

Чернов И. В., Литинский Е. И., Левадный Ю. В.
I. V. Chernov, E. I. Litinskii, Yu. V. Levadny

**МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОГО АЗИМУТА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СПУТНИКОВО-ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ**

**ON-LINE DETERMINATION METHOD OF MINUTE AZIMUTH ANGLE USING
INTEGRATED SATELLITE-GYROSCOPE SYSTEM**

Чернов Иван Владимирович – адъюнкт кафедры высшей геодезии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, г. Санкт-Петербург). E-mail: 4ern86@bk.ru.

Mr. Ivan V. Chernov – a Post-graduate Student, Higher geodesy Department, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St. Petersburg). E-mail: 4ern86@bk.ru.

Литинский Евгений Игоревич – адъюнкт кафедры высшей геодезии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, г. Санкт-Петербург). E-mail: litinskij1990@mail.ru.

Mr. Yevgeny I. Litinskii – a Post-graduate Student, Higher geodesy Department, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St. Petersburg). E-mail: litinskij1990@mail.ru.

Левадный Юрий Валерьевич – заместитель начальника кафедры фототопографии и фотограмметрии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, г. Санкт-Петербург). E-mail: 4ern86@bk.ru.

Mr. Yurii V. Levadny – Deputy head of phototopography and photogrammetry Department, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St. Petersburg). E-mail: 4ern86@bk.ru.

Аннотация. Постоянное совершенствование сложных технических систем требует повышения точности и оперативности определения геодезических данных. В состав этих данных входят как прямоугольные, так и эллипсоидальные координаты, нормальная высота, астрономический азимут направлений, ускорение силы тяжести, высота квазигеоида, составляющие отклонения отвесных линий (в плоскостях меридиана и первого вертикала) элементов технических систем. Наибольшее влияние на способность технических систем решать задачи по предназначению оказывает точность определения азимутов. Для повышения достоверности определения азимутов направлений при ориентировании азимутальные определения должны производиться двумя независимыми методами. Кроме того, технические системы могут располагаться в закрытых (ограниченных) пространствах. Среди существующих методов определения азимута достичь указанной точности позволяет только астрономический метод. Но из-за сильной зависимости астрономического метода от метеорологических условий и трудоёмких наблюдений оперативно определить азимут с требуемой точностью невозможно, как и невозможно получить азимуты направлений с требуемой точностью вторым независимым методом. В работе обосновывается способ повышения оперативности высокоточного определения азимута двумя независимыми методами в закрытых и ограниченных пространствах. Практическая значимость полученных результатов определяется повышением эффективности геодезической подготовки сложных технических систем. Главное преимущество разработанной методики и метода состоит в выполнении требований к точности с надёжным контролем и высокой оперативностью геодезической подготовки.

Summary. Continuous improvement of complex technical systems requires improving the accuracy and efficiency of determining geodesic data. These data include rectangular and ellipsoidal coordinates, normal height, astronomical azimuth of directions, the gravity acceleration, quasigeoid height and the components of the vertical lines deviations in technical systems (in the plane of the meridional and Prime vertical). The greatest impact on the ability of technical systems to solve tasks belongs to the accuracy of the azimuth determination. To improve the reliability of determining the azimuth directions in the azimuthal orientation the determination should be done with two independent methods. In addition, the technical system may be located in enclosed (confined) spaces. Among the existing methods for the determination of the azimuth, only astronomical method allows achieving the specified precision. However, because of the strong dependence of the astronomical method on meteorological conditions and time-consuming observations to determine the azimuth with the required accuracy quickly is impossible, as it is impossible to obtain the azimuths of the directions with the required accuracy with an independent method.

The authors substantiate the way of increasing the efficiency of high-precision azimuth with two independent methods in closed and confined spaces. The practical significance of the obtained results is determined by the efficiency of geodesic preparation of complex technical systems. The main advantage of the developed technique and the method is the requirement of precision with reliable control and high efficiency of geodesic training.

Ключевые слова: интеграция, азимут, повышение точности, автономное ориентирование, высокоточное ориентирование, оперативное ориентирование, относительный метод, космические навигационные системы.

Key words: integration, azimuth, improving the accuracy, autonomous orientation, high precision orientation, on-line orientation, relative method, space navigation systems.

УДК 355 (623.64)

Введение

Интеграция для статического (неподвижного относительно Земли) определения азимута в научной литературе не встречается. Зато эта задача успешно решается в навигационных системах [2, 5]. В целях навигации интегрируются аппаратура потребителей космических навигационных систем (АП КНС) и инерциальные навигационные системы (ИНС). Главным элементом ИНС является гироскоп (лазерный, роторный, оптико-волоконный и т.д.). Существующие способы интеграции АП КНС и ИНС функционируют в условиях изменения положения (движения) и ориентации в пространстве самой интегрированной системы [2, 5]. Конечной целью интеграции в таких условиях является уточнение координат, составляющих скорости и ориентации в пространстве, а также прогноз положения системы относительно геоцентрической системы координат.

Применение существующих способов интеграции ИНС и АП КНС для определения азимуты ограничено обязательным наличием перемещения самой интегрированной системы. Случай статического гироскопического ориентирования исключает передвижение интегрированной системы. Существующие способы интеграции ИНС и АП КНС неприменимы при определении азимуты направлений в целях геодезического обеспечения, т.е. становится актуальной задача разработки метода оперативного определения высокоточного азимута с использованием интегрированной спутниково-гироскопической системы.

Теоретические основы метода оперативного определения высокоточного азимута с использованием спутниковой системы. Идея метода определения азимута с применением АП КНС состоит в решении обратной геодезической задачи по координатам пунктов, полученных относительным методом космической геодезии.

Чтобы вычислить геодезические азимуты, по координатам пункта B, L, H' с измеренными разностями координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ вычисляются координаты B, L других пунктов, закрепляющих определяемые направления. И только теперь из решения обратной геодезической задачи по полученным координатам пунктов вычисляются геодезические азимуты направлений и расстояния (длины геодезических линий на эллипсоиде).

Исходя из того что в локальном районе (10 – 30 км) влияние различных источников ошибок на результаты измерений одинаково для любого приемника, получим

$$\begin{cases} X_M = X'_{Mi} + \partial X_i, \\ Y_M = Y'_{Mi} + \partial Y_i, \\ Z_M = Z'_{Mi} + \partial Z_i; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_M = X'_{Ni} + \partial X_i, \\ Y_M = Y'_{Ni} + \partial Y_i, \\ Z_M = Z'_{Ni} + \partial Z_i; \end{cases} \quad (2)$$

где $\partial X_i, \partial Y_i, \partial Z_i$ – поправки для локального района в момент времени t_i ; $X'_{Mi}, Y'_{Mi}, Z'_{Mi}, X'_{Ni}, Y'_{Ni}, Z'_{Ni}$ – координаты точек M и N , закрепляющих ориентируемое направление, в момент времени t_i , полу-

ченные абсолютным методом; $X_M, Y_M, Z_M, X_N, Y_N, Z_N$ – координаты точек M и N в общеземной системе координат WGS-84 или ПЗ-90. В момент времени t_i будет получен вектор $M'N'$, искажённый ошибками $\partial X_i, \partial Y_i, \partial Z_i$.

Запишем координаты вектора MN и $M'N'$

$$MN \{X_M - X_N, Y_M - Y_N, Z_M - Z_N\}$$

$$M'N' \{X'_M - X'_N, Y'_M - Y'_N, Z'_M - Z'_N\}$$

Тогда, используя (1) и (2), получим координаты $M'N'$

$$M'N' \{(X_M - \partial X_i) - (X_N - \partial X_i), (Y_M - \partial Y_i) - (Y_N - \partial Y_i), (Z_M - \partial Z_i) - (Z_N - \partial Z_i)\},$$

после очевидных преобразований

$$M'N' \{X_M - X_N, Y_M - Y_N, Z_M - Z_N\}$$

Одним из достаточных условий коллинеарности векторов является равенство нулю их векторного произведения. Так как соответствующие координаты векторов $M'N'$ и MN равны, то приведенное выше условие коллинеарности векторов выполняется. Вектор $M'N'$ будет коллинеарен и сонаправлен вектору MN .

Точность определения координат абсолютным методом космической геодезии составляет 15 м, а точность определения приращения координат находится в миллиметровом диапазоне. Следовательно, за промежуток времени $\Delta t = t_0 + t_i$ получим множество сонаправленных векторов, которые будут иметь среднюю квадратическую ошибку (СКО) координат до 15 м.

На рис. 1 mn – проекция ориентируемого направления MN (нормальное сечение) на поверхность относимости, $m'p'$ – линия, параллельная меридиану mp . Пусть поверхность относимости является сферической. Допустим, имеются погрешности ΔB и ΔL геодезических координат для направления MN . Погрешности ΔB и ΔL геодезических координат приведут к тому, что за проекцию направления MN на поверхности относимости вместо mn будет принята $m'n'$.

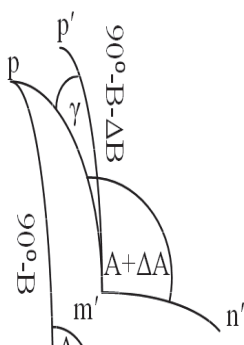


Рис. 1. Смещение проекции ориентируемого направления

Через p на рис. 1 обозначено положение полюса. Геодезический азимут в смещённом положении точки m будет равен $A + \Delta A$, где ΔA – ошибка азимута, вызванная погрешностями геодезических координат. Она согласно уравнению Лапласа в случае, когда зенитное расстояние направления равно 90 градусов, будет равна $\Delta A = \Delta L \sin B$. Угол γ при m' есть сближение меридианов на эллипсоиде, которое в сферическом приближении равно $\gamma = \Delta L \sin B$, то есть совпадает с ΔA . Это означает, что угол $p'm'n'$ равен A [3, 40].

В общем случае, когда зенитное расстояние направления MN не будет равно 90 градусов дуги, будет иметься зависимость ошибки ориентировки (δA) mn от погрешности ΔB и ΔL геодезических координат [3, 41]:

$$\delta A = (\Delta B \sin A - \Delta L \cos A \cos B) \operatorname{ctg} z. \quad (3)$$

Из (3) видно, что δA зависит от азимута и от угла наклона ориентируемого направления. При величинах ошибок $\Delta L, \Delta B$, не превышающих 15 м на широте г. Москвы, значение выражения в скобках не превысит 0,7 секунды дуги. Результаты расчёта величины δA при условиях, описанных выше, для углов наклона ориентируемого направления, равных 2, 5, 6, 7, 10, 20 градусов, дуги приведены на рис. 2.

