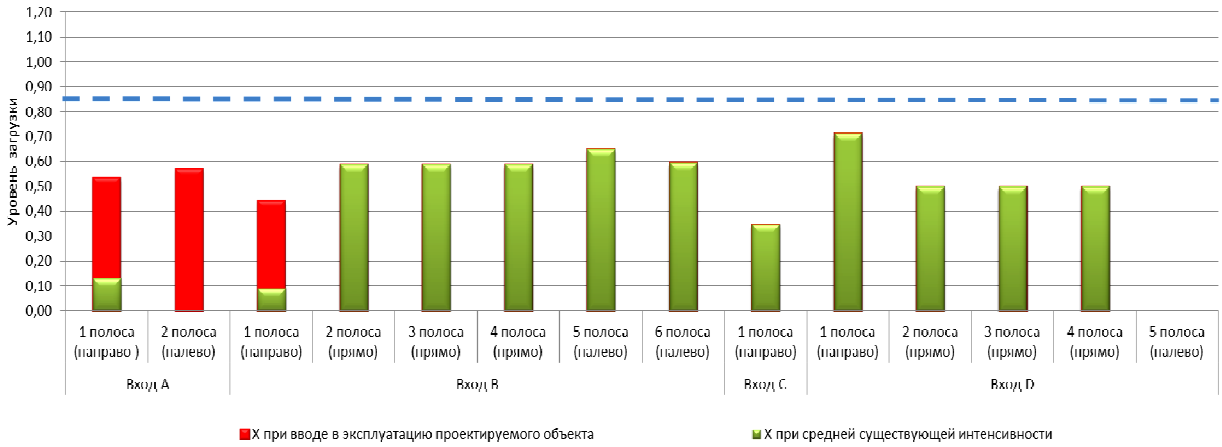


Рис. 10. Предполагаемый уровень загрузки на перекрестке улиц Маяковского и Оранжерейная
(3 фазы, с улицы Оранжерейной во всех направлениях, запрещен левый поворот с улицы Маяковского на Оранжерейную)

Наилучшим вариантом организации дорожного движения на данном перекрестке является решение, при котором запрещен левый поворот с улицы Маяковского на улицу Оранжерейную и разрешен выезд с улицы Оранжерейной во всех направлениях.

Также можно сохранить базовую схему организации дорожного движения, при которой движение с улицы Оранжерейной выполняется только направо, но тогда увеличится количество автомобилей, выполняющих разворот на перегоне улицы Маяковского (рис. 11).

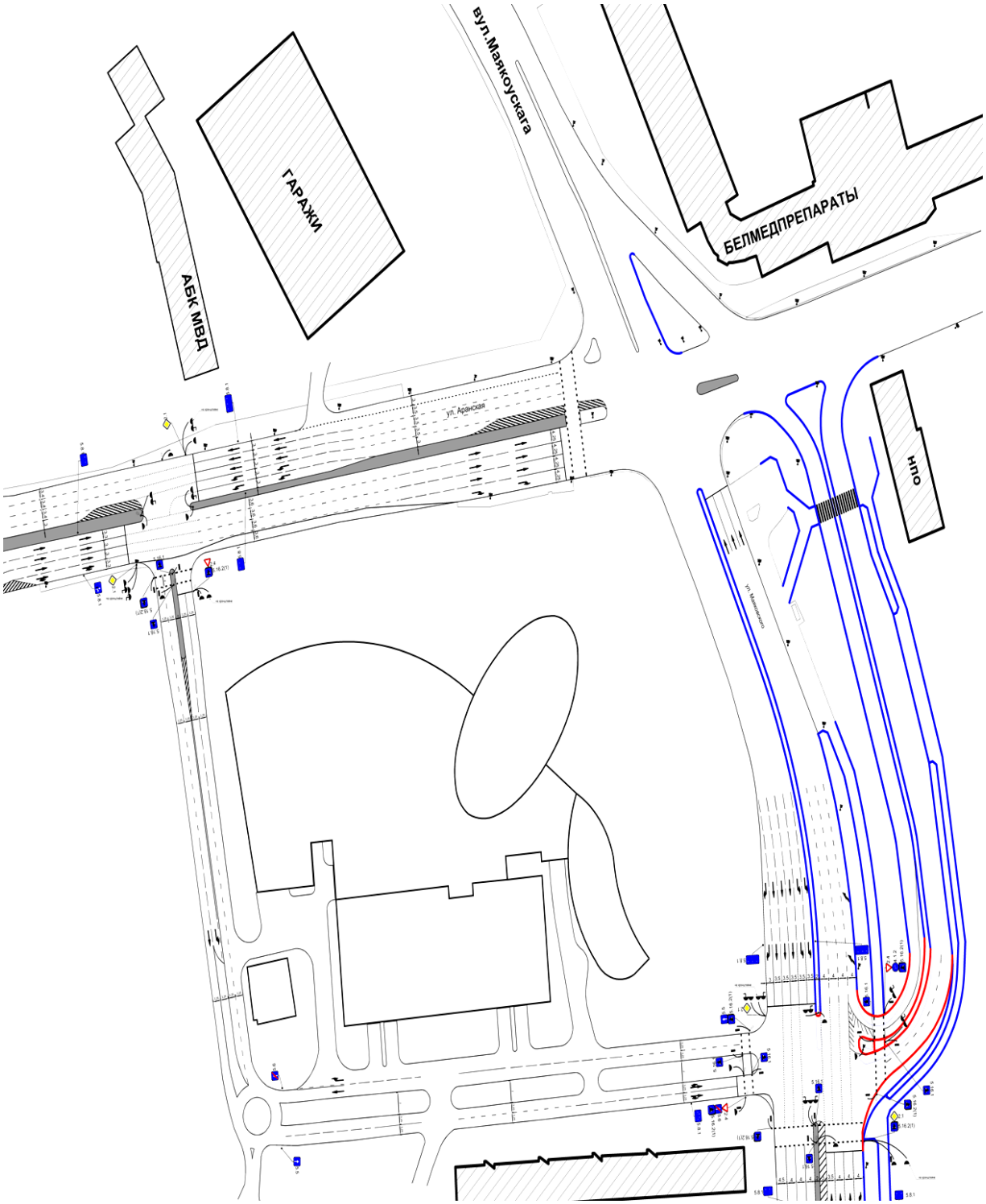


Рис. 11. Принципиальная организация дорожного движения в исследуемом районе

Рассчитано несколько вариантов и уровней загрузки с учетом различных разрешенных направлений движения по полосам на перекрестке и различных распределений транспортных потоков по направлениям, связанных с ограничениями движения на перекрестке улицы Аранской и проектируемого заезда к комплексу.

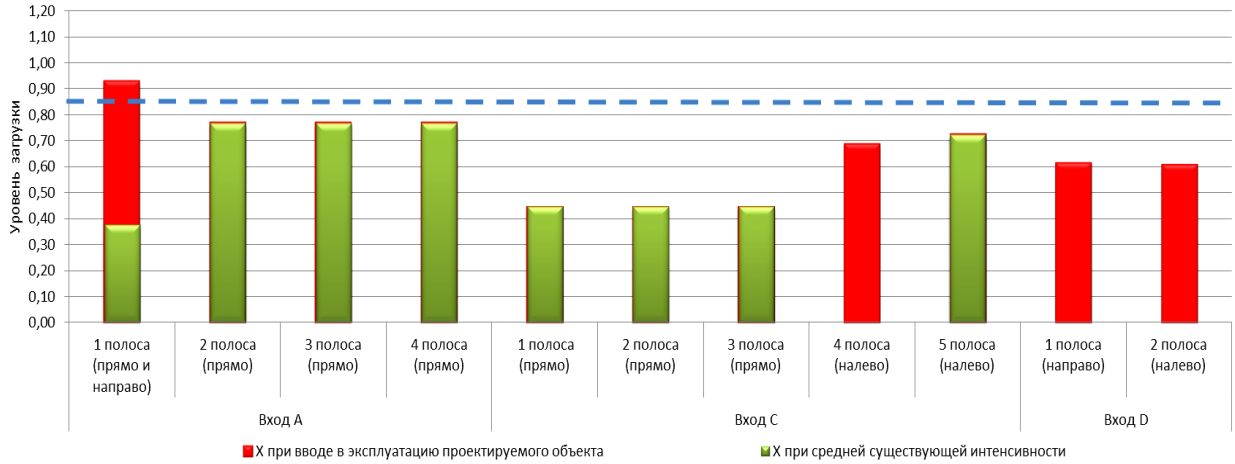


Рис. 12. Предполагаемый уровень загрузки (фрагмент)
на перекрестке улиц Аранская и проектируемый заезд к комплексу (3 фазы)
(на перекрестке улиц Маяковского и Оранжерейная: с улицы Оранжерейной только направо,
запрещен левый поворот с улицы Маяковского на улицу Оранжерейную)

Заключение. В результате проведенного анализа существующей транспортно-пешеходной нагрузки, особенностей существующей организации дорожного движения, условий движения с учетом устройства многофункционального комплекса, а также с учетом расчета распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта и разработки схем распределения интенсивности движения транспортных потоков по улично-дорожной сети предложены планировочные решения, предусматривающие устройство светофорных объектов на улице Аранской – проектируемый заезд к комплексу, улице Маяковского – Оранжерейная. Предложения выполнены с учетом реконструкции перекрестка улиц Маяковского и Аранская и устройства левопоротного съезда.

На перекрестке улицы Аранская и проектируемого заезда к комплексу необходимо:

- по улице Аранской со стороны улицы Володько – устройство четырех полос;
- по улице Аранской со стороны улицы Маяковского – устройство пяти полос, в том числе две полосы для поворота налево и разворота;
- по Проектируемому заезду – устройство 4 полос в двух направлениях.

На перекрестке улиц Маяковского и Оранжерейная необходимо:

- по улице Маяковского со стороны улицы Аранской – устройство 6 полос, в том числе 1 полоса направо и 2 полосы налево;
- по улице Маяковского со стороны улицы Денисовской – устройство минимум 4 полос, в том числе 1 полоса направо;
- по улице Оранжерейной – устройство 2 полос.

Обязательным условием для нормального функционирования всех устраиваемых или реконструируемых светофорных объектов, попадающих в зону проведения работ, является организация схем пофазного движения с количеством фаз не более 3.

Устройство транспортной развязки в разных уровнях на перекрестке улиц Аранская и Маяковского в ближайшее время нецелесообразно. Рекомендуется реконструировать данный перекресток по ранее представленному проекту. Строительство запроектированной транспортной развязки усложнит ситуацию с обслуживанием транспорта проектируемого комплекса. В случае строительства транспортной развязки необходимо ее перепроектирование с учетом возможности обслуживания проектируемого комплекса, что снизит аварийные, экономические и экологические потери в исследуемом районе.

Полученные результаты исследований можно использовать для разработки более детальной планировки (строительного проекта) строительства развязки, разработки решений по организации дорожного движения по территории многофункционального комплекса и прилегающей улично-дорожной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Врубель, Ю.А. Водителю о дорожном движении: пособие для слушателей учебного центра подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров автотракторного факультета / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. –3-е изд., дораб. – Минск: БНТУ, 2010. – 139 с.
2. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д.В. Капский. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.

3. Капский, Д.В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности: в 2-х т. / Д.В. Капский. – Минск, 2013. – Т. 1. – 282 с.
4. Постановление расширенного заседания коллегии Министерства транспорта Рос. Федерации от 24.10.12 2012, № 3.
5. Врубель, Ю.А. Опасности в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. – М.: Новое знание, 2013. – 244 с.
6. Ваксман, С.А. Моделирование ДТП – градостроительный аспект / С.А. Ваксман, Л.И. Свердлин // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: сб. докл. шестой междунар. конф.; СПбГАСУ. – СПб., 2004. – С. 305–307.
7. Трофименко, Ю.В. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов / Ю.В. Трофименко, М.Р. Якимов. – М.: Логос, 2013. – 464 с.
8. Ваксман, С.А. Принципы разработки и содержание КСОД столичного города (на примере Минска) / С.А. Ваксман, Ф.Г. Глик, Д.В. Капский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы седьмой междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т.; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 267–268.
9. Капский, Д.В. Транспорт в планировке городов: пособие для студентов спец. 1-44 01 02 «Организация дорожного движения» / Д.В. Капский, А.В. Коржова, С.В. Скирковский. – Минск: БНТУ, 2015. – 144 с.
10. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
11. Свидетельство № 222 от 17.09.10 о регистрации компьютерных программ в Национальном центре интеллектуальной собственности / Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, М.К. Мирошник, А.В. Коржова, В.Н. Кузьменко, А.С. Полховская, Е.Н. Костюкович.
12. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования = Вуліцы населеных пунктаў. Будаўнічыя нормы праектавання: ТКП 45-3.03-227-2010 (02250). – Введ. 01.07.2011. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2011. – 46 с.

Поступила 06.07.2015

TRAFFIC MANAGEMENT WHEN CHANGING OBJECTS GRAVITY IN THE AREA OF VEHICLE ASSEMBLY FORMED BY MAIN STREETS CITYWIDE IMPORTANCE IN MINSK

D. KAPSKI, D. MOZOLEVSKY, V. KUZMENKO, A. POLKHOVSKY'S, A. KORZOVA, N. KISILEVICH, N. ERMAKOVA, E. GORELIK

The article presents the results of the study traffic conditions and the intensity of road traffic and pedestrian flows at intersections Street. Mogilev – st. Volodko, str. Aranskaya – st. Mayakovsky and st. Mayakovsky – st. Oranzereinaiya, which form the study area oftransport development, in which the device is planned multifunctional complex "Chervenski" with shopping, entertainment, wellness and business center, and a two-level underground parking. The analysis of the existing road traffic management, as well as the calculation of the distribution perspective road traffic intensity of the proposed facility. The studies allowed the determination of levels of exercise load on the road network, taking into account the intensity of the road traffic flow of a multifunctional complex designed to assess the various options of transport service of the object. Develop options for transport planning and traffic management units in the study area development that will enhance the quality of road traffic.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 665.654.2

СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОСТАТОЧНОГО ПРОДУКТА ПРОЦЕССА «ЮНИКРЕКИНГ»

канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК; канд. хим. наук, доц. С.В. ПОКРОВСКАЯ; канд. пед. наук, доц. И.В. БУРАЯ; Е.В. СЮБАРЕВА; А.В. ЗАВАДСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены направления комплексной переработки остаточного продукта процесса гидрокрекинга вакуумных газойлей нефти. Выявлены закономерности изменения свойств остаточного продукта процесса «Юникрекинг» фирмы UOP в зависимости от свойств перерабатываемого сырья. Приведены результаты сравнительного анализа группового состава сырья процесса «Юникрекинг» – вакуумного газойля и остаточного продукта процесса «Юникрекинг». Показано, что благодаря высокому содержанию насыщенных углеводородов вышеуказанный продукт обладает высоким индексом вязкости и низким значением индекса BMCI. Выявлены закономерности изменения свойств и распределения различных групп углеводородов по фракциям, выделенным из остаточного продукта процесса «Юникрекинг». Предложены возможные направления комплексной переработки остаточного продукта процесса «Юникрекинг». Показано, что фракционирование остатка процесса «Юникрекинг» позволит получить сырьё для производства базовых масел с заданным диапазоном изменения вязкости и высокими вязкостно-температурными характеристиками, а также повысить качество сырья для процесса пиролиза.

Введение. Гидрокрекинг – эффективный и исключительно гибкий каталитический процесс, позволяющий комплексно решить проблему глубокой переработки вакуумных дистиллятов с получением широкого ассортимента моторных топлив в соответствии с современными требованиями и потребностями в тех или иных топливах. Процесс гидрокрекинга также с успехом может использоваться для производства высокоиндексных базовых смазочных масел. Масла гидрокрекинга представляют собой высококачественную основу товарных многофункциональных всесезонных моторных масел, а также ряда энергетических (например, турбинных) и индустриальных (трансмиссионных и т.п.) масел [1].