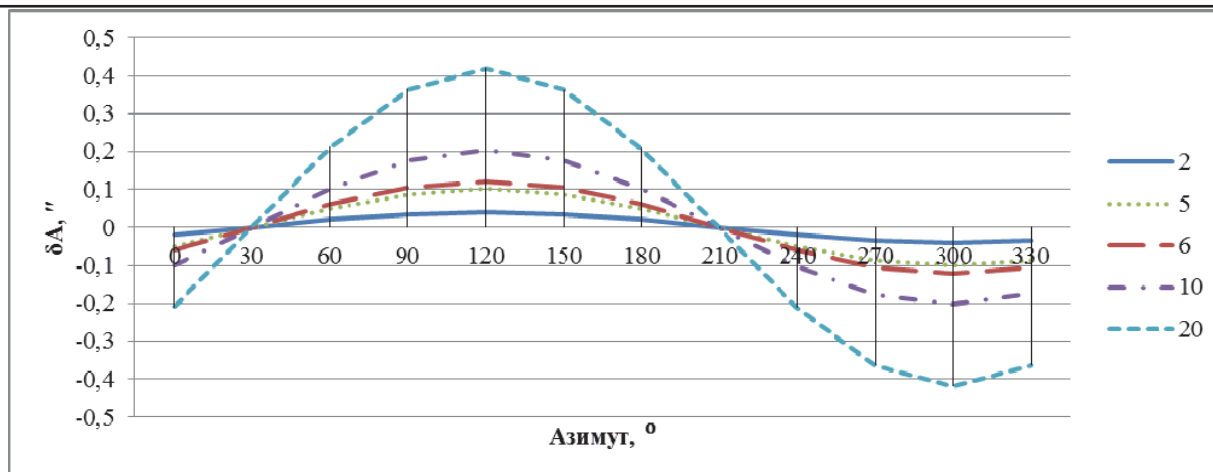


Рис. 2. Результаты расчёта величины δA для углов наклона ориентируемого направления, равных 2, 5, 6, 7, 10, 20 градусов дуги

Из рис. 2 и формулы (3) видно, что в этом случае даже при погрешностях, в линейной мере достигающих 15 м, разница (δA) между любыми азимутами из множества полученных векторов не превысит 0,1 угловой секунды при углах наклона ориентируемого направления менее 5 градусов. При ориентировке направления, близкой к $\pi/3 + \pi$, величина $\delta A \approx 0$.

В случае высокоточного ориентирования и превышения угла наклона ориентируемого направления величины 5 градусов дуги (ориентирование в горной местности), необходимо учитывать величину δA . При использовании предлагаемого метода ориентирования учёт величины δA не возможен, так как не используется геодезическая основа, необходимая для расчёта величин ΔB и ΔL геодезических координат. Однако появляется возможность компенсировать величину δA выбором направления, близкого к $\pi/3 + \pi$. В данном случае ориентируемое направление (близкое к $\pi/3 + \pi$) будет практически полностью избавлено от влияния систематических ошибок ориентирования, зависящих от азимута направления. В дальнейшем от этого направления методом измерения углов «во всех комбинациях» или «круговых приёмов» геодезический азимут может передаваться на любое направление с начального пункта ориентируемого направления.

Изложенный подход даст возможность контроля стабильности ориентируемых направлений с помощью контрольного угла, образованного направлением, близким к $\pi/3 + \pi$, и направлением, требуемым для ориентирования. Это позволит контролировать стабильность направлений, азимуты которых определяются.

Таким образом, из-за погрешностей геодезических координат, полученных одновременно абсолютным методом, происходит параллельное смещение проекции направления на поверхность относимости, для которого определяется азимут. Это даёт основание утверждать, что относительный метод космической геодезии позволяет определять геодезические азимуты направлений без использования исходной геодезической основы с прецизионной точностью.

Относительный метод космической геодезии предполагает одновременные наблюдения на определяемых и исходных пунктах и совместную пост обработку результатов этих наблюдений. Для реализации этого метода достаточно установить АП КНС на пунктах, закрепляющих ориентируемое направление, и произвести одновременные наблюдения. Азимут, полученный данным способом, будет являться геодезическим.

Пусть по результатам обработки спутниковых измерений получены координаты пунктов в геодезической системе координат. Для определения геодезического азимута перейдём из пространственной геоцентрической системы координат к топоцентрической горизонтной Y', X', Z' по формуле [5, 5]

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = A^T \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix},$$

где

$$A^T = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L \cos B \sin L \\ \cos B & 0 \cos B \sin B \end{bmatrix};$$

B, L – геодезические широта и долгота пункта.

Тогда геодезический азимут направления MN можно найти из уравнения [5, 10]

$$A = \arctg\left(\frac{\Delta Y'}{\Delta X'}\right),$$

где $\Delta X', \Delta Y'$ – приращения в топоцентрической горизонтной системе координат.

Пренебрегая методическими погрешностями превычисления координат, СКО определения геодезического азимута вычислим из формулы

$$m_{AMN} = \frac{\rho'' m_p}{D},$$

где ρ'' – постоянная ($\rho'' = 206\,265''$); m_p – СКО измерения приращений координат между точками; D – расстояние между точками установки антенн АП КНС, приведенное на плоскость горизонта $D = (X'^2 + Y'^2)^{1/2}$.

Ожидаемые СКО определения геодезических азимутов ориентирных направлений m_{AMN} АП КНС при точности определения приращений координат $m_p = 5 \text{ мм} + 1 \text{ мм на } 1 \text{ км}$ линии представлены на рис. 3.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что применение относительного метода космической геодезии при одновременных наблюдениях без использования опорных точек (наземной исходной геодезической основы) позволяет определять геодезические азимуты с СКО $0,5 - 0,3''$ при длине ориентируемого направления порядка $1000 - 2000 \text{ м}$.



Рис. 3. Ожидаемые СКО определения геодезических азимутов в зависимости от расстояния D между точками установки антенн АП КНС, приведенного на плоскость горизонта

Теоретические основы метода оперативного определения высокоточного азимута с использованием гиротеодолитных комплектов. В качестве независимого метода выбран гироскопический метод ориентирования. Тенденции к ускорению измерительного процесса, к повышению

точности определения азимутов и к удешевлению гирокомпасов (ГТ) привели к активному развитию датчиков угловой скорости, основанных на лазерных гироскопах. Хотя лазерные гирокомпасы (ЛГ) обладают повышенным быстродействием, моторесурсом и низкой стоимостью по отношению к роторным, первые уступают вторым в точности. Причинами, ограничивающими точность возможности ЛГ, являются: необходимость высокоточного определения угла β , широты места установки ЛГ и характеристики ЛГ (показатели дрейфа и стабильность масштабного коэффициента).

Проблема высокоточного определения угла β , широты ϕ места установки ЛГ и масштабного коэффициента при определении азимутов направлений решается применением методики [4]:

- измерения проекции угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН1, близком к азимуту 135° ;
- измерения проекции угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН2 = ОН1 – 90° ;
- измерения проекции угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН3 = ОН2 – 90° ;
- измерения проекции угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН4 = ОН3 – 90° ;
- учёта медленной составляющей дрейфа ЛГ (из совместной обработки ОН1, ОН3 и ОН2, ОН4);
- вычисления азимута направления ОН1 без учёта масштабного коэффициента ЛГ по формуле

$$\operatorname{tg} a_1 = \operatorname{tg} a'_1 + \left(\operatorname{tg} a'_1 \frac{\sin \beta_1}{\cos a'_1} - \frac{\sin \beta_2}{\cos a'_1} \right) \operatorname{tg} \phi$$

где $\operatorname{tg} a'_1 = \Omega_2/\Omega_1 = v_2/v_1$; Ω_2 – проекция угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН2; Ω_1 – проекция угловой скорости вращения на ось чувствительности лазерного гирокомпаса в направлении ОН1.

Для дальнейшего повышения точности определения азимутов направлений возможно применить ориентирование с применением гиротеодолитного комплекта (ГТК). При высокоточном ориентировании ГТК целесообразно применять ориентирование по створу и по связующим направлениям с визированием внутри схемы автоколлимационным методом.

Таким образом, разработано два независимых подхода к определению астрономического азимута, подлежащих интеграции. Определены их точностные возможности и ограничения, позволяющие повысить точность определения азимутов. Следующим этапом является разработка способа интеграции обоих методов ориентирования.

Теоретические основы метода оперативного определения высокоточного азимута с использованием спутниково-гироскопической системы. Для интегрирования гироскопической системы и АП КНС с целью высокоточного оперативного определения азимутов сначала необходимо определиться с исходным набором информации. По результатам измерений неподвижно установленного на поверхности Земли ЛГ получают астрономический азимут ОЧ ЛГ и широту точки установки ЛГ. По результатам измерений АП КНС определяют координаты точки установки антенны приёмника. Так как вся интегрированная система неподвижна для получения возможности совместной обработки данных, необходимо установить дополнительную антенну АП КНС на ориентирный пункт. Таким образом, от системы разнесённых антенн АП КНС становится возможно получить геодезический азимут и длину линии между установленными антеннами из решения обратной геодезической задачи. Но полученные азимуты из наблюдений ЛГ и АП КНС будут разными: по результатам гироскопических наблюдений определяется астрономический азимут, а после обработки данных АП КНС – геодезический. Астрономический азимут отсчитывается от астрономического меридиана, а геодезический азимут – от геодезического меридиана. Для перехода в единую систему отсчёта необходимо ввести в геодезический азимут поправку Лапласа [3, 39]:

$$a = A + \delta A, \delta A = \eta \operatorname{tg} \phi - (\eta \cos A - \xi \sin A) \operatorname{ctg} z,$$

где A – геодезический азимут; δA – поправка Лапласа; η – составляющая уклонения отвесной линии в первом вертикале; ξ – составляющая уклонения отвесной линии в меридиане; z – зенитное расстояние на ориентирный пункт; a – астрономический азимут.

Возможности современной геодезии позволяют определять составляющие уклонения отвесной линии в первом вертикале η и меридиане ξ с СКО порядка $0,3''$. Такая точность определения составляющих уклонения отвесной линии обеспечивается интеграцией геометрического нивелирования и методов космической геодезии. В этом подходе составляющие уклонения отвесной линии находятся из ортометрических и нормальных превышений. Этого вполне достаточно для получения астрономического азимута с СКО не хуже $1''$.

Приведя полученные азимуты к единой системе отсчёта, получим два независимых измерения одной величины. Доказано [1, 113], что случайная СКО надёжно вычисляется по ограниченному числу измерений. Для оценки точности значения СКО Гауссом получена формула [1, 113]

$$m_m = m / \sqrt{2n}, \quad (4)$$

где m_m – СКО значения m ; m – СКО измерения; n – число измерений.

В случае с двумя независимыми равноточными измерениями получим $m_m = m/2$, т.е. оценка точности по отклонениям от средних значений будет ненадёжной [1, 182]. Иными словами, достоверность характеристики точности в этом случае недопустимо низкая. Таким образом, возникает вопрос оценивания точности двойных измерений азимута и определения количества двойных измерений, позволяющих достоверно оценить их точность.

В соответствии с требованиями ГОСТ [ГОСТ В 20.57.304-76 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Общие технические требования, методы контроля и испытаний. Москва, 1977. 141 с.] точность контрольной системы должна составлять $1/5$ – $1/3$ (в исключительных случаях $1/2$) точности контролируемой системы. Учитывая то, что азимут должен быть определён с точностью (СКО) до $2''$, оценка его СКО (m_m) должна составить $0,4$ – $0,7''$.

Если двойные измерения повторены k раз, число измерений составит $n = 2k$. Используя формулу (4), при требовании точности ориентирования $2''$ и $m_m = 0,4$ – $0,7''$ получим необходимое количество двойных измерений $k = 2$.

Таким образом (при $m = 2''$), для достоверной оценки точности двойных измерений с m_m не хуже $0,7''$ их необходимо повторить минимум дважды.

Если в разностях двойных измерений $-\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_k$ остаются малые систематические ошибки, то математическое ожидание разности составит малую величину [1, 184]: $M(\Delta a) = \Delta a_{cp} = [\Delta a]/k$, где Δa_{cp} – среднее значение разности двойного измерения азимута; $[\Delta a]$ – гауссово обозначение суммы разностей двойных измерений.

В этом случае СКО разности можно получить из формулы Бесселя [1, 188]. Принимая во внимание то, что Δa_i найдены с одинаковой точностью, получим $m_{\Delta a} = 2^{1/2} m_a$. Следовательно, СКО двойных равноточных измерений составит

$$m_a = \sqrt{\frac{[\varepsilon^2]}{2(k-1)}},$$

где ε – разность разностей двойных измерений.

Для решения задачи оперативного определения высокоточных азимутов с целью геодезического обеспечения сложных технических систем необходимо учесть ограничения. В качестве ограничений необходимо принять допустимую СКО ($2''$) определения астрономического азимута и требования по оперативности получения этих азимутов (до пяти суток). Учёт указанных ограничений позволяет определить метод оперативного определения высокоточного азимута с использованием интегрированной спутниково-гироскопической системы. Метод содержит следующие этапы:

- оперативное (первые – третьи сутки) определение эталонных направлений на базе эталонирования гирокомпасов (БЭГ) с СКО $m \leq 0,5 - 1''$ (с использованием синхронно работающих АП КНС);
- одновременное эталонирование гиротеодолитов (гирокомпасов) комплекта на эталонных направлениях БЭГ;
- оперативное (третьи – четвертые сутки) определение азимутов исходных направлений технической системы с СКО $m \leq 2 - 3''$ (с применением синхронно работающих АП КНС и комплекта гиротеодолитов).

Все этапы метода включили в себя определение азимута с применением АП КНС без геодезической основы, а третий этап дополнительно включил вторые независимые (гироскопические) измерения азимутов направлений и их совместную обработку. Алгоритм метода представлен на рис. 4.

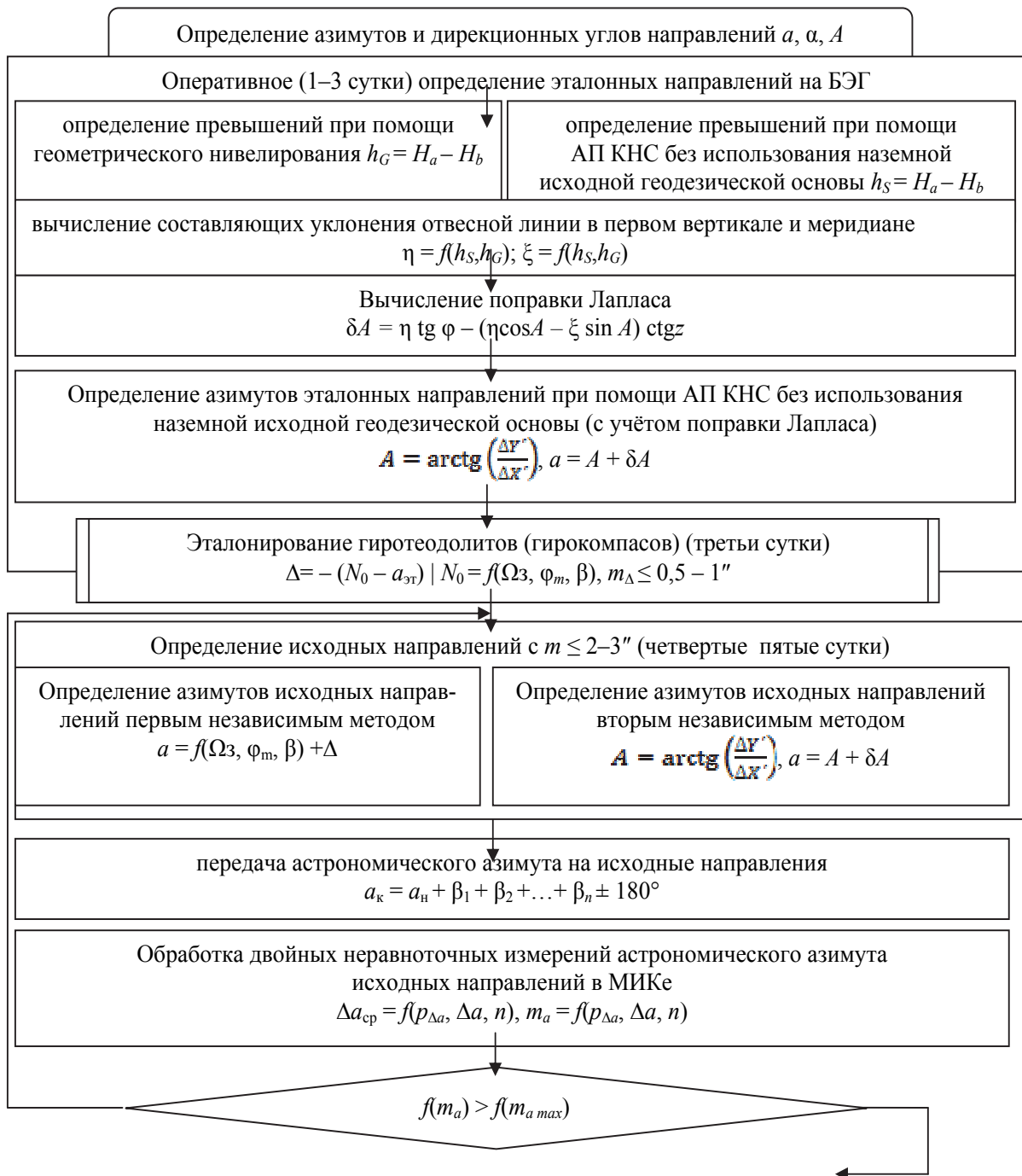


Рис. 4. Алгоритм метода оперативного определения высокоточного азимута с использованием интегрированной спутниково-гироскопической системы



Заключение

Таким образом, доказано, что повышение оперативности ориентирования путём отказа от применения наземной исходной геодезической основы и интеграции гироскопических и спутниковых наблюдений возможно. В итоге разработанный метод позволяет осуществить:

- отказ от использования наземной исходной геодезической основы при определении азимутов относительным методом космической геодезии;
- совместную обработку результатов гироскопического ориентирования и спутниковых наблюдений АП КНС;
- надёжное оценивание точности результирующих значений азимутов из двойных наблюдений.

Разработанный метод обладает универсальностью и может быть применен в неподготовленных в топогеодезическом отношении районах. Главное преимущество разработанного метода состоит в выполнении требований точности с надёжным контролем и высокой оперативностью геодезической подготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астапович, А. В. Теория математической обработки геодезических измерений: учеб. пособие. Ч. 1 / А. В. Астапович. – СПб.: СПбВТКУ, 1997. – 199 с.
2. Демидов, О. В. Задача тесной интеграции систем ГЛОНАСС и GPS с инерциальными навигационными системами разных классов точности: дис. ... канд. физ.-мат. наук. 01.02.01 / Демидов Олег Викторович. – М., 2009. – 139 с.
3. Пеллинен, Л. П. Высшая геодезия / Л. П. Пеллинен. – М.: Недра, 1978. – 264 с.
4. Чернов, И. В. Совершенствование методики определения азимутов с использованием лазерных гироскопов / И. В. Чернов // Информация и космос. – 2016. – № 6 (в печати).
5. Яковлев, А. И. Высшая геодезия. Решение практических задач высшей геодезии: учеб. пособие / А. И. Яковлев. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – 109 с.

Козин В. М., Земляк В. Л., Рогожникова Е. Г.
V. M. Kozin, V. L. Zemlyak, E. G. Rogozhnikova

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА РАЗРУШЕНИЯ
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ ПАРНОМ ДВИЖЕНИИ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ**

**THE USE OF FLEXURAL GRAVITY WAVE INTERFERENCE FOR IMPROVING
THE EFFICIENCY OF THE RESONANCE METHOD TO DESTRUCT ICE COVER
WHEN HOVERCRAFTS ARE MOVING IN PAIRS**

Козин Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Механика деформирования» Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kozinvictor@rambler.ru.

Mr. Victor M. Kozin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Research Associate, Laboratory of «Mechanics of deformation», the Institute of Machining and Metallurgy, FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kozinvictor@rambler.ru.

Земляк Виталий Леонидович – кандидат физико-математических наук, проректор по науке и инновациям Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема (Россия, г. Биробиджан). E-mail: vellkom@list.ru.

Mr. Vitaliy L. Zemlyak – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Vice Rector for Research and Innovation, Sholom-Aleichem Priamursky State University (Russia, Birobidzhan). E-mail: vellkom@list.ru.

Рогожникова Елена Григорьевна – старший преподаватель кафедры информационной безопасности, информационных систем и физики Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Steinbockh@mail.ru.

Ms. Elena G. Rogozhnikova – Senior lecturer, Information Security, Information Systems and Physics Department, Amur State University of Humanities and Pedagogy (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Steinbockh@mail.ru.

Аннотация. В работе рассмотрена возможность повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова за счет использования интерференции изгибно-гравитационных волн, возникающей при одновременном движении нескольких амфибийных судов на воздушной подушке.

Summary. This article considers the possibility of efficiency improvement of the resonance method to destruct ice cover using interference flexural gravity waves generated by simultaneous movement of several amphibian hovercrafts.

Ключевые слова: резонансный метод, ледяной покров, разрушение, изгибно-гравитационные волны, интерференция, суда на воздушной подушке.

Key words: resonance method, ice cover, destruction, flexural gravity waves, interference, amphibian hovercrafts.

УДК 532.526.2

Введение

Многие страны имеют замерзающие реки, омываются морями, которые в различной степени и на разные сроки покрываются льдом. Лед является серьезным препятствием на пути судоходства, осложняя, а иногда и делая невозможной своевременную доставку грузов по назначению. Он также затрудняет разведку и добычу полезных ископаемых, огромные запасы которых содержатся в шельфовой зоне арктических морей и Антарктики.

С другой стороны, ледяной покров можно использовать для устройства ледяных переправ, автозимников и взлетно-посадочных полос. В этих случаях необходимо сохранять несущую способность ледяного покрова.

Для решения указанных ледотехнических проблем может быть использован резонансный метод разрушения ледяного покрова амфибийным судном на воздушной подушке (СВП), т.е. посредством возбуждения резонансных изгибно-гравитационных волн.

Сущность резонансного метода разрушения ледяного покрова, изложена в работах [4; 7] и заключается в возбуждении в ледяном покрове резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ). В работах В.М. Козина и В.Д. Жесткой разработаны зависимости для расчета напряженно-деформированного состояния ледяного покрова в случае движения по нему распределенной нагрузки при различных граничных условиях на берегах ледяного поля и законах движения нагрузки [1]. Нестационарное прямолинейное движение СВП рассматривалось А. В. Погореловой [10]. И.В. Стурова исследовала движение нагрузки по ледяному покрову в условиях переменной глубины бассейна для двухмерной задачи [11]. Работы Л.А. Ткачевой [12; 13] посвящены плоской задаче о влиянии периодической внешней нагрузки на колебания полубесконечной упругой пластины и полосы. В. Сквайр в работе [14] обобщил результаты исследований разных авторов, исследовавших движение нагрузок по ледяному покрову. Ф. Милиназо, К. Ванг и другие математически исследовали стационарное и нестационарное движение нагрузки по ледяному покрову [16]. Т. Такизава экспериментально изучал деформации ледяного покрова при движении по нему нагрузки [15].

В известных исследованиях рассматривалось движение одиночной нагрузки. Однако при выполнении ледокольных работ одним СВП его параметры могут оказаться недостаточными для разрушения ледяного покрова заданной толщины в конкретных ледовых условиях. В таких случаях эффективность ледокольных работ можно повысить за счет одновременного использования нескольких судов, т.е. за счет интерференции возбуждаемых ими ИГВ. При этом наиболее интенсивное разрушение ледяного покрова будет происходить позади судов на расстоянии от них, равном примерно $\lambda_p/4$ [7; 15; 8] (где λ_p – длина резонансных ИГВ [7]).

Данная работа посвящена исследованиям закономерностей деформирования ледяного покрова при движении по нему нескольких (в нашем случае двух) нагрузок.