Одним из продуктов топливного гидрокрекинга вакуумных газойлей является тяжелый остаток – фракция 350…530 °С – с низким содержанием гетероатомных соединений, в частности соединений серы, и высоким содержанием насыщенных углеводородов. Как правило, на предприятиях топливного профиля остаток процесса гидрокрекинга используется либо как малосернистое котельное топливо, либо как компонент сырья процесса каталитического крекинга [2; 3].

Остаточный продукт процесса гидрокрекинга вакуумных газойлей представляет собой сложную смесь высококипящих соединений, состоящую преимущественно из парафиновых и нафтеновых углеводородов, с низким содержанием серы и фактически полным отсутствием тяжелых металлов. В связи с этим он может быть использован не только при получении топлив, но и как сырьё для нефтехимичской промышленности, а также производства высококачественных базовых масел II и III групп в соответствии с требованиями API [4–8].

В работах [9; 10] опубликованы результаты исследований по использованию остаточного продукта процесса гидрокрекинга с глубиной конверсии вакуумного газойля от 32 до 56 %масс. в качестве сырья процесса пиролиза. Показано, что увеличение глубины конверсии сырья в процессе гидрокрекинга приводит к снижению плотности, коксуемости, содержанию в остаточном продукте гидрокрекинга ароматических углеводородов. При этом наблюдается снижение содержания в образцах ди- и полиароматических соединений, которые в процессе гидрокрекинга преимущественно превращаются в более устойчивые моноароматические соединения. С ростом глубины конверсии сырья содержание в остатке гидрокрекинга алканов увеличивается, что способствует увеличению выхода этилена и пропилена в процессе пиролиза. Выявлено неравномерное распределение углеводородов различных групп по фракциям остатка гидрокрекинга.

Наиболее предпочтительный вариант подготовки вакуумного газойля как сырья для процесса пиролиза – это гидрокрекинг при давлении 15 МПа [11]. Такая предварительная подготовка газойлей позволяет существенно снизить в них содержание ароматических соединений преимущественно полицик-

лического строения, вызывающих в процессе пиролиза повышенное коксообразование. При этом суммарное содержание в остатке гидрогенизата с температурой кипения > 340 °С нафтеновых углеводородов и алканов, характеризующихся высоким «олефиновым» потенциалом, достигает 98 %масс.

Компания Air Global E&C Solution предлагает использовать остатки процесса гидрокрекинга в качестве сырья процесса газификации по технологии Lurgi MGP для получения на нефтеперерабатывающих заводах водорода [12].

Известно, что свойства остатков гидрокрекинга и его групповой состав зависят от ряда факторов: качества поступающего на переработку сырья, глубины его конверсии, активности катализатора, конструктивных особенностей установки гидрокрекинга, эффективности работы различных её блоков и т.п. Сырьё в процессе гидрокрекинга подвергается комплексу сложных химических превращений, приводящих к существенному изменению его группового состава, в том числе перераспределению различных групп углеводородов по фракциям. В связи с этим можно ожидать, что фракции, выделенные из остатка гидрокрекинга путем его вакуумной перегонки, будут различаться не только по температурам кипения, но и по содержанию различных групп углеводородов, а следовательно, обладать различными физико-химическими свойствами. Анализ этих свойств и требований, предъявляемых к сырью технологических процессов, применяемых при дальнейшей переработке выделенных фракций, с учетом необходимого качества или выхода конечного продукта позволил найти наиболее рациональные пути комплексной переработки остатка гидрокрекинга и получить дополнительный экономический эффект.

Выявление закономерностей изменения свойств остатков гидрокрекинга, полученных при переработке вакуумных газойлей западносибирских нефтей по технологии «Юникрекинг» фирмы UOP, от свойств перерабатываемого сырья, а также изучение свойств фракций, выделенных из остатка гидрокрекинга, выступает *целью настоящей работы*.

Исследовательская часть. Свойства и групповой состав сырья – вакуумного газойля и остаточного продукта процесса «Юникрекинг» с глубиной конверсии сырья, равной 70 %, приведены в таблице 1.

Сравнительный анализ свойств сырья и остатка процесса «Юникрекинг» показал, что в результате гидрокрекинга образцов вакуумного газойля и фракционирования полученных продуктов был получен остаток, существенно отличающийся по свойствам и групповому составу от исходного сырья. Так, плотность остатка гидрокрекинга при 20 °С в среднем на 8,6 % ниже, чем плотность вакуумного газойля, и находится в пределах от 835,9 до 842,6 кг/м^3.

Выявлена линейная взаимосвязь между значениями кинематической вязкости (ν, мм^2/с) вакуумного газойля и остатка гидрокрекинга при 40 и 100 °С:

$$\nu_{ОГК}^{40^\circ C} = 0,0919 \cdot \nu_{ВГ}^{40^\circ C} + 14,205, \quad (1)$$

$$\nu_{ОГК}^{100^\circ C} = 0,1988 \cdot \nu_{ВГ}^{100^\circ C} + 2,9449. \quad (2)$$

Квадраты коэффициентов корреляции уравнений (1) и (2) соответственно равны 0,9981 и 0,9998.

Температура начала кипения остатка гидрокрекинга зависит от эффективности работы установки фракционирования получаемых в ходе процесса гидрокрекинга продуктов, поэтому не может быть взаимосвязана с температурой начала кипения вакуумного газойля. Наблюдается снижение температур кипения фракций остатка гидрокрекинга относительно соответствующих фракций вакуумного газойля в интервале выкипания от 5 до 95 %об. При этом разность между температурой кипения остатка гидрокрекинга и вакуумного газойля достаточно точно прогнозируется следующими уравнениями:

при $10 \le x,\ \%об. < 30$

$$t_{кип.ОГК,\ x\%об.} - t_{кип.ВГ,\ x\%об.} = 0,919 \cdot x,\%об. + 0,3 \cdot \rho_{ВГ}^{20^\circ C} + 0,34 \cdot \frac{\rho_{ВГ}^{20^\circ C}}{t_{кип.ВГ,\ x\%об.}} - 0,743 \cdot t_{кип.ВГ,\ x\%об.}; \quad (3)$$

при $30 \le x,\ \%об. \le 90$

$$t_{кип.ОГК,\ x\%об.} - t_{кип.ВГ,\ x\%об.} = 0,021 \cdot x,\%об. - 1,339 \cdot \rho_{ВГ}^{20^\circ C} + 321,233 \cdot \frac{\rho_{ВГ}^{20^\circ C}}{t_{кип.ВГ,x\%об.}} + 1,22 \cdot t_{кип.ВГ,\ x\%об.} \quad (4)$$

Квадраты коэффициента корреляции для уравнений (3) и (4) соответственно равны 0,97 и 0,99. Обозначения и единицы измерений переменных, использованных в уравнениях (3) и (4), приведены в таблице 1.

Таблица 1

Свойства и групповой состав сырья (ВГ) и остатка (ОГК) процесса «Юникрекинг»

Показатель	**Значения для образцов**							
	№ 1		**№ 2**		**№ 3**		**№ 4**	
	ВГ	**ОГК**	**ВГ**	**ОГК**	**ВГ**	**ОГК**	**ВГ**	**ОГК**
Плотность при 20 °С, кг/м^3 ($\rho^{20°C}$)	909,3	835,9	920,1	839,6	922,1	842,6	922,1	840,6
Вязкость кинематическая:								
при 40 °С, мм^2/с ($\nu^{40°C}$)	46,25	18,41	104,97	24,03	115,1	24,79	110,3	24,37
при 100 °С, мм^2/с ($\nu^{100°C}$)	6,28	4,19	9,99	4,93	10,50	5,03	10,25	4,99
Фракционный состав (x, %об.) по ASTM D 1160, °С ($t_{кип,\,x\,\%\,об.}$):								
н.к.	352	350	353	352	370	345	360	344
10 %об.	382	380	413	397	418	386	413	392
20 %об.	398	396	430	407	430	403	426	409
30 %об.	406	402	437	417	443	416	440	419
50 %об.	425	414	459	433	465	436	461	434
70 %об.	445	429	486	457	490	450	487	457
90 %об.	481	458	523	497	524	500	525	497
к.к.	540	521	563	537	557	534	548	534
Содержание насыщенных соединений, %масс.	50,41	98,06	42,2	96,89	41,69	96,24	40,75	96,97
в том числе: н-парафинов	9,7	22,2	9,7	19,2	9,4	19,9	9,3	18,6
парафино-нафтеновых углеводородов	40,71	75,86	32,50	77,69	32,29	76,34	31,45	78,37
Содержание ароматических соединений, %масс.	47,89	1,88	54,61	3,02	55,44	3,70	54,63	2,94
в том числе: I группы	14,69	1,25	20,85	2,37	20,04	3,1	19,54	2,02
II группы	3,76	0,20	4,18	0,65	7,93	0,60	7,62	0,92
III группы	29,44	0,43	20,99	–	17,89	–	20,03	–
IV группы	–	–	8,59	–	9,58	–	8,44	–
Содержание смол, %масс.	1,70	0,06	3,21	0,09	2,87	0,06	3,02	0,09
Содержание серы, %масс.	1,68	0,001	1,65	0,001	1,94	0,002	1,76	0,001
Индекс вязкости	76	135	66	133	63	133	64	134
Индекс BMCI	44,66	11,26	46,43	10,62	47,02	12,20	47,26	11,22
Температура вспышки в открытом тигле, °С	218	204	237	222	234	222	230	218
BMCI – Bureau of Mines Corelation Index – корреляционный индекс горного бюро США.								

Сравнительный анализ температур конца кипения исследуемых образцов показал, что у остатка гидрокрекинга по сравнению с вакуумным газойлем температура конца кипения в среднем ниже на 20 °С.

Различия в свойствах вакуумного газойля и остатка процесса гидрокрекинга свидетельствуют об отличии их группового состава. В остаточном продукте процесса «Юникрекинг» содержится в среднем на 53 % больше насыщенных углеводородов, чем в вакуумном газойле. При этом групповой состав вакуумного газойля не оказывает заметного влияния на групповой состав образующегося остатка гидрокрекинга. Так, при изменении содержания насыщенных углеводородов в вакуумном газойле от 40,75 до 50,41 %масс., то есть почти на 10 %, содержание насыщенных углеводородов в остатке гидрокрекинга изменялось менее чем на 2 %масс. – от 96,24 до 98,06 %масс. В отличие от вакуумного газойля, остаток гидрокрекинга характеризуется низким суммарным содержанием ароматических углеводородов. Следует отметить существенное изменение их распределения по группам. Так, если в вакуумном газойле преобладают ароматические соединения I и III групп с интервалом изменения показателя преломления при 20 °С от 1,49 до 1,53 и от 1,55 до 1,59 соответственно, то в остаточном продукте процесса гидрокрекинга содержатся преимущественно ароматические соединения I группы. Ароматические соединения, входящие в состав вакуумного газойля, в основном представлены алкилпроизводными бензола и нафталина, а так-

же полициклическими соединениями, содержащими до 6 ароматических колец [13; 14]. В остатке процесса «Юникрекинг» ароматические углеводороды представлены главным образом более устойчивыми моноциклическими соединениями, то есть производными бензола.

Благодаря высокому содержанию насыщенных углеводородов остаток гидрокрекинга обладает высоким индексом вязкости и низким значением индекса BMCI, характеризующим степень ароматичности сырья. Так, если у образцов вакуумного газойля индекс вязкости изменялся от 64 до 76 ед., то есть на 12 ед., то у остатка гидрокрекинга изменение этого индекса составило всего 2 ед., при этом его величина возросла до 133…135 ед., в среднем в 2 раза. С ростом индекса вязкости вакуумного газойля степень увеличения индекса вязкости остатка процесса «Юникрекинг» снижается. Разность между индексом вязкости остатка гидрокрекинга и вакуумного газойля имеет линейную зависимость и описывается уравнением (5) с коэффициентом корреляции, равным 0,99:

$$ИВ_{ОГК} - ИВ_{ВГ} = -0,836 \cdot ИВ_{ВГ} + 122,61. \quad (5)$$

Значение индекса BMCI образцов вакуумного газойля относительно получаемого в процессе гидрокрекинга остатка снижается в среднем с 46,3 до 11,3 ед., то есть на 35 ед.

Таким образом, остаток процесса «Юникрекинг» является потенциально пригодным сырьём как для производства гидрокрекинговых базовых масел с ультранизким содержанием соединений серы, так и процесса пиролиза. Исходя из величины индекса BMCI суммарный выход этилена и пропилена в процессе пиролиза остатка гидрокрекинга может составить до 43 %масс. [11]. Остаток процесса «Юникрекинг» характеризуется достаточно широким интервалом выкипания – от 344 до 537 °С (см. табл. 1). Поэтому можно ожидать неравномерное распределение углеводородов различных групп по входящим в его состав фракциям. В связи с этим с целью выявления наиболее благоприятного сырья для процесса пиролиза проведено разделение двух образцов остатка процесса «Юникрекинг» на фракции: н.к.…400 °С; 400…460 °С; 460…к.к. °С, в условиях ASTM D 1160. Результаты изучения свойств образцов остатка гидрокрекинга и выделенных из них фракций приведены в таблице 2.

Таблица 2

Свойства, групповой и структурно-групповой состав образцов остатка процесса «Юникрекинг» и выделенных из них фракций

Показатель	**Значения для образцов**							
	ОГК		**фр. н.к. …400 °С**		**фр. 400…460 °С**		**фр. 460…к.к. °С**	
Номер образца	**№ 1.0**	**№ 2.0**	**№ 1.1**	**№ 2.1**	**№ 1.2**	**№ 2.2**	**№ 1.3**	**№ 2.3**
Плотность при 20 °С, кг/м^3	839,1	836,5	836,0	837,3	839,1	838,4	841,7	841,3
Вязкость кинематическая, мм^2/с:								
при 50 °С	15,6	16,71	8,43	10,13	14,14	14,99	26,61	26,73
при 100 °С	4,644	4,864	2,89	3,34	4,29	4,51	6,92	6,94
Температура застывания, °С	34	–	19	–	30	–	41	–
Фракционный состав по ASTM D 1160, °С:								
н.к.	358	362	352	348	375	370	424	422
10 %об.	395	409	374	376	402	425	462	463
50 %об.	430	440	392	397	425	431	479	478
90 %об.	486	491	409	414	452	443	513	511
к.к.	528	523	419	430	476	452	533	531
Содержание насыщенных соединений, %масс.	96,93	96,91	–	96,71	97,00	96,87	96,81	97,42
в том числе: н-парафинов	18,05	18,86	–	10,8	16,7	19,76	23,00	23,46
парафино-нафтеновых углеводородов	78,88	78,05	–	85,91	80,3	77,11	73,81	73,96
Содержание ароматических соединений, %масс.	2,88	2,91	–	3,23	2,81	2,94	2,99	2,36
в том числе: I группы	1,48	1,57	–	2,28	1,5	1,54	1,26	0,83
II группы	0,12	0,21	–	0,18	0,12	0,21	0,1	0,24
III группы	0,19	0,19	–	0,17	0,1	0,19	0,43	0,23
IV группы	1,09	0,95	–	0,6	1,09	1,0	1,2	1,06

Окончание таблицы 2

Показатель	**Значения для образцов**							
	ОГК		**фр. н.к. …400 °С**		**фр. 400…460 °С**		**фр. 460…к.к. °С**	
Номер образца	**№ 1.0**	**№ 2.0**	**№ 1.1**	**№ 2.1**	**№ 1.2**	**№ 2.2**	**№ 1.3**	**№ 2.3**
Содержание смол, %масс.	0,07	0.06	–	0,06	0,19	0,19	0,2	0,22
Содержание серы, мг/кг	5	5	5	5	4	5	4	5
Показатель преломления n_D^{20}	1,4612	1,4615	1,4682	1,4657	1,4604	1,460	1,4631	1,4636
Структурно-групповой состав: содержание углерода, %масс.								
в алкильных заместителях	75,17	77,48	79,17	76,70	73,36	72,58	76,74	77,38
в нафтеновых кольцах	22,73	19,07	9,25	14,82	24,98	25,56	20,96	19,63
в ароматических кольцах	2,10	3,45	11,58	8,48	1,66	1,86	2,30	2,99
Индекс вязкости	131	130	113	102	130	125	138	139
Индекс BMCI	10,89	8,74	14,10	14,28	11,94	10,95	7,82	7,68
Температура вспышки в открытом тигле, °С	224	217	210	203	238	230	272	268

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что с повышением температуры кипения фракций остатка гидрокрекинга увеличивается их плотность, кинематическая вязкость, температура вспышки и застывания, наблюдается рост содержания парафинов и насыщенных углеводородов. Суммарное содержание ароматических соединений снижается. При этом изменяется распределение содержащихся во фракциях ароматических соединений по группам. Так, фракция н.к. ….400 °С содержит главным образом моноароматические соединения I группы, а фракция 460…к.к. °С – полиароматические соединения IV группы.