Выполненные предварительные экспериментальные исследования с полунатурными и натурными СВП (см. рис. 1 – 2) показали перспективность такого подхода [4].



Рис. 1. Спаренная работа крупномасштабных моделей СВП

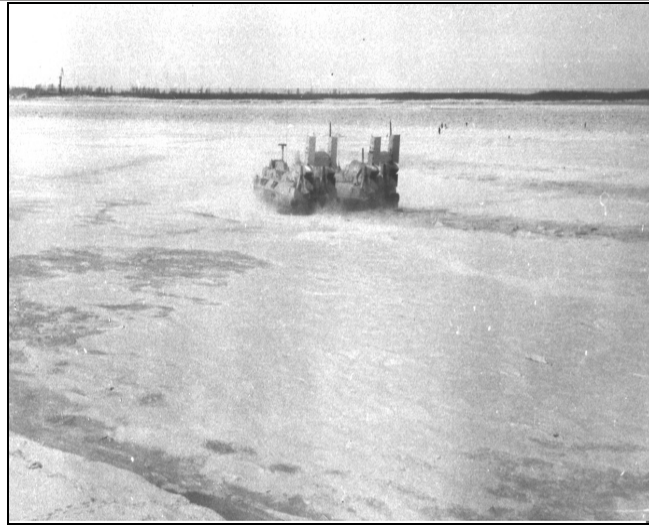


Рис. 2. КВП «Скат» при групповой работе по разрушению льда (движение фронтом)

Экспериментально-теоретические исследования

Теоретические исследования влияния взаимного расположения СВП на параметры возбуждаемых ими ИГВ проводились на основании решения дифференциального уравнения малых колебаний плавающей вязкоупругой пластины под действием внешней нагрузки, которое можно записать в виде [10]

$$\frac{Gh^3}{3} \left(1 - \tau_\phi u \frac{\partial}{\partial x} \right) \nabla^4 w + \rho_2 g w + \rho_1 h u^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \rho_2 u \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -q,$$

где $G = 0.5E/(1+\nu)$ – модуль упругости льда при сдвиге; ν – коэффициент Пуассона; h – толщина ледяного покрова; τ_ϕ – время релаксации деформаций; w – прогиб льда; ρ_1, ρ_2 – плотность льда и воды; g – ускорение силы тяжести; ∇ – оператор набла; u – скорость движения нагрузки; q – система перемещающихся давлений; Φ – потенциал движения жидкости, удовлетворяющий уравнению Лапласа $\Delta\Phi = 0$.

Выражение для w получено в виде

$$w(x, y) = \frac{4q_0}{\pi^2 \cdot \rho_2 \cdot u^2} \cdot \int_0^\infty \lambda^2 \cdot th(\lambda H) \times \int_0^\lambda \frac{\cos(y\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}) \sin\left(\alpha \frac{L_n}{2}\right) \sin\left(\frac{B_n}{2} \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}\right)}{\alpha(\lambda^2 - \alpha^2)(\xi^2 + \eta^2)} \times \\ \times (\cos(\alpha x) \cdot \xi + \sin(\alpha x) \cdot \eta) d\alpha d\lambda,$$

где

$$\eta = \frac{Gh^3 \lambda^5 th(\lambda H) \alpha \tau_\phi}{3\rho_2 u};$$

$$\xi = -\frac{Gh^3 \lambda^5 th(\lambda H)}{3\rho_2 u^2} - \frac{g\lambda th(\lambda H)}{u^2} + \frac{\rho_1 h \alpha^2 \lambda th(\lambda H)}{\rho_2} + \alpha^2.$$

Здесь q_0 – интенсивность нагрузки; L_n – длина нагрузки; B_n – ширина нагрузки; H – глубина воды.

Работоспособность полученных зависимостей подтверждена путем сопоставления результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными на упругих пленках [5; 8], в натуральных условиях [3; 9] и естественном льду в ледовом бассейне лаборатории «Ледотехника» Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема. На рис. 3 показано состояние ледяного покрова после прохождения двух нагрузок фронтом. Масштаб моделирования ИГВ в ледовом бассейне размерами $L \times B \times H = 10 \times 3 \times 1$ м $\lambda = 1:50$ был выбран исходя из его размеров, при этом длина бассейна обеспечивала выход на стационарный режим движения моделей нагрузки [2]. Опыты проводились при глубине воды 80 см и толщине намораживаемого модельного льда 0.3 см.

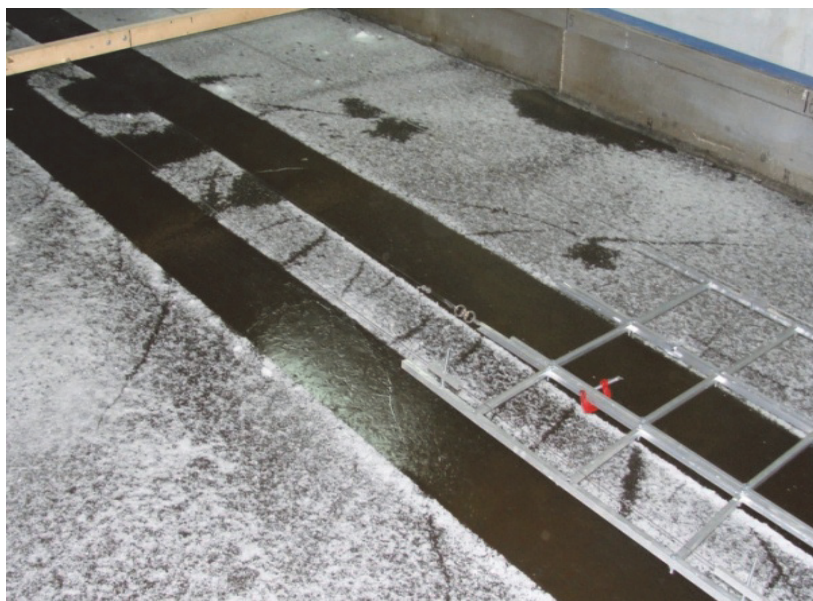


Рис. 3. Характер разрушения модельного льда $h_m = 0.003$ м после прохождения моделей СВП массой $m_m = 2.84$ кг при полном счаливании со скоростью $u_m = 1.9$ м/с

Для определения суммарных теоретических прогибов ледяного покрова при движении по нему двух нагрузок использовались зависимости

$$w_k(x, y) = w(x, y) + w(x + L_x, y); \quad (1)$$

$$w_f(x, y) = w(x, y) + w(x, y - L_y), \quad (2)$$

где L_x – расстояние между нагрузками при движении кильватерным строем; L_y – расстояние между нагрузками при движении фронтом.

В качестве нагрузки использовалась схематизированная модель СВП «Мурена». Ее параметры составляли: $l_m = 0.60$ м; $b_m = 0.26$ м; $m = 2.84$ кг. Модель ледяного покрова в ледовом бассейне приготавливалась намораживанием естественного льда естественным холодом при температуре воздуха $t = -(9 - 16)^\circ\text{C}$, а его толщина составляла $h_m = 0.003$ м.

Объем экспериментальных исследований был ограничен размерами ледового бассейна. Поэтому расчеты были выполнены для полученных экспериментальных w при параметрах льда: $\rho_l = 900$ кг/м³; $h = 0.5$ м; $H = 50$ м; $E = 1 \cdot 10^9$ Н/м².

Из рис. 4 видно, что результаты теоретических исследований удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов.

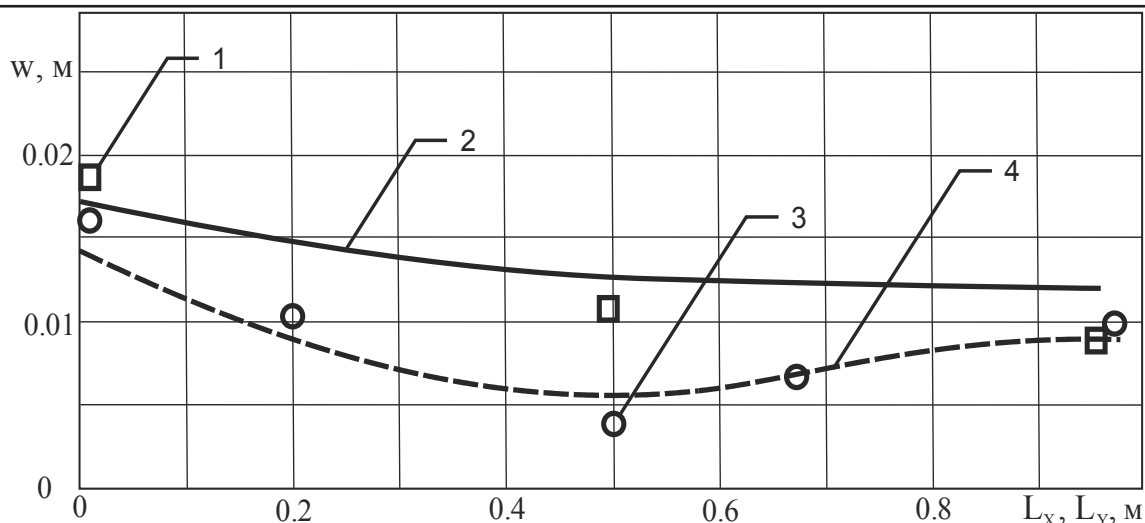


Рис. 4. Прогиб ледяной пластины при движении по ней нагрузок: 1 – экспериментальные данные при движении фронтом; 2 – расчетные данные при движении фронтом; 3 – экспериментальные данные при движении кильватерным строем; 4 – расчетные данные при движении кильватерным строем

Также была проведена серия экспериментов в опытовом бассейне размерами $L \times B \times H = 5 \times 1.8 \times 0.6$ м лаборатории «Механика сплошных сред» Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета [6]. Масштаб моделирования $\lambda = 1:500$ был выбран в зависимости от модуля Юнга пластины в соответствии с методикой моделирования, изложенной в работе [8], при этом длина бассейна также обеспечивала выход на стационарный режим движения модели нагрузки.

При таком масштабе была проведена более широкая серия опытов, что позволило оценить влияние парной работы нагрузок на коэффициент изменения деформации k , представляющего собой отношение максимального прогиба льда при парном движении нагрузок к максимальному прогибу от прохождения одиночной нагрузки

$$k = \frac{w_2}{w_1},$$

где w_2 – прогиб льда при движении двух нагрузок, движущихся фронтом или кильватерным строем; w_1 – прогиб льда при движении одиночной нагрузки, соответствующий полному разрушению ледяного покрова.

Использование коэффициента k для определения изменения ледоразрушающей способности ИГВ возможно вследствие прямо пропорциональной связи между деформациями и изгибными напряжениями, возникающими в ледяном покрове, т.е. с его помощью можно в зависимости от взаимного расположения судов определить дополнительную к одиночному СВП нагрузку, необходимую для разрушения ледяного покрова заданной толщины.

При проведении этих экспериментов использовалась схематизированная модель СВП «Зубр». Ее параметры в соответствии с масштабом составляли: $l_m = 0.11$ м; $b_m = 0.04$ м; $m = 0.046$ кг. В качестве модельного ледяного покрова использовалась упругая (резиновая) пленка толщиной 2 мм с модулем упругости $E = 2 \cdot 10^6$ Н/м².

Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований (см. рис. 5) показало также удовлетворительное совпадение.