Анализ данных, полученных при изучении структурно-группового состава исследуемых образцов, показал, что углерод находится во всех фракциях остатка гидрокрекинга преимущественно в алкильных заместителях от 72,58 до 79,17 %масс. В нафтеновых кольцах содержится от 9,25 до 25,56 %масс. углерода, а в ароматических кольцах – от 1,66 до 11,58 %масс. При этом максимальное содержание углерода в ароматических структурах отмечается во фракции н.к. …400 °С (образцы 1.1 и 2.1), минимальное – во фракции 400…460 °С (образцы 1.2 и 2.2). В то же время в образцах 1.2 и 2.2 отмечено максимальное содержание углерода в нафтеновых кольцах. С повышением температуры кипения фракций остатка процесса «Юникрекинг» наблюдается рост величин их индекса вязкости и снижение индекса BMCI.

В заключение проведенных исследований можно сделать следующие **выводы:**

- остаточный продукт процесса «Юникрекинг» является потенциально пригодным сырьём для производства высокоиндексных гидрокрекинговых базовых масел с ультранизким содержанием соединений серы и может быть использован в качестве сырья для процесса пиролиза;

- наблюдается неравномерное распределение углеводородов различных групп во фракциях остатка гидрокрекинга. С повышением температуры кипения фракций увеличивается содержание парафинов и насыщенных углеводородов, а суммарное содержание ароматических соединений снижается;

- наиболее благоприятным сырьём для получения базовых масел является остаток гидрокрекинга с температурой кипения выше 400 °С;

- в связи с максимальным содержанием насыщенных углеводородов и минимальным значением индекса BMCI наиболее благоприятным сырьём для процесса пиролиза является остаток гидрокрекинга с температурой кипения выше 460 °С. Фракция 400…460 °С и исходный остаток процесса «Юникрекинг» также могут быть использованы в качестве сырья процесса пиролиза. Однако при их переработке ожидается более низкий выход олефинов. Фракционирование остатка процесса «Юникрекинг» позволит получить сырьё для производства базовых масел с заданным диапазоном изменения вязкости и высокими вязкостно-температурными характеристиками, а также повысить качество сырья для процесса пиролиза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новый справочник химика и технолога. Сырьё и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч. 1 / под ред. Ю.В, Покоповой, В.И. Страхова. – СПб.: АНО НПО «Мир и семья», АНО НПО «Профессионал», 2002. – 988 с.
2. Мановян, А.К. Технология переработки природных энергоносителей / А.К. Мановян. – М.: Химия, Колос С, 2004. – 456 с.

3. Hydrocarbon Processing's 2008 Refining Processes Handbook. – 296 p.
4. Основные процессы нефтепереработки: справочник / Р.А. Мейерс [и др.]; пер. с англ. 3-го изд.; под ред. О.Ф. Глаголевой, О.П. Лыкова. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. – 944 с.
5. Ахметов, С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа / С.А. Ахметов. – Уфа: Изд-во «Гилем», 2002. – 672 с.
6. Фамутдинов, Р.Н. Определение качества сырья для высокоиндексных масел из остатка гидрокрекинга / Р.Н. Фамутдинов, С.В. Дезорцев // Башкирский химический журнал. – 2013. – Т. 20, № 4. – С. 37–39.
7. Способ получения веретенного масла, легкого машинного масла и среднего машинного масла из остаточных фракций процесса топливного гидрокрекинга: пат. RU 2 272 068, МПК C10G 67/04 / Ван Бейнум Йохансен (NL), Гекема Арьен Петер (NL), Полдер Кевин Джон Энтони (FR); патентообладатель: Шелл Интернешнл Рисерч Маатсхаппий (NL). – № 2003122356/04; заявл. 18.12.2001; опубл. 20.03.2006 // Бюл. № 8.
8. Integrated hydroprocessing scheme for production of premium quality distillates and lubricants: pat. US 4851109 A, F02B 3/06, C10G 65/12 / Nai Y. Chen, Rene B. LaPierre, Randall D. Partridge, Stephen S. Wong; Mobil Oil Corporation, US 07/192 072; заявл. 09.05.1988; опубл. 25.07.1989.
9. Pyrolysis of high-boiling product fractions from petroleum vacuum distillate hydrocracking / Gustav Sebora [et al.] // Fuel Processing Technology. – 1994. – V. 40. – P. 49–59.
10. A study of industrial pyrolysis of the high-boiling products from hydrocracking of petroleum vacuum distillate / J. Lederer [et al.] // Fuel Processing Technology. – 1994. – V. 73. – № 2. – P. 295–299.
11. Пиролиз углеводородного сырья / Т.Н. Мухина [и др.]. – М.: Химия, 1987. – 240 с.
12. Газификация для получения водорода / M.M. Weiss [et al.] // Нефтегазовые технологии. – 2014. – № 8. – С. 69–74.
13. Химический состав нефтей Западной Сибири / О.А.Бойко [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. – 288 с.
14. Дриацкая, З.В. Нефти СССР (справочник), Т. IV. Нефти Средней Азии, Казахстана, Сибири и о. Сахалин / З.В. Дриацкая, М.Х. Мхчиян, Н.М. Жмыхова. – М.: Химия, 1974 – 792 с.

Поступила 03.08.2015

THE PROPERTIES AND PROMISING AREAS OF PROCESSING RESIDUAL PRODUCT OF THE PROCESS "UNICRACKING"

A. YERMAK, S. POKROVSKAYA, I. BURAYA, E. SYUBAREVA, A. ZAVADSKIY

The directions of complex processing of residual product of of hydrocracking of a petroleum vacuum distillate are considered. Regularities of change of properties of residual product of "Unicracking" process (UOP) depending on properties of the processed raw materials are revealed. Results of the comparative analysis of group structure of raw materials for "Unicracking" process – a vacuum gasoil, and residual product of "Unicracking" process are given. It is shown, that thanks to the high content of saturated hydrocarbons, the above product possesses a high viscosity index and low value of the BMCI index. Regularities of change of properties and distribution of various groups of hydrocarbons on the fractions allocated from residual product of "Unicracking" process are revealed. The possible directions of complex processing of residual product of "Unicracking" process are offered. It is shown, that fractionation of the rest of "Unicracking" process will allow to receive raw materials for production of basic oils with the set range of change of viscosity and high viscosity-temperature characteristics, and also to increase quality of raw materials for pyrolysis process.

УДК 666.971

ВЛИЯНИЕ СУЛЬФАТА НАТРИЯ И СТРОИТЕЛЬНОГО ГИПСА НА ПРОЦЕСС ГАШЕНИЯ ИЗВЕСТИ

канд. биол. наук, доц. И.М. АРЦУКЕВИЧ; канд. физ-мат. наук, доц. О.Б. ЦЕХАН
(Гродненский государственный университет им. Я. Купалы)

Исследуется влияние добавок – сульфата натрия и строительного гипса – на процесс гашения быстрогасящейся извести. Установлено, что важнейшие параметры процесса – максимальная температура и время достижения максимальной температуры – находятся в линейной зависимости от процентного содержания добавок. Рассчитаны уравнения регрессии и коэффициенты корреляции. В соответствии с полученными в работе данными построены математические модели, позволяющие оптимизировать технологические процессы, включающие гашение извести, рассчитать процентные концентрации добавок для достижения нужной максимальной температуры или времени ее достижения. Установлено, что сульфат натрия эффективнее, чем полуводный гипс, влияет на указанные параметры.

На предприятиях строительной отрасли обжигом известняка, добываемого из меловых карьеров, получают продукт белого цвета – комовую известь по схеме: $CaCO_3 + Q = CaO + CO_2\uparrow$. Этот пористый материал состоит главным образом из оксида кальция и частично оксида магния. Вещество это нестабильно. Более стабильным является гидроксид кальция, образующийся при добавлении воды: $CaO + H_2O = Ca(OH)_2$. Это вещество обладает сильными вяжущими свойствами и является одним из самых распространенных строительных материалов. В результате испарения воды гашеная известь твердеет. Мельчайшие частицы $Ca(OH)_2$, сближаясь между собой, образуют кристаллы, которые постепенно превращаются в прочный кристаллический камень, обладающий прочностью и морозостойкостью.

В зависимости от вида сырья и технологии обжига свойства извести CaO могут сильно отличаться. Ключевыми параметрами извести являются максимальная температура гашения и время гашения. В зависимости от времени гашения различают быстрогасящуюся известь (время гашения – до 8 мин), среднегасящуюся (до 25 мин) и медленногасящуюся (свыше 25 мин). Однако высокая химическая активность извести (быстрогасящаяся известь), из-за резкого выделения большого количества тепла гидратации в короткий промежуток времени при ее дальнейшем использовании приводит к образованию рыхлой, малопрочной структуры известкового камня. Это является серьезной проблемой для предприятий, выпускающих продукцию на основе такой извести. Часто для получения камня с высокой прочностью необходимо уменьшить ее химическую активность. В качестве примера можно привести известь, получаемую Филиалом № 5 «Гродненский комбинат строительных материалов» ОАО «Красносельскстройматериалы». Данный продукт подходит для получения силикатного кирпича, но не пригоден в таком виде для производства ячеистого бетона, для которого необходима известь среднегасящаяся.

В современной технологии один из эффективных способов поддержания определенного соотношения температура/время – это введение в воду затворения химических добавок, таких как борная кислота, карбонаты и сульфаты щелочных металлов.

Цель данной работы – изучение кинетики реакции гашения извести, замедленной добавлением в среду затворения сульфата натрия и гипса, а также построение математических моделей в виде зависимостей между параметрами данного процесса и является.

Исследовательская часть. В работе использовалась материалы: известь филиала № 5 «Гродненский комбинат строительных материалов» открытого акционерного общества «Красносельскстройматериалы»; сульфат натрия – марки «ч»; медицинский гипс – полуводный гипс $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$.

Определение температуры и времени гашения извести проводилось в соответствии с ГОСТ 22688-77 (соотношение CaO : вода ≈ 1 : 2) и СТБ ЕН 459-2-2002 (соотношение CaO : вода = 1 : 4).

Взаимодействие воды с известью – первый этап на пути к использованию вяжущих свойств CaO. Вначале изучалась кинетика реакции $CaO + H_2O = Ca(OH)_2 + Q$, а именно исследовалось изменение температуры реакции с течением времени в процессе реакции при соотношении концентраций известь : вода приблизительно 1 : 2 [1]. При смачивании водой известь бурно с ней реагировала, превращаясь в тонкий порошок. Процесс сопровождался резким выделением теплоты, частым «потрескиванием» и «постреливанием» смеси, с образованием «воронок» в местах выбрасываемого пара. Переход воды в пар сопровождался увеличением объема. При этом в зернах извести имели место внутренние растягивающие напряжения, приводящие к их измельчению в тонкий порошок и образованию рыхлой структуры – пушонки.

Как видно из представленных на рисунке 1 данных, полученных по результатам опытов, проводимых в одинаковых условиях, результаты экспериментов несколько отличаются друг от друга. Максимальная температура гашения колеблется от 70 до 75 °С, время достижения максимальной температуры –

от 2,75 до 3,75 мин. По-видимому, это связано с неравномерностью процесса обжига известняка в зоне разложения, что приводит к неоднородности (недожог или пережог) различных порций извести.

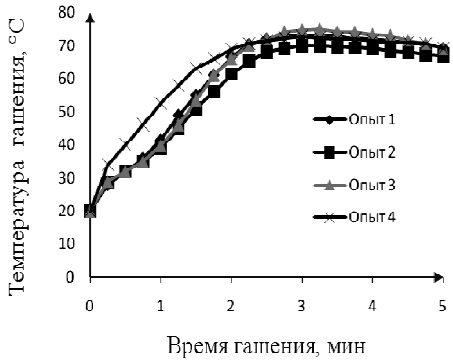


Рис. 1. Изменение температуры в процессе гашения извести
(во всех опытах соотношение CaO : $H_2O \approx 1 : 2$)

Вместе с тем численный анализ представленных данных показывает, что кривые изменения температуры довольно хорошо согласуются с полиномиальной функцией уравнения регрессии 3-й степени.

Модель зависимости температуры гашения от времени, построенная по совокупности данных, полученных в одинаковых условиях, имеет вид:

$$y = 0{,}179t^3 - 5{,}457t^2 + 32{,}32t + 19{,}34, \quad (1)$$

где y – температура гашения извести, °С; t – время, мин.

По критерию Фишера уравнение (1) признается статистически значимым на уровне $\alpha = 0{,}05$ ($F_{факт} = 640 > F_{табл} = 0{,}995$), модель адекватна ($R^2 = 0{,}960$), позволяет описывать динамику температуры и рассчитывать прогнозное значение максимальной температуры при гашении извести без добавок с ошибкой не более 5,6 % (средняя относительная ошибка аппроксимации равна 5,51).

В соответствии с построенной моделью средняя максимальная температура гашения данной партии извести составляла 72,4 °С и достигалась за 3 мин, то есть исследуемый образец является быстрогасящейся известью, что согласуется с экспериментальными данными, представленными на рисунке 1.

С целью анализа скорости изменения температуры в процессе гашения извести рассчитаны первые разности уровней ряда температур по каждому опыту в отдельности (рис. 2).

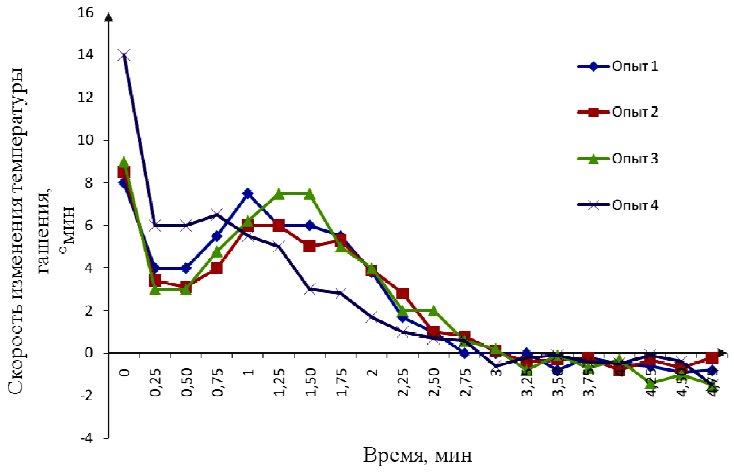


Рис. 2. Динамика скорости изменения температуры в процессе гашения извести без добавок

Из рисунка 2 отчетливо видно, что скорость реакции во всех опытах возрастает периодически, чередуясь с участками замедления реакции. Наибольшая скорость изменения температуры (8…14 °С/мин) в процессе гашения наблюдается в начале опыта. Затем в течение 15 с происходит резкое снижение скорости роста температуры (реакция тормозится) до 3…4 °С/мин. После этого спустя примерно 15 с скорость роста температуры вновь несколько увеличивается, примерно в течение 30…45 с, далее идет плавное снижение скорости роста температуры вплоть до достижения максимальной температуры гашения к

3-й минуте реакции. После этого с незначительной скоростью происходит снижение температуры (скорость становится отрицательной).

Механизм этих этапов реакции изучался неоднократно, особенно электронно-микроскопическими методами [2]. Согласно исследованиям, торможение реакции после бурного ее старта ученые связывают с лавинообразным возникновением зародышей $Ca(OH)_2$, которые, адсорбируясь на поверхности еще не прореагировавших кристаллов CaO, препятствуют проникновению воды в глубину известковых зерен. Кроме того, часть воды вследствие высокой температуры испаряется. Затем, по-видимому, часть кристаллов растворяется, диффузия воды восстанавливается, и реакция вновь продолжается.

Как уже подчеркивалось, при данном кинетическом механизме продуктом реакции является тонкодисперсная известь – пушонка, которая почти не способна в дальнейшем давать высокопластичное тесто. Для получения камня высокой прочности необходимо ликвидировать деструктивное влияние выделяющегося пара за счет уменьшения химической активности извести. Этот вопрос особенно актуален и в технологических процессах получения ячеистых бетонов, при производстве которых в соответствии с требованиями необходимо применять извести со временем гашения 8…15 мин. Ученые решают задачу подбором соединений, способных тормозить данную реакцию. Имеются исследования, в которых в качестве таких химических добавок использовались индивидуальные соединения или смеси борной кислоты, гипса, карбоната натрия, углеводов и др. [2; 3].

В данной работе в качестве замедлителей гашения использовали сульфат натрия Na_2SO_4 и полуводный гипс $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$.

Как видно из представленных на рисунке 3 результатов эксперимента, сульфат натрия в концентрациях 0,1; 0,5; 1; 2 % тормозит реакцию, замедляет ее скорость. Поскольку данная соль хорошо растворима в воде, то проблем равномерно распределить добавку в воде гашения не возникало. Опыты проведены в соотношении известь : вода ≈ 1 : 2 (образование пушонки). Максимальная температура гашения извести снижалась, а время ее достижения увеличивалось.

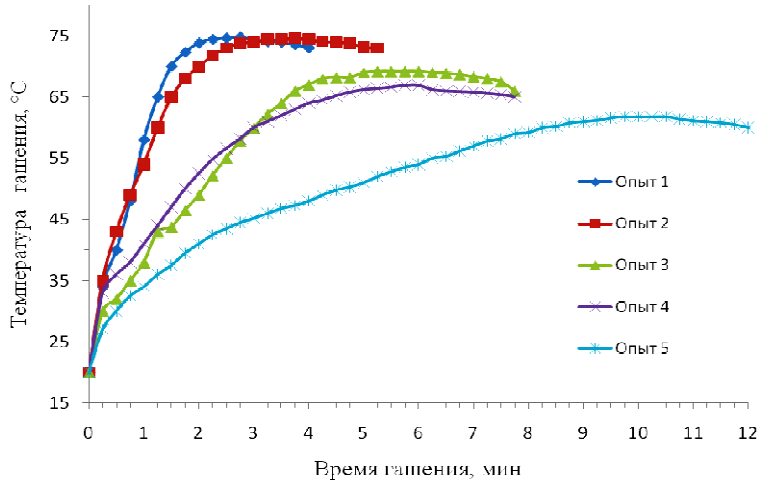


Рис. 3. Изменение температуры гашения извести в присутствии добавки сульфата натрия Na_2SO_4 (содержание добавки в %: 1 (контроль) – 0 %; 2 – 0,1 %; 3 – 0,5 %; 4 – 1 %; 5 – 2 %. Соотношение CaO : вода ≈ 1:2)

По данным о динамике изменения температуры гашения для каждого опыта в отдельности построены соответствующие полиномиальные регрессии. Они, как и в случае без добавок, соответствовали полиному 3-й степени. Модели и их характеристики представлены в таблице.

Модели зависимости температуры гашения от времени при различных концентрациях добавки сульфата натрия

№ опыта	Количество добавки сульфата натрия, Na_2SO_4, %	Вид модели	Коэффициент детерминации R^2	Расчетное значение критерия Фишера	Табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 0,05
1	Контроль	$y = 1{,}652t^3 - 16{,}71t^2 + 53{,}76t + 19{,}46$	0,994	717,88	3,41
2	0,1	$y = 0{,}951t^3 - 11{,}19t^2 + 42{,}31t + 22{,}84$	0,995	1194,00	3,15
3	0,5	$y = 0{,}042t^3 - 1{,}893t^2 + 17{,}71t + 22{,}52$	0,994	1546,22	2,94
4	1	$y = 0{,}135t^3 - 2{,}818t^2 + 18{,}95t + 24{,}81$	0,990	924,00	2,94
5	2	$y = 0{,}014t^3 - 0{,}588t^2 + 7{,}923t + 25{,}67$	0,985	985,00	2,81
y – температура гашения извести, °С; t – время, мин.					

По критерию Фишера все модели из таблицы 1 признаются адекватными ($R^2 > 0{,}900$) и статистически значимыми ($F_{факт} > F_{табл}$) на уровне $\alpha = 0{,}05$.

С целью анализа скорости изменения температуры в процессе гашения извести были рассчитаны первые разности уровней ряда температур по каждому опыту в отдельности (рис. 4).

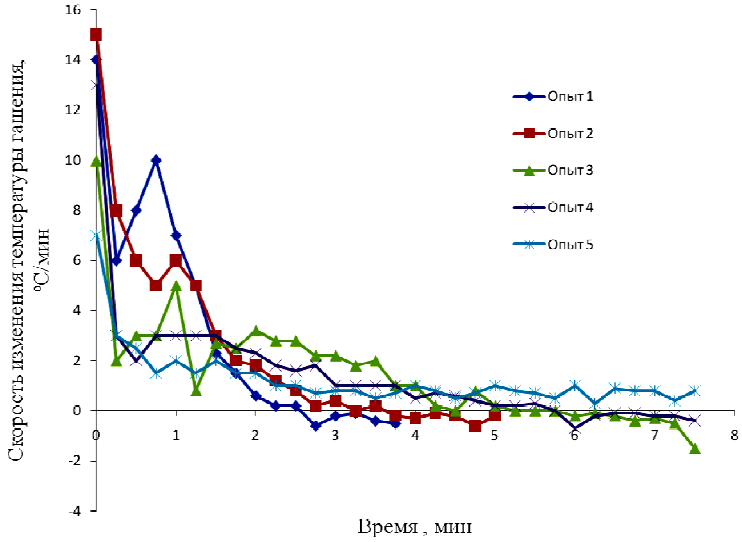


Рис. 4. Динамика скорости изменения температуры
в процессе гашения извести в присутствии добавки сульфата натрия.
Содержание добавки в %: 1 (контроль) – 0 %; 2 – 0,1 %; 3 – 0,5 %; 4 – 1 %; 5 – 2 %.
Соотношение CaO : вода ≈ 1 : 2

Установлено, что характер изменения скорости аналогичен опытам без добавок. Вместе с тем из визуального анализа данных, представленных на рисунке 4, следует, что второй «пик» скорости (после некоторого ее снижения) в опытах с добавками ниже и смещен относительно контрольного опыта вправо, то есть имеет меньшее значение и происходит позже. В отличие от опытов без добавок (см. рис. 2) торможение реакции наблюдается на более длительном интервале времени (примерно до 45 с), увеличение скорости вновь до момента начала ее снижения происходит до 1,5 мин реакции. Все это подтверждает тот факт, что с ростом процентного содержания добавки сульфата натрия происходит усиление торможения реакции.

Далее проанализирована связь между временем достижения максимальной температуры гашения и процентным содержанием добавки. Анализируя влияние добавки сульфата натрия на показатели кинетики гашения извести, на основе графического представления данных (рис. 5) выдвинута гипотеза о линейной зависимости времени достижения максимальной температуры от процентного содержания добавки сульфата натрия. Построена соответствующая модель регрессии (2):

$$T = 3{,}234x + 3{,}121, \qquad (2)$$

где T – время достижения максимальной температуры гашения; x – процентное содержание добавки Na_2SO_4.

Модель признана адекватной ($R^2 = 0{,}969$), точной (средняя относительная ошибка аппроксимации 8,7 %), статистически значимой ($F_{факт} = 94{,}614 > F_{табл} = 0{,}837$) на уровне $\alpha = 0{,}05$.

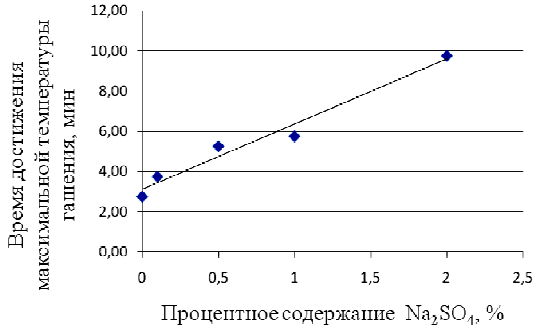


Рис. 5. Зависимость времени достижения максимальной температуры
от процентного содержания сульфата натрия

Таким образом, при увеличении в смеси добавки сульфата натрия на 1 % время T достижения максимальной температуры гашения извести увеличится в среднем на 3,23 мин.

Далее были проанализированы зависимости величины максимальной температуры от процентного содержания сульфата натрия и величины максимальной температуры от времени достижения максимума температуры.

Построены соответствующие модели регрессии. Для зависимости величины максимальной температуры гашения извести от процентного содержания сульфата натрия имеем:

$$Y = -6,557x + 74,18,$$

где Y – максимальная температура гашения; x – процентное содержание добавки Na_2SO_4.

Модель признана адекватной (R^2 = 0,954), точной (средняя относительная ошибка аппроксимации составляет 1,4 %), статистически значимой ($F_{факт}$ = 62,604 > $F_{табл}$ = 0,952) на уровне α = 0,05.

Для зависимости величины максимальной температуры гашения извести в присутствии сульфата натрия от времени достижения максимума температуры получили

$$Y = -1,972T + 80,21,$$

где Y – максимальная температура гашения; T – время достижения максимальной температуры гашения.

Модель признана адекватной (R^2 = 0,932), точной (средняя относительная ошибка аппроксимации 1,52 %), статистически значимой ($F_{факт}$ = 41,120 > $F_{табл}$ = 10,130) на уровне α = 0,05.

Таким образом, при увеличении в смеси добавки сульфата натрия на 1 % максимальная температура гашения извести уменьшается в среднем на 6,56 °С. При увеличении времени достижения максимальной температуры гашения извести в присутствии добавки сульфата натрия на 1 % максимальная температура гашения извести уменьшается в среднем на 1,97 °С.

Во второй серии опытов исследовалось влияние на процесс гашения извести другой неорганической добавки – полуводного гипса $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$. Работа с данным соединением имела свои особенности, связанные с тем, что гипс малорастворим в воде. По этой причине, он добавлялся не в воду, а в известь, и смесь тщательно перемешивалась. Однако эксперименты при соотношении CaO : вода ≈ 1 : 2 не дали достоверных результатов. Изменения температуры в смеси носили локальный, а поэтому недостоверный характер. «Потрескивание» и «постреливание» смеси было еще более интенсивным, чем в контрольной смеси без гипса. В связи с этим для сравнения данное исследование проводили при разных соотношениях CaO : вода (1 : 2 и 1 : 4). В первом случае образуется пушонка, а во втором – известковое тесто (СТБ ЕН 459-2-2002). Увеличение количества воды позволило более равномерно распределить добавку в смеси, однако и в этом случае трудности полностью преодолены не были. Результаты опытов представлены на рисунке 6.

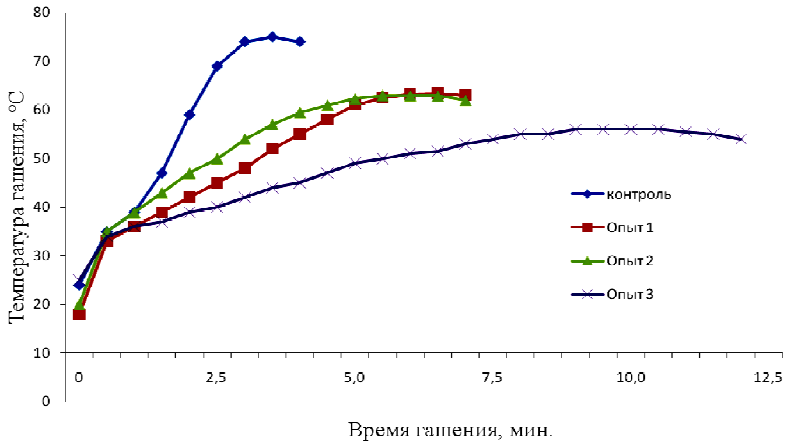


Рис. 6. Изменение температуры в процессе гашения извести
в присутствии добавки полуводного гипса $CaSO_4 \cdot 0,5H_20$.
Содержание добавки в %: контроль – 0 %; 1 – 1 %; 2 – 2 %; 3 – 5 %.
Соотношение CaO : вода = 1 : 2

Из графиков видно, что полуводный гипс, как и сульфат натрия, также замедляет реакцию гашения, что согласуется с имеющимися данными [4; 5]. По мере увеличения процентной концентрации $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ в среднем максимальная температура гашения снижалась, и время гашения – увеличивалось.

На основе предварительного анализа данных выдвинута гипотеза о линейной зависимости времени достижения максимальной температуры от процентного содержания добавки полуводного гипса.

Построена также соответствующая модель регрессии (3):

$$T = 0,964x + 4,196, \quad (3)$$

где T – время достижения максимальной температуры гашения; x – процентное содержание добавки $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$.

Установлено, что модель является точной (средняя относительная ошибка аппроксимации 10,8 %), статистически значимой ($F_{факт} = 9,752 > F_{табл} = 8,526$) на уровне $\alpha = 0,05$. Адекватность модели несколько ниже, чем в случае с сульфатом натрия (коэффициент детерминации $R^2 = 0,829$). Причины данного явления обсуждались выше.

Существует несколько версий, объясняющих эффект торможения данной реакции сульфатами. Kulisek K. и Bures J. выдвигают предположение [6], что добавка замедлителей в систему, в том числе и наличие сульфат-ионов, ограничивают рост кристаллов, портландита затрудняют образование центров кристаллизации и рост кристаллов $Ca(OH)_2$, что влияет на весь механизм гидратации. При этом образуется известковая суспензия мелкозернистого вида с малым количеством пластинчатых кристаллов. Замедление скорости гидратации при добавках 2…5 % гипса по массе извести объясняется также образованием пленок сульфата кальция на поверхности еще не прореагировавших частичек оксида кальция. При этом площадь активной поверхности извести уменьшается, и процесс гашения затягивается. Меняются условия кристаллизации $Ca(OH)_2$. Более медленная кристаллизация гидроксида кальция из пересыщенного раствора извести улучшает качество производимых изделий.