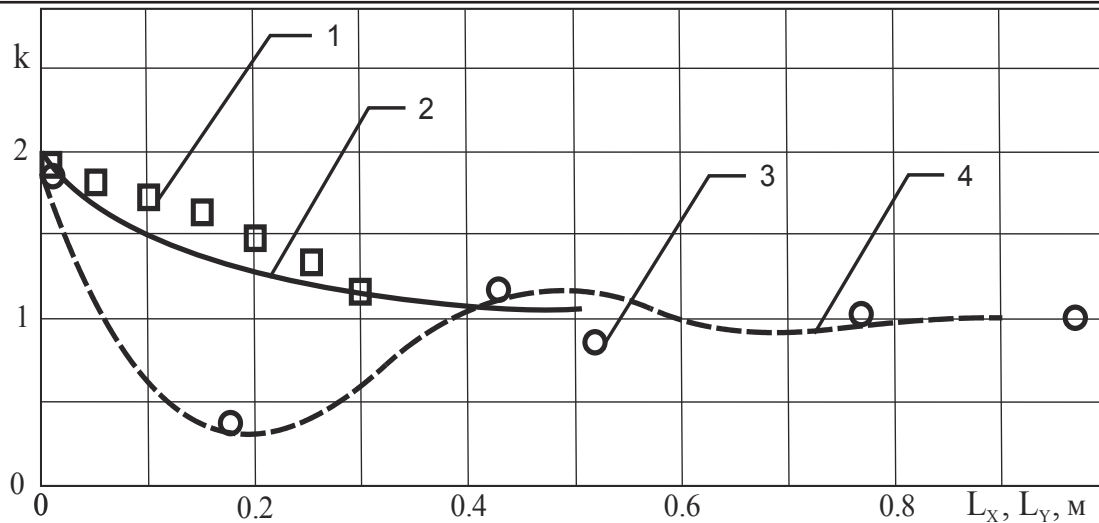


Рис. 5. Зависимость коэффициента изменения деформации k от взаимного расположения нагрузок: 1 – экспериментальные данные при движении фронтом; 2 – расчетные данные при движении фронтом; 3 – экспериментальные данные при движении кильватерным строем; 4 – расчетные данные при движении кильватерным строем

В качестве примера на рис. 6 приведены результаты расчетов в виде зависимостей коэффициентов изменения деформаций льда под действием двух СВП при равномерном движении судов фронтом для разных расстояний между бортами и кильватерным строем при разных расстояниях между кормой и носом судов. Расчеты выполнены с использованием формул (1) – (2) при следующих значениях параметров, соответствующих натурному СВП «Зубр»: $L_n = 57.3$ м; $B_n = 22.3$ м; $q_0 = 5.3 \cdot 10^3$ Н/м²; характеристиках льда: $h = 1$ м; $\rho_1 = 900$ кг/м³; $\rho_2 = 1000$ кг/м³; $E = 1 \cdot 10^9$ Н/м²; $\nu = 0.33$; $\tau_\phi = 0.69$ с; $H = 5$ м.

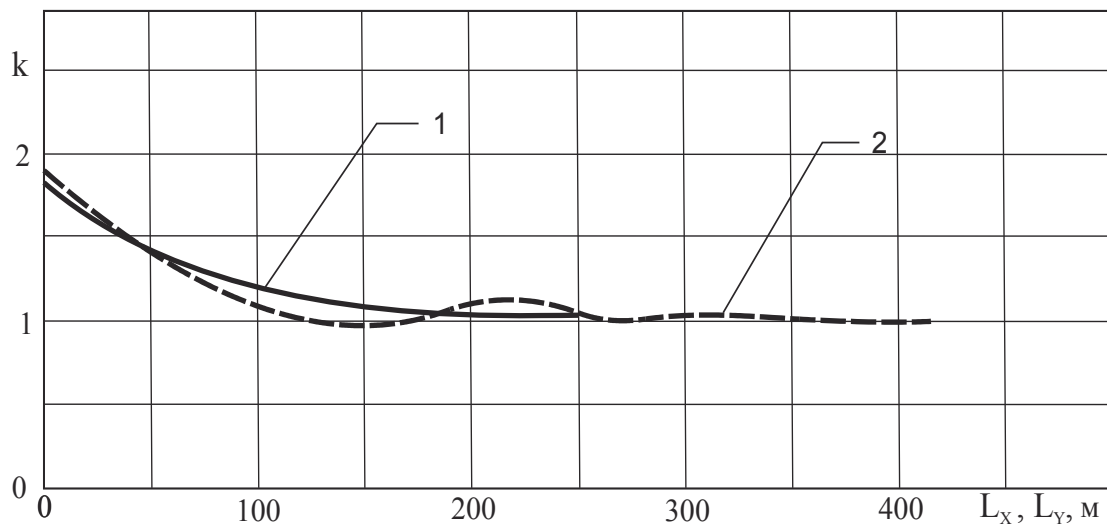


Рис. 6. Коэффициент изменения деформации пластины k при движении по ней нагрузок: 1 – движение фронтом; 2 – движение кильватерным строем

Результаты выполненных исследований могут быть использованы в следующей последовательности:

1. Вначале по графическим зависимостям (см. рис. 7) [7] определяют максимальную толщину ледяного покрова, который способно разрушить СВП массой M_c и давлением в воздушной подушке $P_{ВП}$ имеющихся судов при их одиночной работе.

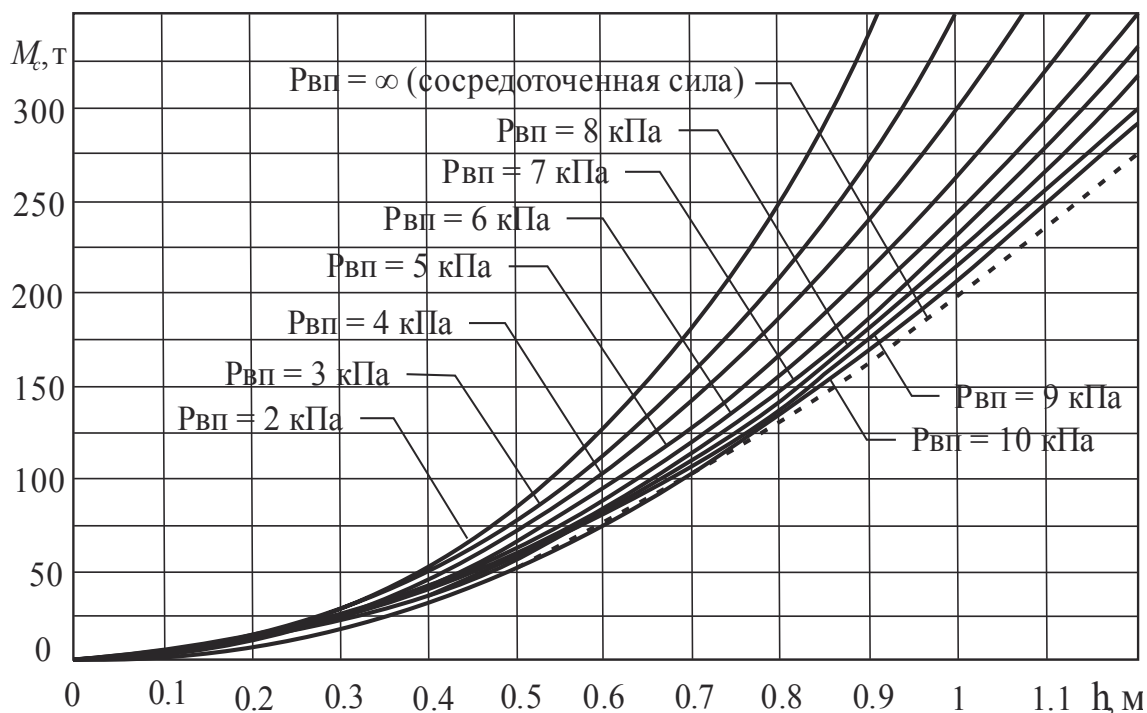


Рис. 7. Зависимость M_c СВП от толщины ледяного покрова и давления в воздушной подушке

2. Если масса имеющегося СВП M_0 с давлением $P_{ВП}$ не обеспечивает ему необходимую ледоразрушающую способность (толщину разрушаемого льда, т.е. $M_0 < M_c$), то в зависимости от параметров акватории (ширины, изгибов русла реки, протяженности его прямолинейных участков и др.) выбирают наиболее приемлемые и безопасные виды маневрирования одновременно двух (при необходимости и более) СВП с целью достижения желаемого результата – разрушения ледяного покрова заданной толщины. Если, например, ледокольные работы следует выполнить на водоеме, ограниченном по ширине, когда близость берегов из-за примерзших к ним береговых кромок ледяного покрова будет уменьшать амплитуду возбуждаемых СВП, или протяженность водоема незначительна (соизмерима с длиной ИГВ), то движение СВП кильватерным строем может оказаться предпочтительнее по сравнению с движением фронтом и т.п. При этом необходимо помнить, что движение СВП фронтом более безопасно.

3. Определяют дополнительную нагрузку от массы второго СВП M_g , способную возбудить систему дополнительных ИГВ, которые накладывались на основную, возбуждаемую первым СВП (массой M_0), позволят разрушить ледяной покров толщиной, превышающей ледоразрушающую способность одиночного судна.

Эту нагрузку определяют по зависимости

$$M_g = M_c - M_0.$$

4. Дополнительную нагрузку M_g в целях обеспечения безопасности эксплуатации судов следует создавать при наибольшем расстоянии между ними. Поскольку изгибные напряжения в ледяном покрове в нашем случае прямо пропорциональны его прогибам, то минимально достаточный коэффициент увеличения дополнительной нагрузки определится так:

$$k = \frac{M_g}{M_0}.$$

5. Максимальное расстояние между СВП, обеспечивающее достаточную ледоразрушающую способность судам, определяют по рис. 6, понимая под коэффициентом k соответствующую кривую.

Выводы

Экспериментально-теоретические исследования показали целесообразность использования интерференции ИГВ для повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова.

Определена зависимость коэффициентов изменения деформации ледяного покрова от расстояния между нагрузками при движении судов фронтом и кильватерным строем, определяющих изменение ледоразрушающих свойств ИГВ при парном движении СВП.

Показана работоспособность использованных математических зависимостей при исследованиях деформированного состояния ледяного покрова от возбуждаемых в нем ИГВ.

Исследования показали, что движение СВП кильватерным строем не целесообразно при использовании более двух судов вследствие быстрого затухания возбуждаемых ИГВ.

Использование СВП при движении «фронтом» более перспективно, т.к. есть возможность существенно повысить эффективность резонансного метода разрушения ледяного покрова при его реализации группой, превышающей два и более судов.

Выполненная работа показывает целесообразность дальнейших исследований в области совершенствования ранее предложенного и оправдавшего себя резонансного метода разрушения ледяного покрова.