Тот факт, что именно сульфат-ион является решающим в механизме торможения данной реакции, показано в опытах с хлоридами Na^+ и Ca^{2+} [5]. Их добавление в смесь гашения приводило не к торможению, а, наоборот, к ускорению достижения максимальной температуры реакции. В то же время, как видно из данной работы, вид катиона также оказывает определенное влияние на реакцию. Сравнивая формулы моделей регрессии (2) и (3), можно сделать вывод, что Na_2SO_4 эффективнее тормозит гашение извести, чем аналогичная соль кальция (увеличение на 1 % в смеси гашения сульфата Na сдвигало время достижения максимальной температуры на 3,23 мин, а в случае сульфата Ca – на 0,96 мин).

Известно, что внесение подобных добавок положительно сказывается на свойствах изделий, полученных при замедлении сроков схватывания: увеличивается прочность изделий, их пластичность. Таким образом, детальное изучение влияния добавок является важным с точки зрения практической деятельности предприятий, так как в ряде случаев их применение позволяет использовать в производстве ту известь, которая считалась ранее непригодной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Известь строительная. Методы испытаний. Пункт 2.9. Определение температуры и времени гашения извести: ГОСТ 22688-77. – Введ. 01.01.1979. – М.: Госстандарт комитета Сомина по строительству, 1977. – 19 с.
2. Шпынова, Л.Г. Исследование свойств извести / Л.Г. Шпынова, С.К. Мельник, Я.Б. Якименко // Строительные материалы. – 1985. – № 6. – С. 26–27.
3. Косенко, И.Ф. Исследование процесса замедления гидратации извести / И.Ф. Косенко, В.В. Макаров // Химия и химическая технология. – 2007. – Вып. 9. – С. 101–103.
4. Process for influencing the slaking velocity of quicklime and its utilisation: Pat. DE, МПК7С04В28/10 / T. Koslowski; Sicowa Verfahrenstechnik Fuer Baustoffe GMBH & CO KG. – № 3438620, (22 October 1984).
5. Mohamad Hassibi / An Overview Of Lime Slaking And Factors That Affect The Process. Presentation to 3rd International Sorbalit Symposium, 1999 3 RD November 3–5, 1999 New Orleans, LA USA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://carmeusena.com/sites/default/files/ctools/tr-chemco-overview-lime-slaking_0.pdf. – Дата доступа: 12.07.2015.
6. Kulisek, K. Problematika vapen v technologii vyroby porobetonu / K. Kulisek, J. Bures // Stavivo. – 1985. – Vol. 63, № 12. – С. 503–506.

Поступила 28.07.2015

THE INFLUENCE OF SODIUM SULPHATE AND GYPSUM PLASTER ON THE PROCESS OF LIME SLAKING

I. ARTSUKEVICH, V. TSEKHAN

The influence of the chemicals – sodium sulphate and gypsum plaster – on the process of lime slaking has been researched. It has been discovered that the most significant parameters of the process – max temperature and time it takes to reach this temperature – depend on the concentration of the above of certain chemicals. The regression analysis has been performed and the correlation coefficients have been calculated. Based on this information, the mathematical models which allow calculating the concentration of the above certain chemicals for the optimization of the technological process have been calculated. It has been established that the sodium sulphate is more effective than the gypsum plaster.

УДК 665.658

ИЗМЕНЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНОГО СОСТАВА БЕНЗИНА КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА MSCC В РЕЗУЛЬТАТЕ ЕГО ГИДРООБЛАГОРАЖИВАНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ PRIME G+

канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК; О.Г. БУГАЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены закономерности распределения соединений серы и углеводородов по фракциям бензина каталитического крекинга. Сделан вывод о необходимости проведения очистки бензина каталитического крекинга перед его использованием в качестве компонента товарного бензина. Рассмотрена сущность современных технологий гидрооблагораживания бензина каталитического крекинга. Установлены закономерности изменения свойств бензина каталитического крекинга MSCC (UOP) до и после его гидрооблагораживания по технологии Prime G+ (Axens); выявлены особенности изменения углеводородного состава бензина каталитического крекинга в результате его гидрооблагораживания по технологии Prime G+. Изучен углеводородный состав легкого и тяжелого бензинов, полученных в процессе гидрооблагораживания бензина каталитического крекинга по технологии Prime G+. Выявлены причины снижения октанового числа бензина каталитического крекинга MSCC в процессе его гидрооблагораживания по технологии Prime G+.

Введение. На современных нефтеперерабатывающих заводах каталитический крекинг – один из крупнотоннажных процессов глубокой переработки нефти, позволяющий дополнительно получать от 15 до 20 %масс. в расчете на нефть высокооктанового компонента автомобильных бензинов. К основным достоинствам процесса следует отнести возможность перерабатывать различное тяжелое сырьё – вакуумные газойли, прямогонные мазуты и даже гудрон. В зависимости от используемого сырья, применяемой технологии и режима выход высокооктанового компонента бензина с октановым числом 90 пунктов и более на современных установках каталитического крекинга составляет от 50 до 65 %масс. [1; 2].

Однако бензин каталитического крекинга имеет существенный недостаток – высокое содержание соединений серы, что не позволяет его без предварительной очистки использовать в качестве компонента современных автомобильных бензинов, отвечающих современным экологическим классам К4 и К5 согласно Техническому регламенту Таможенного союза ТР ТС 013/2011, ограничивающему содержание серы в товарном бензине не более 50 и 10 мг/кг соответственно, а также требованиям СТБ 1656-2011, EN 228:2008 и пр. Существует два основных подхода к снижению содержания серы в бензине каталитического крекинга, которые заключаются либо в предварительной подготовке сырья, либо в удалении серы из уже полученного бензина. На современных нефтеперерабатывающих заводах довольно часто используется процесс гидроочистки сырья каталитического крекинга, в частности вакуумного газойля. Однако, как показывает опыт, данный подход не позволяет снизить содержание серы в получаемом бензине до необходимого уровня. Кроме того, если в сырьё каталитического крекинга вовлекаются нефтяные остатки, их подготовка к переработке требует существенных материальных затрат и недостаточно эффективна [2; 3].

С учетом вышесказанного, для получения товарного бензина, отвечающего современным экологическим требованиям, вовлекаемый в его состав бензин каталитического крекинга необходимо подвергать дополнительной очистке.

Одним из наиболее распространенных методов очистки нефтяных фракций от гетероатомных соединений, в частности серы, является процесс гидроочистки. Однако использовать традиционную технологию гидроочистки для удаления серы из бензинов каталитического крекинга невозможно, так как это неизбежно приведет к существенному снижению их антидетонационных характеристик в связи с гидрированием находящихся в их составе олефинов, имеющих более высокие октановые числа, чем соответствующие парафины.

Углеводородный состав бензинов каталитического крекинга, а также тип и количество содержащихся в них соединений серы в зависимости от применяемой технологии каталитического крекинга и используемого сырья могут существенно различаться. Однако существуют закономерности их распределения по фракциям бензина каталитического крекинга. В частности, легкие фракции содержат преимущественно меркаптановую серу, а в тяжелых фракциях сера находится в основном в виде тиофеновых соединений и их производных. Углеводороды также неравномерно распределены по фракциям бензина каталитического крекинга. Ароматические соединения сконцентрированы в тяжелых фракциях, тогда как более легкие фракции содержат главным образом олефины [2]. Таким образом, гидроочистка легких бензиновых фракций приведет к существенному снижению их октанового числа за счет гидрирования олефинов.

Учитывая вышесказанное, был разработан ряд технологий гидрооблагораживания бензинов каталитического крекинга [2; 4–6], общей особенностью которых является промежуточное фракционирование реакционной смеси после стадии селективного гидрирования с целью выделения высокооктанового легкого бензина, очищенного от соединений серы и содержащего большое количество олефинов. Тяжелый бензин после фракционирования направляется на стадию гидрообессеривания и после стабилизации и смешивания с легким бензином используется в качестве компонента товарного бензина.

Благодаря специальному катализатору и технологическому режиму работы реактора на стадии селективного гидрирования бензина каталитического крекинга происходит превращение содержащихся в нем легких меркаптанов и частично сульфидов в более тяжелые сульфиды и дисульфиды, изомеризация олефинов (перемещение двойной связи к центру молекулы) и гидрирование диеновых углеводородов. Выделенный во фракционирующей колонне (сплиттере) тяжелый бензин поступает на стадию гидрообессеривания, где осуществляется окончательная его очистка от соединений серы при минимальном насыщении содержащихся в тяжелом бензине олефинов.

Одной из наиболее совершенных технологий гидрооблагораживания бензинов каталитического крекинга выступает технология Prime G+ фирмы Axens (Франция) [6]. Особенность данной технологии состоит в использовании двойной каталитической системы на стадии гидрообессеривания. Данный подход является принципиальным условием для получения продукта с низким содержанием серы при сведении к минимуму реакций насыщения олефинов и при максимальном сохранении октанового числа. Однако технология Prime G+ не позволяет полностью исключить потерю октанового числа бензина каталитического крекинга в процессе его гидрооблагораживания.

Цель представляемой работы – изучение изменения углеводородного состава бензина каталитического крекинга в результате его гидрооблагораживания по технологии Prime G+, а также выявление причин снижения октанового числа бензина каталитическогоо крекинга в процессе гидрооблагораживания.

Исследовательская часть. В качестве объекта исследований выбран бензин установки каталитического крекинга по технологии Миллисеконд (MSCC – Millisecond Catalytic Cracking) фирмы UOP после очистки на секции «Merox» и стабильный бензин процесса Prime G+ фирмы Axens.

Диапазоны изменения свойств сырья – бензина каталитического крекинга MSCC после очистки на секции «Merox» – и продукта установки Prime G+ приведены в таблице 1. Содержание легкого бензина в продукте установки Prime G+ находилось в пределах (7,7 ± 0,2) %масс.

Таблица 1

Свойства сырья и продукта процесса Prime G+

Показатель	Сырьё – бензин каталитического крекинга MSCC после очистки на секции «Merox»	Продукт – смесь легкого и тяжелого бензина после установки Prime G+
Содержание общей серы, мг/кг	190...410	9...17
Содержание меркаптановой серы, мг/кг	10...55	5...9
Октановое число:		
– по исследовательскому методу (ИОЧ)	93,7...94,4	91,3...92,3
– по моторному методу (МОЧ)	81,2...82,0	80,3...81,7
Фракционный состав:		
– температура начала кипения, °С	32...38	36...41
– 10 %об. перегоняется при температуре, °С	50...53	53...57
– 50 %об. перегоняется при температуре, °С	94...102	100...108
– 90 %об. перегоняется при температуре, °С	176...190	177...184
– конец кипения, °С	193...210	203...210
Плотность при 15 °С, кг/м^3	739,0...747,9	738,7...749,1

В процессе гидрооблагораживания бензина каталитического крекинга по технологии Prime G+ имеют место следующие изменения его основных свойств:

- снижение содержания общей и меркаптановой серы в среднем на 290 и 33 мг/кг соответственно. При этом глубина обессеривания по общей сере составила в среднем 95,5 %масс., а по меркаптановой – от 73 до 84 %масс. Учитывая то, что легкий бензин процесса Prime G+ содержит от 7 до 15 мг/кг меркаптановой серы, то есть его вклад в общее содержание серы в продуктовом бензине на превышает 1,2 мг/кг, основное количество соединений серы в товарный продукт поступает с тяжелым бензином;

- снижение октанового числа как по исследовательскому, так и моторному методу. Потеря октанового числа по исследовательскому методу составляет от 1,8 до 2,4 пункта, по моторному методу – от 0,1 до 0,7 пункта;

- незначительное утяжеление фракционного состава бензина каталитического крекинга в процессе гидрооблагораживания, что может быть связано как с изменением химического состава бензина в процессе гидрооблагораживания, так и особенностями работы установки – до 10 %масс. от легкого бензина, входящего в состав сырья, отводится с установки в качестве самостоятельного продукта. Подтверждением вышесказанному является незначительное повышение плотности смеси легкого и тяжелого бензина с установки Prime G+ по сравнению с поступающим на гидрооблагораживание сырьём.

Связь между структурой углеводородов и их антидетонационными свойствами установлена достаточно давно [7]. Известно, что октановые числа бензинов зависят от их химического состава. Наиболее высоким октановым числом обладают ароматические углеводороды; наиболее низким – н-алканы с числом углеродных атомов более пяти. У разветвленных алканов детонационная стойкость значительно выше, чем у алканов нормального строения. При этом октановые числа возрастают у изомеров с увеличением количества метильных групп в молекуле и их парным расположением у одного углеродного атома. Октановые числа олефинов выше, чем у соответствующих алканов. При этом приближение двойной связи к центру молекулы способствует увеличению октанового числа. Олефины с разветвленной цепью обладают более высокими октановыми числами по сравнению с олефинами нормального строения. Среди циклоалканов наиболее высокие октановые числа у циклопентана и метилциклопентана. Циклоалканы с боковыми цепями нормального строения имеют низкие октановые числа, причем с удлинением цепи их детонационная стойкость значительно снижается. Разветвление боковых цепей и увеличение их числа способствует повышению октанового числа [8; 9].

Результаты хроматографического анализа сырья и продукта, в том числе входящих в его состав легких и тяжелых бензинов, установки гидрооблагораживания бензина каталитического крекинга по технологии Prime G+ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Содержание углеводородов различных групп в сырье, продукте, легком и тяжелом бензине процесса Prime G+, и их октановые числа

Компонент	Содержание, %масс.		Изменение, %масс.	Содержание, %масс.		Октановые числа [9; 10]	
	в сырье	в продукте		в легком бензине	в тяжелом бензине	ИОЧ	МОЧ
Н-алканы:	**4,059**	**4,869**	**0,810**	**5,117**	**3,103**	**–**	**–**
– н-бутан	0,394	0,281	–0,113	1,416	0,001	93,6	91,0
– н-пентан	1,118	1,108	–0,010	3,294	0,023	61,7	61,9
– н-гексан	0,901	1,184	0,283	0,407	0,784	24,8	26,0
– н-гептан	0,599	0,867	0,268	–	0,924	0,0	0,0
– н-октан	0,381	0,563	0,182	–	0,581	– 15,0	– 20,0
– н-нонан	0,196	0,286	0,090	–	0,237	– 20,0	– 20,0
– н-декан	0,148	0,257	0,109	–	0,237	– 30,0	– 30,0
– н-ундекан	0,129	0,175	0,046	–	0,154	– 35,0	– 35,0
– н-додекан	0,177	0,083	–0,094	–	0,109	– 40,0	– 40,0
– н-тридекан	0,016	0,065	0,049	–	0,053	–	–
Изоалканы:	**27,748**	**34,610**	**6,862**	**46,434**	**27,722**	**–**	**–**
– изобутан	0,089	0,026	–0,063	0,306	–	101,1	99,0
– изо-C_5	8,722	10,671	1,949	38,314	0,044	–	–
в том числе:							
изопентан	8,722	10,661	1,939	38,288	0,044	92,3	90,3
2,2-диметилпропан	0,000	0,010	0,010	0,026	–	85,5	83,0
– изо-C_6	7,564	7,465	–0,099	7,717	6,105	–	–
в том числе:							
2,2-диметилбутан	0,089	0,022	– 0,067	0,043	0,093	91,8	93,4
2,3-диметилбутан	1,233	1,048	– 0,185	1,312	0,102	101,7	94,3
метилпентаны	6,242	6,395	0,153	6,360	5,279	74,4...75,5	74,9...76,0
– изо-C_7	4,415	4,487	0,072	0,097	5,453	–	–
в том числе:							
метилгексаны	3,073	3,320	0,274	0,003	3,850	42,4...52,0	46,4...55,0
диметилпентаны	1,036	0,930	–0,106	0,094	1,215	80,8...92,8	83,8...95,6
2,2,3-триметилбутан	0,035	0,017	–0,018	0,000	0,021	112,1	101,1
– изо-C_8	3,257	3,632	0,375	–	4,547	–	–
в том числе:							
метилгептаны	1,999	1,892	–0,107	–	2,008	21,7...26,7	23,8...39,0
диметилгексаны	0,876	0,733	–0,143	–	0,939	55,5...76,3	55,7...83,4
триметилпентаны	0,217	0,583	0,366	–	0,766	100...109,6	95,9...100,0