Работа выполнена в рамках проекта № 487 задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузу № 2014/422.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жесткая, В. Д. Исследования возможностей разрушения ледяного покрова амфибийными судами на воздушной подушке резонансным методом / В. Д. Жесткая, В. М. Козин. – Владивосток: Дальнаука, 2003.
2. Земляк, В. Л. Лаборатория «Ледотехника» / В. Л. Земляк, Н. О. Баурин, Д. А. Курбацкий // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2013. – № 1 (12). – С. 068-077.
3. Иванов, К. Е. Деформация ледового покрова при движении грузов / К. Е. Иванов, П. П. Кобеко, А. Р. Шульман // Журнал технической физики. – 1946. – Т. 16. – С. 257-262.
4. Козин, В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты / В. М. Козин. – М.: Академия Естествознания, 2007.
5. Прикладные задачи динамики ледяного покрова / В. М. Козин, В. Д. Жесткая, А. В. Погорелова [и др.]. – М.: Академия Естествознания, 2008. – 330 с.
6. Козин, В. М. Лаборатория механики сплошных сред. В 2 ч. Ч. 1 / В. М. Козин, В. Л. Земляк // Вестник ГОУ ВПО «КнАГТУ». – Вып. 13. – 2009. – С. 244-246.
7. Козин, В. М. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом / В. М. Козин, В. Л. Земляк. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, АмГПГУ, 2013.
8. Козин, В. М. Моделирование изгибно-гравитационных волн в сплошном ледяном покрове / В. М. Козин, // В кн.: Теория и прочность ледокольного корабля. – Горький: Изд. ГПИ им. А.А. Жданова, 1982. – Вып. 3. – С. 35-38.
9. Песчанский, И. С. Ледоведение и ледотехника / И. С. Песчанский. – Х.: Гидрометеиздат, 1967. – 467 с.
10. Погорелова, А. В. Особенности волнового сопротивления СВПА при нестационарном движении по ледяному покрову / А. В. Погорелова // ПМТФ. – 2008. – Т. 49. – № 1. – С. 89-99.
11. Стурова, И. В. Влияние топографии дна на нестационарное поведение упругой пластины, плавающей на мелководье / И. В. Стурова // ПМТФ. – 2008. – Т. 72. – № 4. – С. 588-600.
12. Ткачева, Л. А. Воздействие периодической нагрузки на плавающую упругую пластину / Л. А. Ткачева // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2005. – № 2. – С. 132-146.

13. Ткачева, Л. А. Плоская задача о колебаниях плавающей упругой пластины под действием периодической внешней нагрузки / Л. А. Ткачева // ПМТФ. – 2004. – Т. 45. – № 3. – С. 136-145.
14. Squire VA, Hosking RJ, Kerr AD and Langhorne PJ / Moving Loads on Ice Plates / VA Squire, RJ Hosking, AD Kerr and PJ Langhorne.: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.
15. Takizawa, T. Response of a Floating Sea Ice Sheet to a Moving Vehicle / T. Takizawa // Proc. Fifth International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symp. – Tokyo, 1986. – V. 4. – P. 614-621.
16. Wang, K. Time-dependent response of a floating viscoelastic plate to an impulsively started moving load / K. Wang, RJ. Hosking, F. Milinazzo // J. Fluid Mech. – 2004. – V. 521. – P. 295-317.

МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

Тимофеев С. А., Савилов А. В.
S. A. Timofeev, A. V. Savilov

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ КАРМАНОВ В ДЕТАЛЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

THE STUDY OF MATERIAL CONDUCTIVITY IN HIGH-PERFORMANCE MILLING OF POCKETS USING ALUMINUM ALLOY PARTS

Тимофеев Сергей Анатольевич – аспирант кафедры «Технологии и оборудования машиностроительных производств» Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, г. Иркутск). E-mail: sevans@istu.edu.

Mr. Sergey A. Timofeev – a Postgraduate student, Technology and machine industry equipment Department, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk). E-mail: sevans@istu.edu.

Савилов Андрей Владиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудования машиностроительных производств» Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, г. Иркутск). E-mail: saw@istu.edu.

Mr. Andrey V. Savilov – PhD in Engineering, Associate professor, Technology and machine industry equipment Department, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk). E-mail: saw@istu.edu.

Аннотация. В статье рассматривается исследование зависимости электропроводности алюминиевых сплавов после высокопроизводительного фрезерования концевыми фрезами. Выполняется обработка карманов различной конфигурации, максимально приближенных к реальным фрагментам авиационных деталей. Особенностью является применение технологии высокопроизводительного фрезерования, которая, в свою очередь, позволяет значительно повысить экономическую эффективность процессов механообработки. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании технологических процессов изготовления деталей авиационной техники на высокопроизводительном оборудовании.

Summary. The article discusses dependence of aluminum alloy electrical conductivity after using high-performance end milling. Pockets of different configurations close to real fragments of aircraft parts are tooled. A special feature is the use of high-performance milling technology that can significantly increase the economic efficiency of the machining processes. The results can be used in designing of technological processes in manufacturing aircraft parts with high-efficiency equipment.

Ключевые слова: высокопроизводительное фрезерование, алюминий, неразрушающий контроль, вихретоковый контроль, электропроводность, фреза, карман.

Key words: high-performance milling, aluminum, nondestructive inspection, eddy current testing, conductivity, mill, pocket.

УДК 621.914.1

Введение

Ключевым моментом в авиационном сегменте является безопасность, поэтому на этапе производства применяются различные методы контроля деталей и заготовок, основным из которых является неразрушающий контроль. В частности, при изготовлении деталей на предприятиях ведущих мировых производителей авиационной техники производится вихретоковый контроль (для измерения электропроводности) алюминиевых заготовок как при поступлении на производство, так и непосредственно после механообработки [1].

Вихретоковый метод уже довольно долгое время применяется для эффективного контроля электропроводных материалов. Он основан на возбуждении вихревых токов на поверхности металла и регистрации их обратного воздействия на измерительный щуп. Если в детали присутству-

ют такие дефекты, как неоднородность, коррозия, эрозия, износ, трещины, повреждение и утончение стенок, то это мгновенно увеличит электрическое сопротивление поверхностного слоя металла, что приведет к ослаблению вихревых токов [1]. Так же к снижению электропроводности может привести и механообработка, так как при её выполнении в зоне резания одновременно действуют значительные усилия резания, создающие наклеп [7], и температура, вызывающая разупрочнение металла при достижении определённого значения [4].

Следует заметить, что при достаточной проработанности процедуры измерения электропроводности в открытой печати отсутствуют данные о влиянии на электропроводность режимов резания, конструктивных и геометрических параметров режущих инструментов. Наличие такой информации позволило бы разработчикам технологических процессов выбирать режущие инструменты и назначать режимы резания на них с полной гарантией, что механообработка не будет оказывать негативное влияние на структуру и механические свойства материала [2], а следовательно, и на прочность, и ресурс изготовленной детали.

Экспериментальные исследования

В работе [5] рассмотрены исследования зависимости электропроводности от режимов резания при высокопроизводительном фрезеровании образцов из алюминиевых сплавов. При этом траектория движения фрезы представляет собой прямую линию. Очевидно, что при обработке реальных авиационных деталей такой случай является крайне редким [3]. В связи с этим были проведены исследования по влиянию различных режимов резания и типов концевых фрез при обработке карманов детали. Карман имеет углы, при обработке которых фреза обхватывает их по некоторому радиусу, при этом значительно снижается линейное перемещение, что, предположительно, должно повлиять на изменение величины электропроводности в этих местах. Форма и размеры карманов были взяты максимально приближенными к карманам в реальных авиационных деталях.

Испытания проводились на 5-координатном обрабатывающем центре HSC75V linear в научно-исследовательской лаборатории ИРННТУ «Технологии высокопроизводительной механообработки, формообразования и упрочнения деталей машин».

В качестве исследуемого материала был выбран фрагмент горячекатаной плиты алюминиевого сплава В950чТ2. Химический состав и механические свойства данного сплава приведены в табл. 1 – 2.

Таблица 1

Химический состав алюминиевого сплава В950чТ2

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примеси
0,05 – 0,25	до 0,1	0,2 – 0,6	до 0,05	87,45 – 91,45	1,4 – 2	1,8 – 2,8	5 – 6,5	Прочие, каждая 0,05; всего 0,1

Таблица 2

Механические свойства алюминиевого сплава В950чТ2

δ_5 , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа
10 – 12	510 – 540	450 – 480

Измерение электропроводности выполнялось прибором Sigmatest 2.069 в связке с программным обеспечением Sigmatest 2.069 Data Acquisition Program, которое позволяет измерять па-

раметр электропроводности в режиме сканирования, не отрывая датчик от детали. На рис. 1 представлены конфигурация и размеры обрабатываемых карманов для размера плиты 540×240×50.

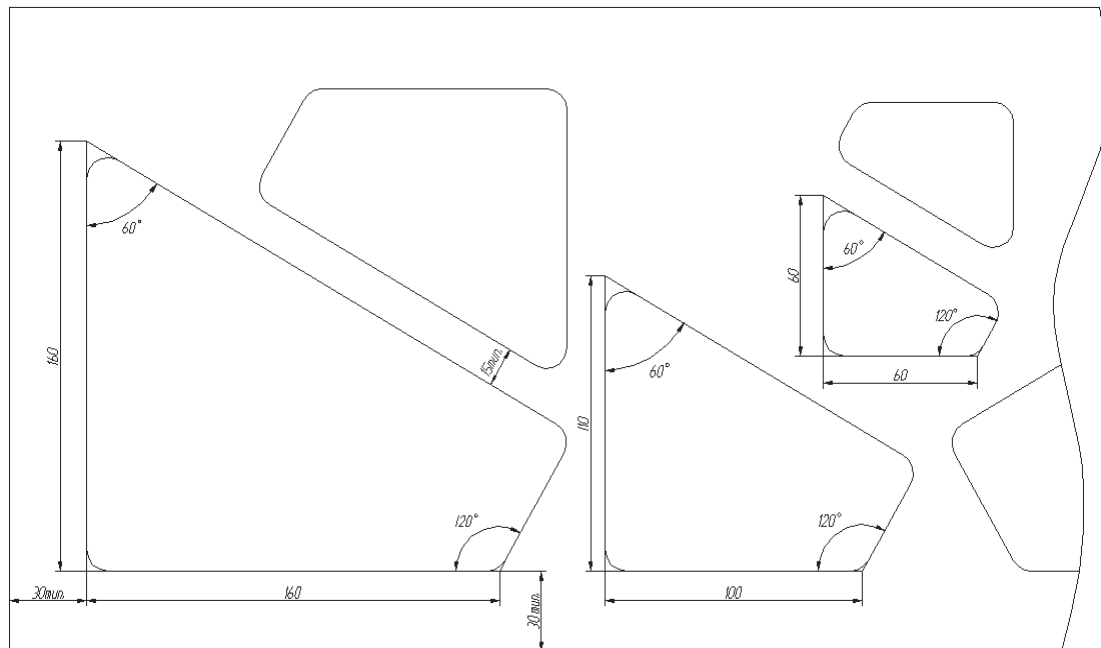


Рис. 1. Конфигурация и размеры обрабатываемых карманов

Для черновой обработки карманов в эксперименте были задействованы следующие типы фрез: концевая сборная фреза R790-040HA06S2-16M с пластиной R790-160440PH-NL H13A, концевая сборная фреза R790-025HA06S2-16L с пластиной R790-160440PH-NL H13A, цельнотвердосплавной двузубой фрезой диаметром 16 мм. Для чистовой обработки карманов производилась цельнотвердосплавной трёхзубой фрезой диаметром 16 мм. Для всех фрез охлаждение производилось сжатым воздухом. В ходе эксперимента проводились тесты с варьированием режимов резания в пределах, указанных в табл. 3.

Таблица 3

Диапазоны режимов резания

Фреза	D_c	z	V_c	a_e	a_p	n	f_z
R790-040HA06S2-16M	40	3	1000 – 3000	40	4	7957 – 23873	0,1 – 0,4
R790-025HA06S2-16L	25	2	1000 – 2150	25	4	12732 – 27374	0,1 – 0,4
Цельная двузубая	16	2	600 – 1400	16	3	11936 – 27852	0,1 – 0,3
Цельная трёхзубая	16	3	600 – 1400	0,5-1	15	11936 – 27852	0,1 – 0,16

Примечание: D_c – диаметр инструмента, мм; z – число зубьев инструмента; V_c – скорость резания, м/мин; a_e – ширина фрезерования, мм; a_p – глубина фрезерования, мм; n – число оборотов шпинделя, мин⁻¹; V_f – минутная подача, мм/мин; f_z – подача, мм/зуб; Q – объем снимаемой стружки, см³/мин

После обработки полученных результатов были построены графики зависимости удельной электрической проводимости от скорости резания и подачи на зуб [6]. Данные графики представлены на рис. 2 – 5.