Окончание таблицы 2

Компонент	Содержание, %масс.		Изменение, %масс.	Содержание, %масс.		Октановые числа [9; 10]	
	в сырье	в продукте		в легком бензине	в тяжелом бензине	ИОЧ	МОЧ
– изо-C_9	2,279	2,220	–0,059	–	3,194	64,0...100,0	41,0...93,0
– изо-C_{10}	0,880	1,939	1,059	–	3,296	35,0...45,0	35,0...45,0
– изо-C_{11}	0,162	1,022	0,860	–	1,115	5,0 – 10,0	5,0 –10,0
– изо-C_{12}	0,380	1,632	1,252	–	1,954	–	–
– изо-C_{13}	–	1,416	1,416	–	1,940	–	–
– изо-C_{14}	–	0,100	0,100	–	0,074	–	–
Циклоалканы:	**7,661**	**8,486**	**0,825**	**0,863**	**11,220**	**–**	**–**
– циклопентан	–	0,108	0,108	0,305	0,052	100,0	84,0
– C_6	1,631	1,747	0,116	0,558	1,985	–	–
в том числе:							
метилциклопентан	1,488	1,632	0,144	0,555	1,854	91,3	80,0
циклогексан	0,143	0,115	–0,028	0,003	0,131	83,0	77,2
– C_7	2,091	2,47	0,379	–	3,199	67,2...74,8	61,2...71,1
– C_8	2,049	2,375	0,326	–	3,554	33,4...80,9	28,2...78,6
– C_9	1,075	1,450	0,375	–	2,093	35,0...81,3	30,0...82,6
– C_{10}	0,646	0,304	–0,342	–	0,310	–	–
– C_{11}	0,169	0,032	–0,137	–	0,027	–	–
Арены	**31,417**	**29,852**	**– 1,565**	**0,385**	**37,767**	**–**	**–**
– бензол	1,093	0,936	–0,157	0,385	1,236	113,0	111,6
– толуол	4,006	4,092	0,086	–	5,666	115,7	102,1
– C_8	7,555	7,705	0,150	–	9,981	106,0…115,0	97,9...111,0
– C_9	5,185	5,280	0,095	–	6,143	105,1…110,0	98,7...101,0
– C_{10}	9,164	9,260	0,096	–	11,675	109,0	98,0
– C_{11}	2,899	0,937	–1,962	–	0,996	105,0	94,0
– C_{12}	1,515	1,642	0,127	–	2,070	102,0	90,0
Олефины	**25,504**	**21,345**	**– 4,159**	**47,201**	**19,367**	**–**	**–**
– C_4	2,428	1,289	– 1,139	8,016	0,001	–	–
в том числе:							
бутен-1	0,384	0,136	– 0,248	1,214	0,001	97,4	81,7
бутен-2	2,044	1,153	– 0,891	6,802	0,000	99,6	86,5
– C_5	11,543	8,634	– 2,909	33,659	0,403	90,9...101,3	69,7...84,7
– C_6	7,172	5,456	– 1,716	4,825	8,468	76,4…95,0	63,4...80,8
– C_7	2,637	3,506	0,869	0,701	6,721	90,0...99,3	78,0...84,3
– C_8	0,809	1,603	0,794	–	2,343	90,0...102,9	77,0...88,6
– C_9	0,772	0,574	– 0,198	–	1,027	–	–
– C_{10}	0,037	0,093	0,056	–	0,163	–	–
– C_{11}	0,056	0,073	0,017	–	0,081	–	–
– C_{12}	0,018	0,092	0,074	–	0,136	–	–
– C_{13}	0,032	0,025	– 0,007	–	0,024	–	–
Неидентифицированные соединения	3,611	0,838	–	–	0,821	–	–
Итого	**100**	**100**	**–**	**100**	**100**	–	–

В результате хроматографического анализа сырья и продукта (смеси легкого и тяжелого бензина) установки гидрооблагораживания бензина по технологии Primr G+ установлено, что углеводороды различных групп по мере убывания их содержания в исследуемых образцах располагаются в следующей последовательности: арены > изоалканы > олефины > циклоалканы > алканы нормального строения.

Анализ изменения углеводородного состава бензина каталитического крекинга в процессе его гидрооблагораживания по технологии Primr G+ позволил выявить следующие закономерности:

- процесс гидрооблагораживания бензина приводит к росту содержания в нем алканов нормального и изостроения. Содержание н-алканов в сырье и продуктах процесса невелико, в связи с чем незначительный рост содержания в продуктах низкооктановых углеводородов, преимущественно пентана, гексана и гептана, не может оказывать существенного влияния на снижение детонационной стойкости бензина. Рост содержания изоалканов в процессе гидрооблагораживания бензина каталитического крекинга более значителен и приводит к увеличению содержания в нем главным образом высокомолекулярных низкооктановых углеводородов – от изо-C_{10} до изо-C_{13}. Из высокооктановых компонентов изостроения в

продукте увеличивается содержание только изопентана и триметилпентанов. При этом содержание обладающих высокой детонационной стойкостью диметил- и триметилбутанов снижается. Изопентан входит в состав легкого бензина, улучшая его антидетонационные свойства. Изоалканы, входящие в состав тяжелого бензина, имеют преимущественно низкие октановые числа;

- процесс гидрооблагораживания бензина каталитического крекинга приводит к незначительному росту содержания в нем циклоалканов. При этом циклоалканы с высоким октановым числом – циклопентан и метилциклопентан – входят в состав легкого бензина. В тяжелом бензине циклоалканы представлены в основном низкооктановыми соединениями, содержащими от 7 до 9 атомов углерода;

- суммарное содержание алициклических и циклических алканов в легком бензине составляет 52,4 %масс., которые на 80,5 % состоят из углеводородов с высокими октановыми числами. В тяжелом бензине суммарное содержание алканов достигает 42 %масс., из которых около 93 % имеют низкие антидетонационные характеристики;

- процесс гидрооблагораживания бензина каталитического крекинга сопровождается незначительным снижением содержания ароматических углеводородов (аренов) за счет уменьшения содержания бензола и аренов C_{11}. В состав легкого бензина входит только бензол, содержание которого невелико и составляет около 0,4 %масс. Тяжелый бензин содержит около 38 %масс. аренов;

- процесс гидрооблагораживания бензина каталитического крекинга сопровождается снижением содержания в нем легких олефинов, обладающих высокими октановыми числами. При этом основное количество олефинов входит в состав легкого бензина, обеспечивая его высокие антидетонационные свойства. Следует отметить увеличение в продукте процесса Prime G+ по сравнению с сырьём отношения бутен-2 к бутену-1, что свидетельствует о протекании реакций изомеризации олефинов. Так, отношение бутен-2 к бутену-1 в сырье и продукте равны соответственно 5,32 и 8,48, то есть возрастает более чем на 37 %. Бутены содержатся в легком бензине. Следовательно, их изомеризация и частичное гидрирование происходит в реакторе секции селективного гидрирования;

- на стадии гидрообессеривания тяжелого бензина каталитического крекинга наблюдается увеличение содержания в нем тяжелых олефинов, что, вероятно, связано с особенностью химических превращений, протекающих во втором реакторе секции гидрообессеривания, благодаря технологическому режиму его работы – повышенной температуре и пониженному давлению относительно первого реактора секции гидрообессеривания – и используемому катализатору;

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие **выводы:**

- в процессе гидрооблагораживания бензина каталитического крекинга MSCC по технологии Prime G+ глубина обессеривания по общей сере составляет в среднем 95,5 %масс., а по меркаптановой сере от 73 до 84 %масс.;

- гидрооблагораживание бензина приводит к снижению его октанового числа как по исследовательскому, так и моторному методу;

- наибольшей антидетонационной стойкостью обладает легкий бензин, отбираемый из фракционирующей колонны (сплиттера) секции селективного гидрирования, содержащий в своем составе около 84 %масс. углеводородов с октановым числом по исследовательскому методу более 92 пунктов. Основными компонентами легкого бензина являются изопентан и олефины – бутены и пентены. К недостаткам легкого бензина следует отнести высокое содержание в нем более 47 %масс. олефинов, что ограничивает его использование в качестве компонента товарных бензинов, отвечающих требованиям экологических классов К4 и К5 согласно Техническому регламенту Таможенного союза ТР ТС 013/2011, ограничивающему содержание олефинов в товарном бензине не более 18 %об.;

- тяжелый бензин, получаемый после секции гидрообессеривания, содержит по сравнению с легким бензином значительно меньшее количество высокооктановых компонентов – около 57 %масс., в состав которых входят ароматические соединения и олефины C_6+.

Причиной снижения октанового числа бензина каталитического крекинга после установки гидрооблагораживания по технологии Prime G+ является увеличение содержания в тяжелом бензине низкооктановых алканов, образующихся при гидрировании соответствующих олефинов, а также то, что до 10 %масс. лёгкого бензина, отбираемого из фракционирующей колонны (сплиттера) секции селективного гидрирования, отводится с установки в качестве самостоятельного продукта и не входит в состав основного продукта установки, которым является гидрооблагороженный бензин, представляющий собой смесь легкого бензина с секции селективного гидрирования и тяжелого бензина с секции гидрообессеривания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роль процесса каталитического крекинга в производстве высокооктановых автомобильных бензинов / Р.А. Шарипов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http//www.science-education.ru/121-18061. – Дата доступа: 28.07.2015.

2. Основные процессы нефтепереработки: справочник / Р.А. Мейерс [и др.]; пер. с англ. 3-го изд.; под ред. О.Ф. Глаголевой, О.П. Лыкова. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. – 944 с.
3. Особенности пуска комбинированной установки каталитического крекинга по технологии MSCC UOP / В.Г. Баран [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2004. – № 11. – С. 14–17.
4. Syed Ahmed Ali, Nadhir A. Al-Baghli. Overview of FCC Gasoline Post-Treating Technologies // 14th Annual Saudi-Japanese Symposium: Catalysts in Petroleum Refining and Petrochemicals, 2004.
5. Yankov, V. Integration of the processes FCC feed hydrotreatment and FCC gasoline posttreatment through the Prime G process – opportunity for production of EURO V gasolines at increased profitability / Vassil Yankov, Dicho Stratiev, Atanas Yalamov // 45th International Petroleum Conference, June 13, 2011, Bratislava, Slovak Republic. – 17 p.
6. Hydrocarbon Processing's Refining Processes 2006 Handbook. – 222 p.
7. Саханен, А.Н. Переработка нефти. Термические и каталитические процессы производства моторных топлив / А.Н. Саханен. – М.-Л.: Гостоптехиздат, 1947. – 429 с.
8. Поконова, Ю.В. Нефть и нефтепродукты: справочник. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2003. – 528 с.
9. Гуреев, А.А. Применение автомобильных бензинов / А.А. Гуреев. – М.: Химия, 1972. – 368 с.
10. Разработка базы данных по октановым числам для математической модели процесса компаундирования товарных бензинов / Ю.А. Смышляева [и др.] // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2011. – Т. 318, № 3. – С. 75–80.

Поступила 03.08.2015

THE CHANGE IN HYDROCARBON COMPOSITION OF GASOLINE CATALYTIC CRACKING MSCC AS A RESULT OF HIS POSTTREATMENT THROUGH THE PRIME G+ PROCESS

A. YERMAK, O. BUGAEVICH

Regularities of distribution of sulfur compounds and hydrocarbons on fractions of catalytic cracking gasoline are considered. Need of carrying out purification of gasoline of catalytic cracking before its use as a component of commercial gasoline is shown. The essence of modern technologies of a hydrotreating of catalytic cracking gasoline is considered. Consistent patterns of change of properties of catalytic cracking gasoline of MSCC process (UOP) before and after its hydrotreating through the Prime G+ process (Axens) are determined. Features of change of hydrocarbonic composition of catalytic cracking gasoline as a result of its hydrotreating through the Prime G+ process are revealed. The hydrocarbonic composition of the light and heavy gasolines received in the course of a hydrotreating of catalytic cracking gasoline through the Prime G+ process is studied. The reasons of decrease in octane number of catalytic cracking gasoline of MSCC process in the course of its hydrotreating through the Prime G+ process are established.

УДК 621.5; 621.65

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОНАСОСНОЙ ТЕХНИКИ

канд. техн. наук Н.С. КОНЕВА
(Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск);
И.М. ПИСКУН
(ОАО «Нафтан», Новополоцк)

Освещается вопрос технологии и оборудования, позволяющего полезно и децентрализованно использовать отходящее низкопотенциальное тепло в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве. Рассмотрены современные тенденции в развитии теплонасосной техники. Описаны возможности широкого применения тепловых насосов в системах отопления жилых домов, использующих вторичные тепловые стоки и природные низкопотенциальные источники тепла. Представлен потенциал и необходимость рекуперации низкопотенциального тепла тепловых отходов промышленных предприятий, использующих водоемкие системы охлаждения технологического оборудования. Отображены сдерживающие факторы широкого промышленного применения теплонасосной техники на промышленных предприятиях Беларуси. Приведены примеры применения тепловых насосов в мире и Республике Беларусь.

Введение. Современная общемировая тенденция состоит в повышении энергоэффективности всех технологических процессов и аппаратов и соответствующем снижении энергозатрат в себестоимости производимого продукта. В передовых экономически развитых странах энергоэффективность достигает 70…80 %. Этот показатель обеспечивается за счет перехода на новые технологические уровни производства, позволяющего обеспечить максимальную конверсию сырья, материалов, энергии в целевой товарный продукт.

Однако любое крупное товарное производство обладает и высокой технологической инерцией, сдерживающей темпы инновационных процессов. Именно с этим связано отставание по переходу на новые более высокие технологические уровни. Особенно остро обозначенная проблема стоит в странах постсоветского пространства, где ранее крупнотоннажное производство базировалось на недорогостоящих и доступных энергетических ресурсах, больше внимания уделялось наращиванию объемов производства и в меньшей степени экономии жидких, твердых, газообразных отходов и тепловых выбросов.

В настоящее время ситуация изменилась, особенно актуальна она для стран, где в дефиците природные энергоресурсы и электроэнергия. В частности, в Беларуси объемы потребления энергоресурсов в 8…10 раз больше собственного энергопотенциала [1], а стоимость электроэнергии определяется ценой на импортируемый природный газ и нефть. В сложившейся ситуации особого внимания заслуживают все технические решения, направленные на глубокую рекуперацию тепловых отходов, выбрасываемых в окружающую среду.

Основная часть. На промышленных предприятиях тепловые потоки условно можно разделить на две группы: высокопотенциальные и низкопотенциальные. К *высокопотенциальным* тепловым потокам относятся потоки сырья и готовой продукции, переносящие тепловую энергию и непосредственно участвующие в технологической схеме процесса производства продукта. Например, нагрев сырья в технологических печах (до 500…1000 °С); ступенчатый разогрев сырья отходящими более горячими продуктами в теплообменных аппаратах (до 300…500 °С); подогрев воздуха для технологических печей и паровыработка с использованием энергии дымовых газов продуктов сгорания топлива (до 150…200 °С) и т.д. К *низкопотенциальным* тепловым потокам можно отнести тепловую энергию, не задействованную в технологических процессах и отводимую в окружающую среду, а соответственно в атмосферу. В частности, не используется тепло дымовых газов после рекуператоров, температура потока после которых может достигать 250 °С. Дальнейшее понижение температуры приводит к достижению точки росы дымовых газов и конденсации влаги на поверхности газоходов и дымовых труб, что требует совершенно иных затрат на защиту от коррозионного износа. Также широко практикуется применение аппаратов воздушного охлаждения, в которых технологические потоки последовательно охлаждаются от 150 до 80 °С, и далее доохлаждаются в водяных холодильниках до 50 °С. После чего происходит сброс огромного количества низкопотенциальной тепловой энергии (25…40 °С) в градирнях системы водооборота предприятия.