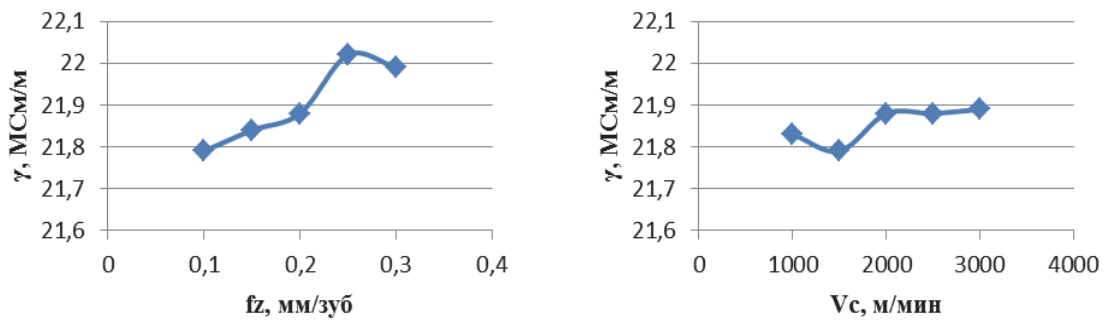


Рис. 2. Графики зависимости удельной электрической проводимости от подачи на зуб и скорости резания для фрезы R790-040HA06S2-16M

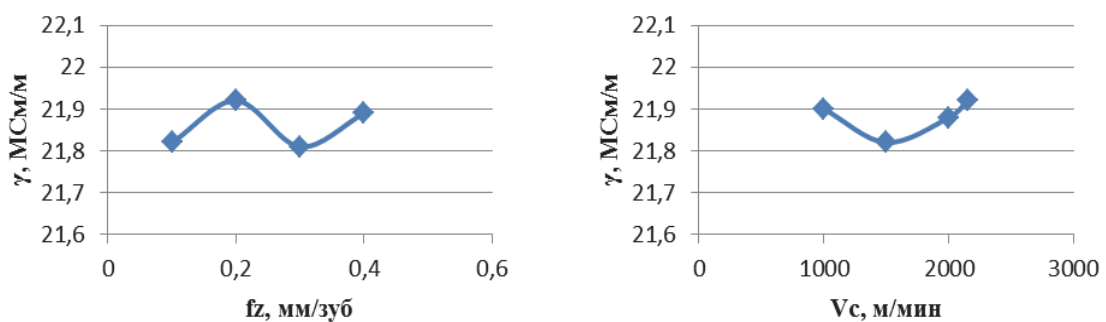


Рис. 3. Графики зависимости удельной электрической проводимости от подачи на зуб и скорости резания для фрезы R790-025HA06S2-16L

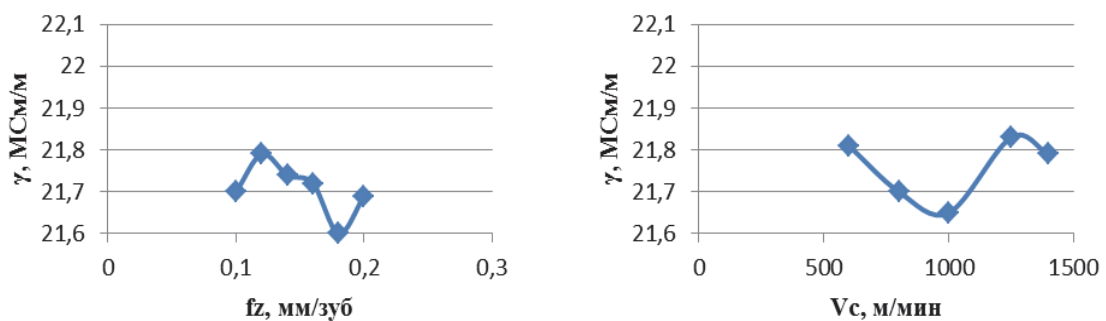


Рис. 4. Графики зависимости удельной электрической проводимости от подачи на зуб и скорости резания для цельнотвердосплавной двузубой фрезы диаметром 16 мм

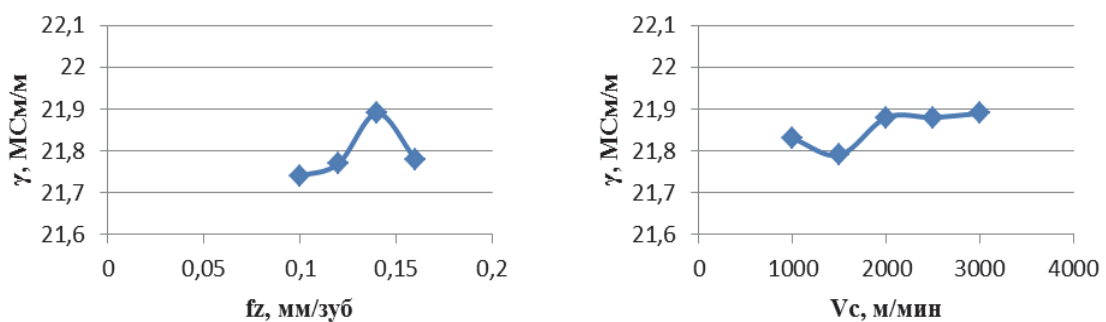


Рис. 5. Графики зависимости удельной электрической проводимости от подачи на зуб и скорости резания для цельнотвердосплавной двузубой фрезы диаметром 16 мм

Выводы

Анализ полученных зависимостей показывает, что изменения электропроводности незначительны во всех опытах и находятся в поле допуска отклонений удельной электрической проводимости для материала В95очТ2. Гипотеза об изменении электропроводности в местах обработки фрезой углов не подтвердилась, разброс значений электропроводности по всей траектории движения фрезы составил не более $\pm 3\%$. Замечено снижение электропроводности при обработке всеми типами фрез на скоростях резания, близких к 1000 – 1500 м/мин.

Возможно, что изменение электропроводности, обусловленное изменением режимов резания, сопоставимо с изменением электропроводности, обусловленным неоднородностью материалов и их механических свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маликов, В. Н. Дефектоскопия алюминий-магниевых сплавов методом вихревых токов / В. Н. Маликов, А. И. Зырянова // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6.
2. Пятых, А. С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процесса сверления / А. С. Пятых, А. В. Савилов // *Системы. Методы. Технологии*. – Братск, 2016. – № 2(30). – С. 69-73.
3. Пятых, А. С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки / А. С. Пятых, А. В. Савилов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2015. – Т. 17. – № 2(1). – С. 211-216.
4. Савилов, А. В. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования / А. В. Савилов, А. С. Пятых, С. А. Тимофеев // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2013. – Т. 15. – № 6(2). – С. 476-479.
5. Тимофеев, С. А. Зависимость электропроводности алюминиевых деталей от сил резания и температуры при высокопроизводительном фрезеровании / С. А. Тимофеев, А. В. Савилов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2015. – Т. 17. – № 6(2). – С. 530-534.
6. Ahmadi, K. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills / K. Ahmadi, A. Savilov // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2015. – Vol. 89. – P. 208-220.
7. Accuracy assessment of KUKA KR210 R2700 extra industrial robot / E. N. Semyonov, A. V. Sidorova, A. E. Pashkov, A. S. Belomestnykh // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2015. – Vol. 16. – P. 19-25.

Пронин А. И., Щелкунов Е. Б., Султангареева А. С., Латышев К. А., Иваненко А. А.
A. I. Pronin, Ye. B. Shchelkunov, A. Ye. Sultangareeva, K. A. Latyshev, A. A. Ivanenko

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ КРОНШТЕЙН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САД/САЕ СИСТЕМ

RESEARCH AND WORKING OUT OF THE BRACKET PART WITH CAD/CAE SYSTEMS

Пронин Александр Иннокентьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mdssov@knastu.ru.

Mr. Alexandre I. Pronin – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mdssov@knastu.ru.

Щелкунов Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

Mr. Yevgeny B. Shchelkunov – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Султангареева Алеся Евгеньевна – студентка кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

Ms. Alesya Ye. Sultangareeva – a student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

Латышев Кирилл Андреевич – студент кафедры «Технология металлов» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Kirill A. Latyshev – a student, Metal Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Иваненко Ангелина Александровна – студентка кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре).

Ms. Angelina A. Ivanenko – a student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В современных условиях жесткой конкуренции машиностроительные предприятия стремятся максимально использовать широкие возможности компьютеров в решении задач проектирования и производства изделий. Для автоматизации этих задач используются САД/САМ/САЕ системы. Цель работы – произвести экспресс-анализ детали кронштейн, заключающийся в оценке прочности разработанной конструкции по допускаемым напряжениям, определении наиболее слабых мест конструкции, возможности внесения необходимых изменений (оптимизации) в изделия. В качестве объекта исследования использовалась 3D модель детали кронштейн. Для проведения экспресс-анализа детали кронштейн использовался T-FLEX Анализ – это интегрированная с T-FLEX САД среда конечно-элементных расчётов. Модуль выполняет расчет на прочность конструкции под действием приложенных к системе сил. Результатом работы разработчика в модуле является получение оценки прочности спроектированной им конструкции по допускаемым напряжениям, определение слабых мест конструкции и изменение конструкции изделия, т.е. его оптимизация. Анализ результатов показал, что выполненные в результате изменения в конструкции детали привели к уменьшению модуля перемещений, эквивалентных напряжений, возникающих в детали, эквивалентных деформаций и привели к существенному увеличению коэффициента запаса по эквивалентным напряжениям.

Summary. In modern severe competition, engineering enterprises seek to maximize opportunities to use computers in designing and manufacturing products. To automatize these tasks one can use CAD/CAM/SAE systems. The

purpose of the work is to make rapid analysis of the bracket parts, which supposes assessing the durability of the developed design for allowable stresses, the determination of the weakest spots in the structure, the possibility of making the necessary changes in the product. A 3D model bracket parts present the object of investigation. For the rapid analysis of the bracket parts, the authors used T-FLEX Analysis that is an environment of finite-element calculations integrated with T-FLEX CAD. The module performs the calculation of the structure durability under the influence of forces applied to the system. The aim of the researcher in the module is to provide an estimation of durability of the developed design for the allowable stresses, the determination of the weakest spots in the structure and changes in the product, i.e. optimization. The analysis of the results showed that performed changes in the construction of parts have led to a decrease in the displacement module that is equivalent to stresses arising in the part, the equivalent strain and a significant increase of the equivalent stress.

Ключевые слова: метод конечных элементов, твердотельная модель, деталь, прочность, напряжение, статический анализ, конструкция, оптимизация, жесткость.

Key words: finite-element method, solid-state model, part, durability, voltage, static assaying, construction, optimization, hardness.

УДК 621.9

Введение

В современных условиях жесткой конкуренции машиностроительные предприятия стремятся максимально использовать широкие возможности компьютеров в решении задач проектирования и производства изделий. Для автоматизации этих задач используются CAD/CAM/CAE системы. Достижению высоких показателей качества изделий способствует широкое использование CAE-систем, которые ещё на стадии возникновения идеи о создании объекта производства и принятия предпроектных решений позволяют разработчику произвести целый ряд исследований. Можно моделировать условия работы создаваемого изделия и оценивать показатели, характеризующие технические возможности будущего изделия от воздействия различного рода внешних и внутренних факторов. Это особенно важно при создании сложных устройств, натурные испытания которых требуют огромных затрат и могут быть осуществлены только после завершения всех стадий проектирования и производства. Допущенные ошибки при создании таких объектов производства могут обернуться не только коммерческой неудачей, но и трагическими последствиями.