Очевидно, что энергоэффективность всего производства будет определяться эффективным использованием всех перечисленных тепловых потоков и энергии, полученной от сжигания топлива. Однако всегда существует баланс между прямыми затратами на сжигаемое топливо и затратами на технологическое оборудование для более глубокой рекуперации тепловой энергии и сокращения низкопотенциальных тепловых отходов.

Развитие современных технологий и техники направлено на повышение энергоэффективности производства в целом. Несомненно, что количество вовлекаемого тепла в основной процесс производства будет увеличиваться, однако будет оставаться и значительная доля низкопотенциальных выбросов, обусловленных экономической составляющей, связанной с затратами на совершенствование аппаратурных решений производств.

На примере нефтехимического предприятия оценим потенциал и масштаб тепловых отходов низкопотенциального тепла в системе водооборота. Для охлаждения различных потоков с помощью теплообменного оборудования в качестве холодного теплоносителя используется оборотная вода. Циркулируя через холодильники, оборотная вода, нагретая до 30…40 °С, подается в градирни (открытые сооружения), где за счет контакта с воздухом охлаждается на 5…10 °С и вновь возвращается в производство для охлаждения тепловых потоков. Несмотря на то, что изменение температуры воды в системе составляет обычно около 10 °С, из-за больших количеств циркулирующей воды в атмосферу уносится значительное тепло:

$$Q = G_c(T_1 - T_2), \quad (1)$$

где Q – количество теплоты, теряемой в атмосферу (Дж/с); G – расход теплоносителя (кг/с); с – удельная теплоемкость теплоносителя (Дж/(кг·К)); T_1 , T_2 – температура теплоносителя (К).

По оценочным расчетам (на начало 2000-х годов) на производстве ОАО «Нафтан-Полимир» установлено, что потери тепла в системах водооборота вполне соизмеримы с потреблением тепла в виде пара, а в ряде случаев превосходят последние. То есть значительная часть энергии, образующейся при сжигании топлива, направленная на образование греющего пара, в конечном итоге выбрасывается в атмосферу в виде тепла низкого потенциала при охлаждении водооборотной воды в градирнях [2; 3].

К примеру, в летнее время в системе водооборота ОАО «Нафтан» в общей сложности на градирни поступает порядка 30 000 м³/сут оборотной воды, где происходит ее охлаждение с 37…40 до 22…25 °С (зависит от температуры окружающей среды). При этом в атмосферу в виде низкопотенциального тепла передается порядка 26 000 кДж/с. Если оценить этот тепловой поток с учетом удельной теплоты сгорания нефти, получим в эквиваленте порядка 55 тонн нефти в сутки.

Приведенные цифры, однако, не являются свидетельством неэффективности системы водооборота предприятия и не говорят о необходимости полной замены градирен иными технологиями, это всего лишь указывает на огромный потенциал использования тепла низкопотенциальных тепловых отходов.

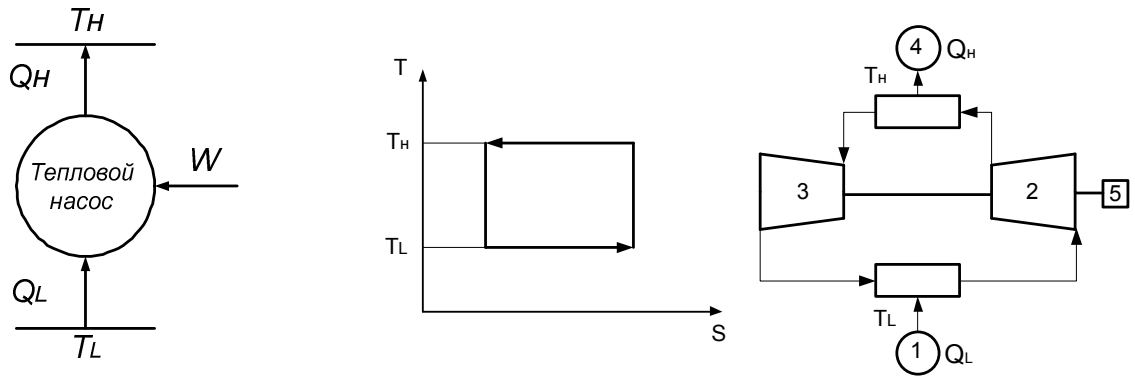
Значительными источниками низкопотенциального тепла, кроме предприятия нефтехимического комплекса (водоемкие производства), обладают и системы отопления жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). В общем случае подача тепла для жилого фонда осуществляется по централизованной системе теплоснабжения от крупных источников тепла – ТЭЦ или котельных. В зависимости от температуры окружающего воздуха устанавливается температурный график подачи сетевой воды и возвращаемой, так называемой «обратки». Для эффективной работы этой системы потребитель должен получать расчетное количество тепловой энергии при условии строгого соблюдения температурного графика. Однако многие системы отопления жилых домов работают неэффективно и не могут обеспечить нужного теплосъёма теплофикационной воды, и отопительная вода возвращается к ТЭЦ с достаточно высокими температурами – выше установленных температурным графиком. В результате при транспортировке тепла по магистральным и распределительным сетям реальные потери достигают до 30 % при норме 5…10 % [4; 5]. Рекуперация тепла обратной теплофикационной воды перед отправкой на ТЭЦ могла бы повысить эффективность всей энергосистемы на 10…15 %.

Анализ объемов теряемого низкопотенциального тепла как в системе ЖКХ, так и промышленных предприятиях показывает огромный потенциал и перспективу применения технологий утилизации низкопотенциального тепла. Наиболее распространённым решением рекуперации низкопотенциального тепла на сегодняшний день является тепловой насос [6].

В общем случае тепловой насос требует затраты работы (W) для получения тепла при низкой температуре (Q_L) и отдачи его при более высокой (Q_H) (рис. 1). Отношение Q_H/W называется коэффициентом преобразования теплоты (K_T). Если считать, что тепло изотермически подводится при температуре T_L и изотермически отводится при температуре T_H, сжатие и расширение производятся при постоянной энтропии (рис. 1), а энергия работы подводится от внешнего двигателя, то коэффициент преобразования для термокомпрессионного теплового насоса, основанного на цикле Карно, будет иметь вид:

$$K_T = T_L / (T_H - T_L) + 1 = T_H / (T_H - T_L). \quad (2)$$

Из приведенной формулы следует, что КПД такой тепловой машины всегда меньше единицы и определяется температурами нагревателя и холодильника [7].



а) *б*)

Рис. 1. Термодинамическая схема теплового насоса (*а*) и цикл Карно для теплового насоса (*б*)
1 – испаритель; 2 – компрессор; 3 – детандер; 4 – конденсатор; 5 – привод компрессора;
Q_H – высокопотенциальное тепло; Q_L – низкопотенциальное тепло;
T_L – низкопотенциальная температура источника; T_H – высокопотенциальная температура источника

Тепловые насосы различных типов в промышленных и экономически развитых странах используются достаточно широко и доказали свою энергетическую и экологическую эффективность. Это единственные устройства, которые осуществляют процесс переноса теплоты с низкотемпературного уровня на более высокий температурный уровень потребителя, вовлекая в полезный оборот неиспользуемую природную и техногенную теплоту, соответственно снижая потребность в добываемом топливе и сокращая выбросы «парникового» углекислого газа и других вредных продуктов сжигания органического топлива.

Наиболее широкое применение тепловые насосы нашли в домашнем теплоснабжении и кондиционировании воздуха. Сейчас объем продаж тепловых насосов в мире составляют около 125 млрд. долл., в эксплуатации находится более 130 млн. установок. По прогнозам Мирового энергетического комитета, к 2020 году доля тепловых насосов в теплоснабжении в мире составит 75 %.

Понимая очевидность экономии ресурсов, правительства развитых стран поощряют внедрение тепловых насосов предоставлением различных льгот и субсидий. В России тепловые насосы широко применяют там, где нет газа. В Украине приоритетным направлением выступает увеличение выработки тепла с помощью тепловых насосов (программа до 2030 года).

В Республике Беларусь также ведутся работы по использованию альтернативных источников энергии. В марте 2013 года Правительством утвержден план мероприятий по разработке геотермальных источников энергии. В Беларуси уже существует опыт использования геотермальных тепловых насосов. В 2011 году введена в опытную эксплуатацию геотермальная станция мощностью 1 МВт на территории тепличного комплекса «Берестье» Брестского района. Пробуренная здесь поисковая скважина глубиной около 1,5 км, выявила источник пресной теплой воды. По указу Президента скважина была передана предприятию для строительства геотермальной установки. Построенная теплонасосная геотермальная станция с помощью двух импортных тепловых насосов повышает температуру добытой из-под земли воды с 24 до 60 °С. В результате, комбинат отапливает часть теплиц и обеспечивает горячим водоснабжением собственное производство [8].

Кроме того, в Беларуси активно развивается рынок бытовых тепловых насосов европейского производства для отопления индивидуальных жилых домов.

В Республике Беларусь также развивается разработка и производство отечественных тепловых насосов малой мощности до 100 кВт. Подобные парокомпрессионные тепловые насосы создаются на базе поршневых, спиральных и винтовых компрессоров в основном импортного производства. С целью оптимизации теплообменного оборудования, создания и внедрения опытно-промышленных образцов а также с целью исследования возможности максимального использования отечественной элементной базы в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова созданы экспериментальные парокомпрессионные тепловые насосы теплопроизводительностью 14 и 30 кВт. Разрабатываемые и изготавливаемые установки на базе экспериментальных моделей тепловых насосов могут быть использованы для проведения экспериментальных исследований различных схем подключения и конструкций испарителей и конденсаторов, внешних жидкостных контуров, теплоносителей и теплообменников. В качестве хладагентов в экспериментах используются озонобезопасные фреоны. В качестве основных объектов внедрения парокомпрес-

сионных насосов в Беларуси рекомендуются жилые и офисные помещения: отопление водяное и воздушное, охлаждение/нагрев технологических сред, горячее водоснабжение отопление и кондиционирование.

Основными направлениями развития и исследования тепловых насосов следует считать:

- повышение тепловой эффективности;
- повышение теплопроизводительности;
- повышение температуры теплоносителя в конденсаторе;
- использование новых рабочих веществ, снижающих парниковый эффект;
- уменьшение срока окупаемости, увеличение надежности и обеспечение реверсивности теплонасосной установки.

Создание и освоение опытных образцов конкурентоспособных высокоэффективных парокомпрессионных тепловых насосов создает предпосылки для освоения и выпуска сопутствующей тепловой техники: аккумуляторов тепловой и электрической энергии, систем теплового регулирования, систем автоматизации и диспетчеризации, новых испарителей, конденсаторов, а также других теплообменников теплонасосной установки. Сегодня в лаборатории терморегулирования Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси продолжаются эксперименты и исследования по повышению эффективности систем теплоснабжения с использованием низкопотенциальной теплоты возобновляемых источников и парокомпрессионных тепловых насосов средней теплопроизводительностью до 50 кВт в рамках Государственной программы научных исследований «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» на 2011–2015 годы. Для повышения энергоэффективности тепловых насосов и теплонасосных систем в лаборатории терморегулирования осуществляются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по разработке и созданию нового теплообменного оборудования в области гелиотехники, теплотрубных технологий, методов и средств интенсификации теплопередачи, тепловых аккумуляторов, высокоэффективных рекуперативных теплообменников, испарителей и конденсаторов, объектов теплотехники с оригинальной технологией изготовления [9].

Однако имеет место сдерживающий фактор широкого применения тепловых насосов для рекуперации низкопотенциального тепла на промышленных предприятиях – в качестве рабочих тел в теплонасосных установках используются достаточно опасные для окружающей среды и человека вещества, такие как аммиак, фреоны, смеси углеводородов (в основном метана, этана, а также пропана и бутана). Поэтому закономерные мировые инженерные разработки и тенденции в законодательстве направлены на стимулирование и поиск альтернативных рабочих тел для тепловых насосов.

Проблемой многих российских и ведущих западных производителей тепловых насосов (Heliotherm, Heliotherm, OSCHNER – Австрия; Viessmann, Buderus Германия; ClimateMaster, ECONAR, FHP Manufacturing – США; Elco – Швейцария; IVT, Thermia – Швеция; Mitsubishi Electric – Япония; AERMEC – Италия) является предстоящий вывод из обращения фреоновых теплонасосных установок и замена аналогичными, но с экологически чистыми рабочими телами. И связано это прежде всего с ратификацией Киотского протокола.

Поиск альтернативного рабочего тела для тепловых наосов – сложнейшая и пока до конца не решенная задача. Для осуществления процессов в трансформаторах тепла рабочие тела должны обладать необходимыми термодинамическими и физико-химическими свойствами: низкой температурой испарения; невысоким давлением конденсации при требуемой температуре; высокой теплотой парообразования в рабочем интервале температур, что обусловливает высокие значения теплопроизводительности и коэффициента преобразования; высокой химической стабильностью, химической инертностью по отношению к конструкционным материалам и смазочным маслам. В то же время эффективность термокомпрессионного цикла зависит от показателя адиабаты (политропы) K_T:

$$K_T = C_p / C_v, \tag{3}$$

где C_p – удельная теплоемкость при давлении P; C_v – удельная теплоемкость при объеме V.

Поэтому использование, например, углеводородов C_3…C_5 парафинового ряда в качестве рабочих тел проблематично из-за их низкого коэффициента преобразования теплоты (K_T = 1,05…1,2).

Рабочее тело, с одной стороны, должно обладать достаточно высоким K_T (1,3…1,4), а с другой – переходить, хотя бы частично, в жидкое состояние после отдачи тепла в системе рекуперации.

Альтернативным рабочим телом может рассматриваться паровоздушная смесь с содержанием водяных паров до 50 %об. При определенных условиях возможно получить интенсивное парообразование воды (температура 25…40 °С и вакуум 20…30 кПа абс.). Кроме того, известно, что у воды одно из самых больших значений теплоты парообразования, и при определенных соотношениях показатель политропы паровоздушной смеси может быть равным 1,5…1,7. Все это делает приемлемым применение паровоз-

душной смеси с термодинамической точки зрения в термокомпрессионном цикле. И особенно важно то, что паровоздушная смесь доступна, экологична и является недорогосоящим рабочим телом.

Анализ научно-технической и патентной литературы (за период 1996–2015 годов по ведущим странам мира – DE, GB, FR, JP, US, CH) показывает, что уже предложены отдельные патенты по использованию в качестве рабочих тел тепловых насосов таких сред, как воздух (RU 2273809 C2, 2007 г.) и паровоздушная смесь (RU02116586 C1 19980727, 1998 г.; WO 2006/049527 A1, 2006 г.; EP 2290305 A1, 2006 г.; US 7866179 B2, 2011 г.).

Эксперименты по созданию и испытанию парожидкостного теплового насоса были проведены на ПО «Полимир» под началом кафедры химической техники Полоцкого государственного университета и руководством доктора технических наук, профессора Г.Н. Абаева. В результате была разработана пилотная установка, основными узлами которой являлись ротационно-пластинчатый вакуум-компрессор и струйный аппарат, способная рекуперировать низкопотенциальное тепло оборотной воды предприятия с температурой 25…40 °С путем выработки «горячей воды» (T = 80…90°С) и низкопотенциального пара. Однако из-за невысоких характеристик используемого ротационно-пластинчатого компрессора и недостаточно оптимального сочетания совместной работы струйного аппарата и компрессора эффективность теплового насоса была близка к ~ 1.

Позднее был проведен ряд экспериментальных исследований в лабораторных условиях УО «ПГУ» и на производстве ОАО «Технолит» (г. Полоцк). Результаты этих исследований позволили предложить модель промышленного энергоэффективного паровоздушного теплового насоса мощностью 25 кВт и эффективностью не менее 3-х, включающего такие основные элементы, как ротационно-пластинчатый вакуум-компрессор и струйный аппарат (рис. 2).

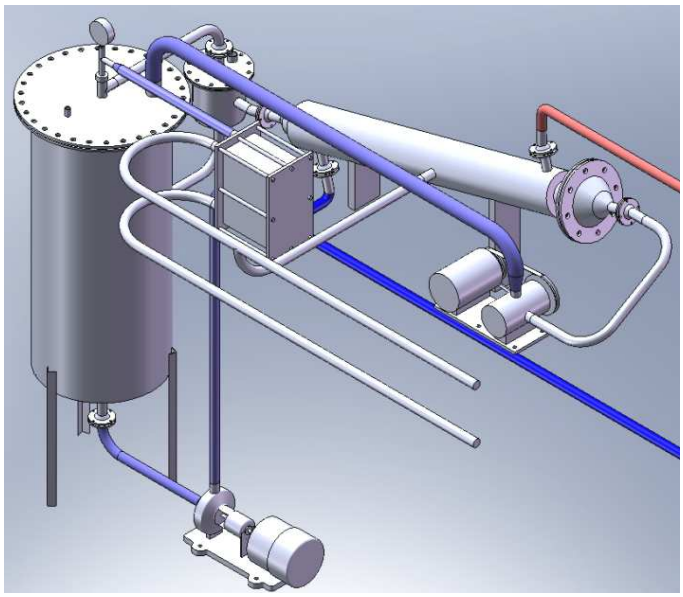


Рис. 2. Модель паровоздушного компрессионного теплового насоса

Эффективность модели теплового насоса достигается за счет применения модернизированного отечественного вакуум-компрессора с улучшенными характеристиками соответствующего струйного аппарата, разработанного на основании установленных закономерностей струйного аэрирования, и согласованности рабочих характеристик компрессора и эжектора [10]. Применение созданной модели теплового насоса возможно в различных отраслях народного хозяйства, например, в системе водооборота нефтехимического предприятия ОАО «Нафтан» и в системе отопления ЖКХ.

Одним из источников низкопотенциального тепла на производстве ОАО «Нафтан», как говорилось выше, может являться тепло оборотной воды системы охлаждения технологического оборудования и потоков нефтепродуктов. Анализ потерь тепла в системе водооборота насосно-компрессорного оборудования установки каталитического риформинга показал, что безвозвратно теряется порядка 1,5 МВт/ч низкопотенциальной энергии. Соответственно, предлагается использование теплового насоса в системе охлаждения насосно-компрессорного оборудования для понижения температуры оборотной воды и выработки горячей воды (рис. 3). Предлагаемая модель теплового насоса позволит рекуперировать лишь малую часть тепловой энергии оборотной воды системы, однако его возможное внедрение позволит получить практический опыт промышленного применения тепловых насосов.

Применение теплового насоса в жилищно-коммунальном хозяйстве также возможно для рекуперации тепла оборотной теплофикационной воды, идущей от жилых домов обратно к ТЭЦ (рис. 4). Рекуперируемое тепло предполагается использовать для обогрева жилого дома, снижая потребление поступающей от ТЭЦ горячей воды. Вне отопительного сезона теплофикационная вода может использоваться для нагрева питьевой «горячей» воды в бойлере дома.

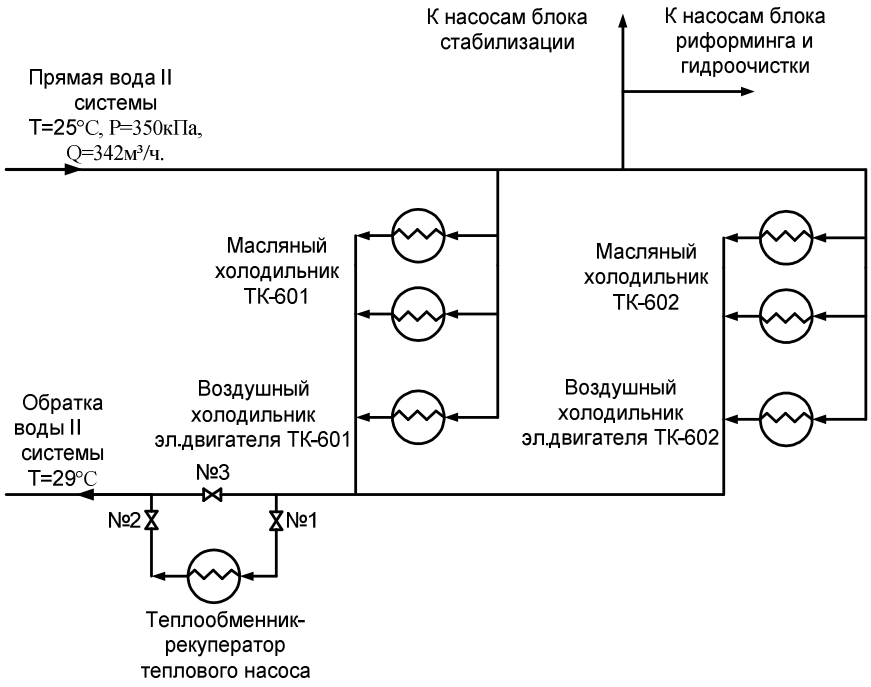


Рис. 3. Схема применения теплового насоса на технологической установке ОАО «Нафтан»

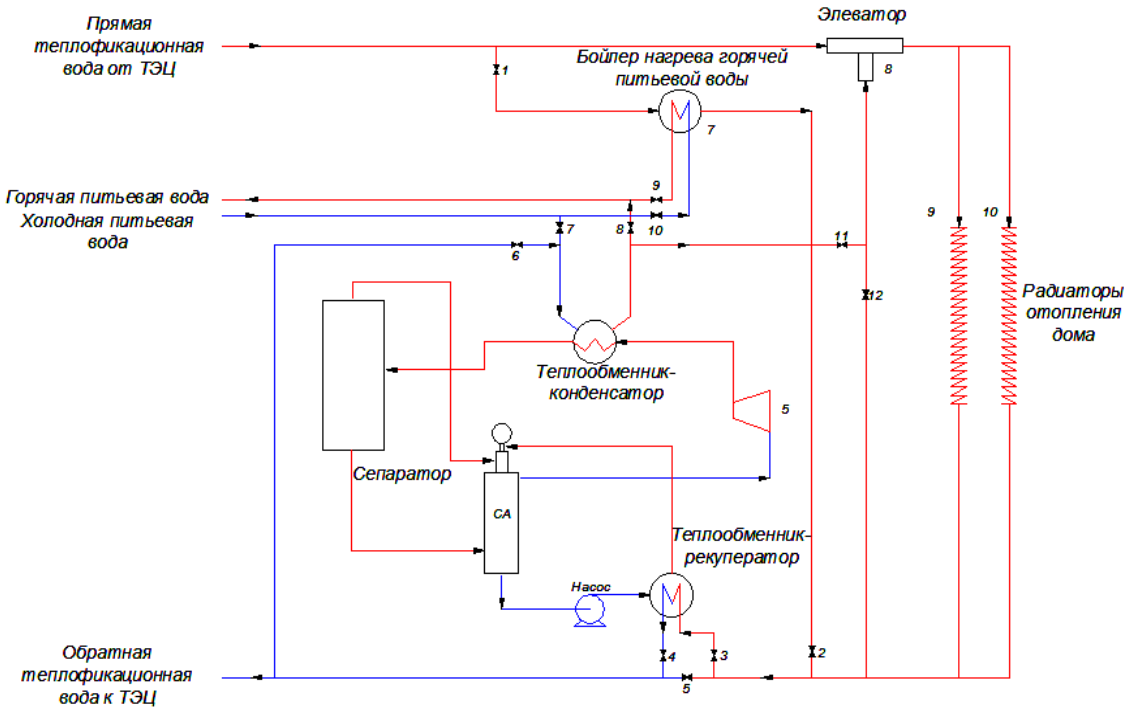


Рис. 4. Рекуперация тепла оборотной теплофикационной воды в системе ЖКХ с использованием теплового насоса

При оценке количества тепловых насосов для ЖКХ установлено, что для типового 2-х подъездного 9-ти этажного жилого дома на 72 квартиры достаточно одного теплового насоса мощностью 25 кВт.

Заключение. Анализ современных тенденций развития теплонасосной техники показывает динамичное развитие технологий и технических решений для рекуперации низкопотенциального тепла. Оценка перспектив постепенного снижения высокопотенциальных тепловых отходов в производстве с учетом постоянного значительного объема выбросов низкопотенциальных тепловых отходов свидетельствуют о важности любых научных и инженерных решений, направленных на энергосбережение. Однако современные технологии и оборудование, основанные на использовании дорогостоящих и высокоопасных рабочих тел тепловых насосов, имеют и существенные ограничения, сдерживающие широкое их промышленное применение.

Таким образом, создание эффективного промышленного теплового насоса с доступным и безопасным рабочим телом является актуальным направлением развития современной Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергоэффективность аграрного производства / В.Г. Гусаков [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Отд-ние аграр. наук, Ин-т экономики, Ин-т энергетики; под общ. ред. акад. В.Г. Гусакова, Л.С. Герасимовича. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 57 с.
2. Рекуперация низкопотенциального тепла системы оборотного охлаждения с использованием термокомпрессионных циклов / Г.Н. Абаев [и др.] // Материалы. Технологии и инструменты. – 1998. – № 1. – С. 49–52.
3. Пилотная установка по рекуперации низкопотенциального тепла / Г.Н. Абаев [и др.] // РЭК нефтехим- 1: тр. междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 17–19 ноябр. 1998 г.; Полоц. гос. ун-т; редкол.: Г.Н. Абаев [и др.]. – Новополоцк, 1998. – С. 200–203.
4. Прокопчик, Г.А. Цена тепла / Г.А. Прокопчик // Журнал Директор. Белорус. ежемес. информ.-аналит. науч.-практ. журнал для руководит. – 2006. – № 10. – С. 8.
5. Бондарь, Е.С. Тепловой насос – энергетически эффективная составляющая систем кондиционирования воздуха / Е.С. Бондарь, П.В. Калугин // Тепловые насосы. – 2011. – № 2. – С. 25–30.
6. Энергосбережение: разработать пилотную установку по рекуперации низкопотенциального тепла систем оборотного охлаждения с использованием термокомпрессионных циклов: отчет о НИОКР / Полоц. гос. ун-т; рук. темы Г.Н. Абаев. – Новополоцк, 1998. – С. 22 – 98. – № ГНТП 55.
7. Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача / Б.Н. Юдаев. – М.: Высш. шк., 1988. – 479 с.
8. Грибик, Я. Развитию геотермальной энергетики в Беларуси препятствуют межведомственные барьеры / Я. Грибик, В. Зуй, Н. Долбик // Дикая природа Беларуси [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: http://www.wildlife.by/node/24255. – Дата доступа: 31.05.2015.
9. Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массобмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» (Институт тепло- и массобмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси). – Минск, 2015. – Режим доступа: http://www.itmo.by. – Дата доступа: 22.07.2015.
10. Компрессионный тепловой насос с рабочим телом смесь паров воды и воздуха: пат. 16833 Респ. Беларусь, МПК: F25B 30/02, F24D 11/02 / Г.Н. Абаев, И.М. Пискун; заявитель Г.Н. Абаев, И.М. Пискун, ОАО Технолит. – № a 20101400; заявл.11.12.12; опубл. 28.02.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – С. 11.

Поступила 17.07.2015

MODERN DEVELOPMENT TRENDS IN HEAT PUMP EQUIPMENT

N. KONEVA, I. PISKUN

This article describes the situation concerning technology and equipment enabling efficient and decentralized utilization of lower-grade waste heat in industry and housing and utilities sector. Modern development trends in heat pump equipment were reviewed. Possibilities of wide application of heat pumps in household heating systems, which use secondary heat sinks and natural lower-grade heat sources, are described. The article presents potential capability and necessity of low-grade heat recovery from heat wastes of industrial plants, which use water-retaining cooling systems for process equipment. Deterrents of wide industrial application of heat pump equipment at industrial plants of the Republic are demonstrated. Examples of heat pumps application worldwide and in the Republic of Belarus are provided.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Данилов В.А., Данилов А.А. Анализ и реализация методов управления макрогеометрией сложных многогранных поверхностей при обработке резанием 2
Кастрюк А.П., Дудан А.В., Вигерина Т.В. Совершенствование технологической подготовки восстановления деталей за счет их классификации 10
Антонюк В.Е., Дечко Э.М., Русецкий В.Н. Продольная модификация и селективная сборка сателлитов планетарных передач схемы 2К-Н 16
Павлечко В.Н., Протасов С.К. Теоретическое давление радиального нагнетателя при изменении угла наклона лопастей 20
Алифанов А.В., Цуран В.В., Горецкий Г.П., Милюкова А.М. Разработка режимов термообработки рубильных ножей, изготовленных из различных инструментальных сталей 28
Белоцерковский М.А., Сосновский А.В., Яловик А.П., Дудан А.В. Оценка возможности использования процесса гиперзвуковой металлизации при восстановлении элементов гидросистем 36
Бержанин Д.А., Ланин В.Л. Повышение вибропрочности конструкций мобильных электронных систем 43
Дудан А.В., Гуща А.А. Методы и средства трибомодифицирования поверхностей трения 49
Покляцкий А.Г. Параметры процесса сварки трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов 53
Борисов А.Л. Результаты исследования центрифугирования смеси масел, применяющейся в режущих аппаратах многороторных косилок 59
Жорник В.И., Ивахин А.В., Дудан А.В., Гуща А.А. Структура и свойства пластичной смазки на основе сульфоната кальция 63
Рубаник В.В., Рубаник В.В. (мл.), Милюкина С.Н. Способы и модель низкотемпературного задания памяти формы сплавам TiNi 69
Иванов В.П., Уваров Г.А., Васькович А.Н. Совершенствование терминологии в области диагностирования автомобильных агрегатов 77
Дронченко В.А. Влияние содержания воды на стабильность эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов 82
Иванов В.П., Васькович А.Н., Уваров Г.А. Комплексное диагностирование цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания 87
Капский Д.В., Мозолевский Д.В., Кузьменко В.Н., Полховская А.С., Коржова А.В., Киселевич Н.В., Ермакова Н.С., Горелик Е.Н. Транспортное планирование и обслуживание крупных транспортных узлов 93
Капский Д.В., Мозолевский Д.В., Кузьменко В.Н., Полховская А.С., Коржова А.В., Киселевич Н.В., Ермакова Н.С., Горелик Е.Н. Совершенствование организации дорожного движения при устройстве многофункциональных комплексов в зоне транспортных узлов в двух уровнях 104

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Ермак А.А., Покровская С.В., Бурая И.В., Сюбарева Е.В., Завадский А.В. Свойства и перспективные направления переработки остаточного продукта процесса «Юникрекинг» 115
Арцукевич И.М., Цехан О.Б. Влияние сульфата натрия и строительного гипса на процесс гашения извести 121
Ермак А.А., Бугаевич О.Г. Изменение углеводородного состава бензина каталитического крекинга MSCC в результате его гидрооблагораживания по технологии PRIME G+ 127
Конева Н.С., Пискун И.М. Современные тенденции развития теплонасосной техники 133