Для решения различных задач инженерных расчетов «Топ системы» предлагает специализированную среду конечно-элементных расчётов T-FLEX Анализ. Она характеризуется глубокой интеграцией с комплексом геометрических редакторов.

Цель работы – произвести экспресс-анализ детали кронштейн, заключающийся в оценке прочности разработанной конструкции по допускаемым напряжениям, определении наиболее слабых мест конструкции, возможности внесения необходимых изменений (оптимизации) в изделия.

Методика проведения исследования

В качестве объекта исследования использовалась 3D модель детали кронштейн. Деталь кронштейн является базовой деталью сборочного узла (см. рис. 1) и служит шаровой опорой ствола орудия. Она позволяет регулировать положение ствола в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Сборочный узел является основным несущим узлом и воспринимает силу отдачи при стрельбе. Разработка 3D модели выполнялась в CAD системе T-FLEX CAD.

Для проведения экспресс-анализа детали кронштейн использовался модуль системы T-FLEX Анализ. В модуле T-FLEX Анализ выполнялось математическое моделирование возникающих в процессе эксплуатации физических явлений, решались значимые задачи. В основе расчетов лежал метод конечных элементов. Вносимые изменения в геометрическую модель (параметрическую) автоматически переносились на сеточную конечно-элементную модель.

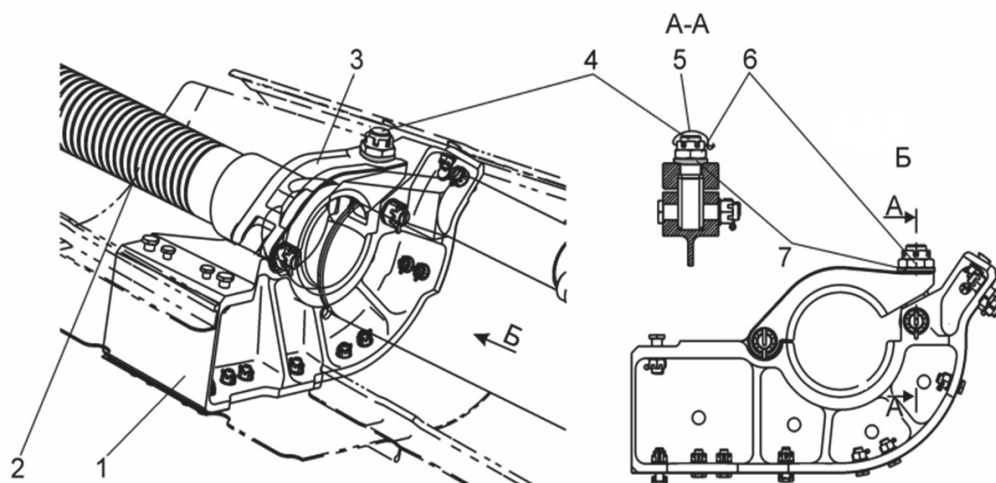


Рис. 1. Сборочный узел: 1 – кронштейн; 2 – ствол орудия; 3 – верхний хомут; 4 – серьга; 5 – контрольная булавка; 6 – прижимная гайка; 7 – сферическая гайка

В модуле выполнялся расчёт напряжённого состояния конструкции детали кронштейн под действием постоянных во времени сил, приложенных к системе. Расчет слабых мест детали и последующая оптимизация конструкции детали выполнялись по следующей методике [1; 2; 3]. Создавалась тетраэдральная конечно-элементная модель детали. Задавались граничные условия для расчета на прочность. Функцию граничных условий в статике выполняют закрепления и приложенные к системе внешние нагрузки. Формировалась система линейных алгебраических уравнений, выполнялось их решение. Опции расчета в диалоге свойства – задачи изменялись разработчиком самостоятельно. Результаты расчета отображались в дереве задач. Распределение сил воздействия оценивалось по цвету: красный показывает наибольшее воздействие, синий – наименьшее. Визуализация результатов осуществлялась в отдельном 3D окне T-FLEX CAD. Одновременно открывались несколько окон с результатами одной или разных задач. Разработчиком создавались независимые от T-FLEX Анализа электронные документы, содержащие основные сведения о рассчитанной задаче. Отчёт формировался в html-формате. Отчёт содержал основные сведения о модели, материалах, расчётной конечно-элементной сетке, а также цветные эпюры результатов, которые отображались в дереве задач или открывались в окнах визуализатора.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлена тетраэдральная конечно-элементная модель изделия. Выполнялась генерация сетки 3D модели. Относительный размер сетки менялся с целью добиться однородности распределения формы образующих сетку элементов. Относительный размер сетки равен 0,04. Стрелками показаны сгущения конечных элементов в модели, в которых можно ожидать концентрации напряжений.

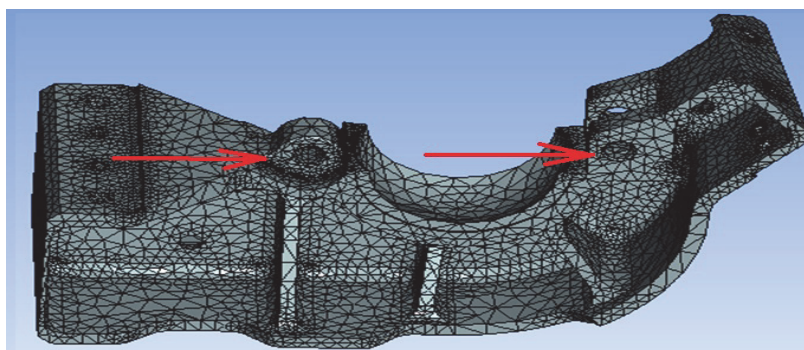


Рис. 2. Тетраэдральная конечно-элементная модель изделия

Для расчета на прочность были заданы граничные условия. Функцию граничных условий в статике выполняют закрепления и приложенные к системе силы воздействия (см. рис. 3).

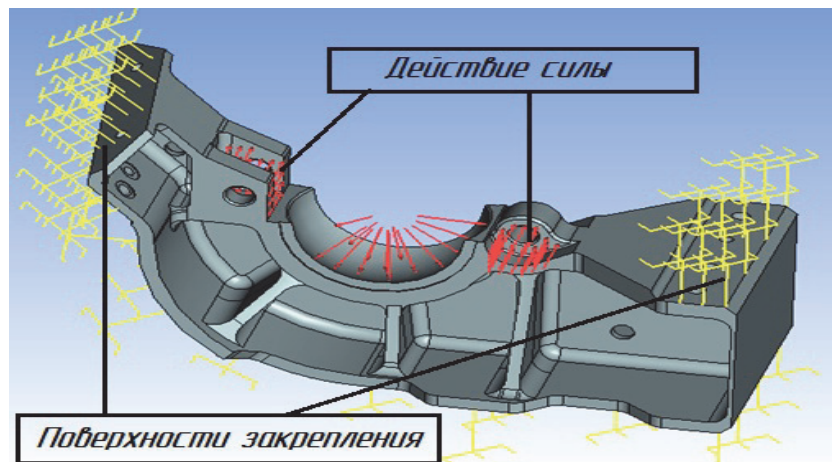


Рис. 3. Назначение условий закрепления и нагружения

Созданные силы равномерно распределялись по указанным граням детали. Силы направлены перпендикулярно к нагружаемым граням детали.

Из рис. 4 – 5 видно, что наибольшие по модулю перемещения будут иметь грани проушин кронштейна, а максимальные эквивалентные напряжения возникнут в месте крепления готового изделия. В полнофункциональной версии «Экспресс-анализ» были получены численные значения перемещений и напряжений, позволяющие изменить размеры кронштейна, добившись требуемой прочности и жесткости детали.

Задача: "Задача_3"
 Перемещения, модуль, м
 Масштаб перемещений: 423.96

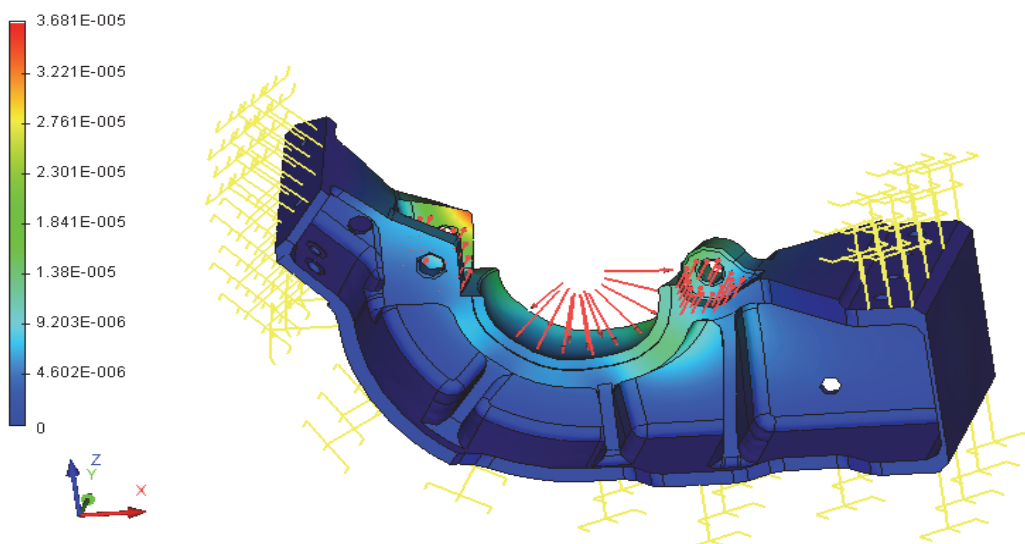


Рис. 4. Эпюра модуля перемещения

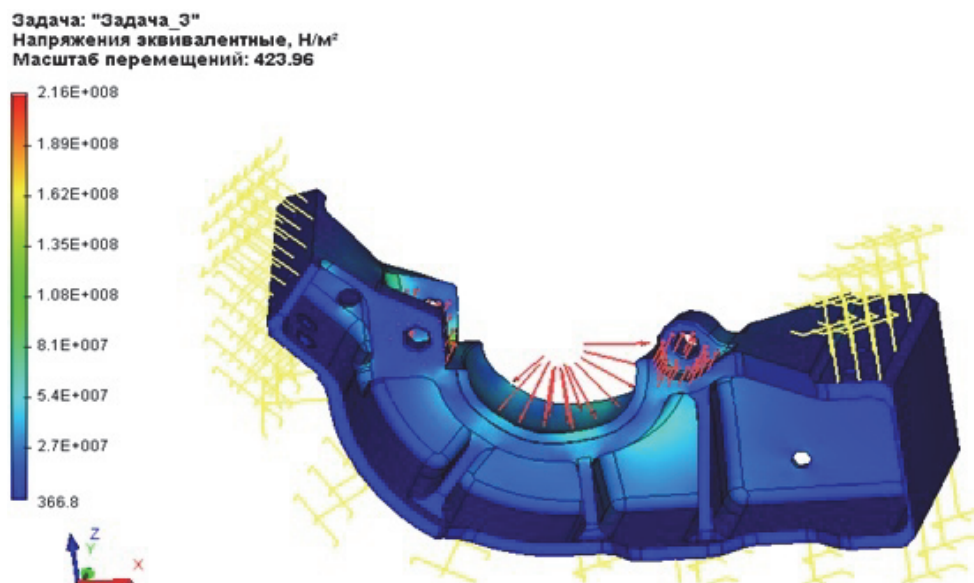


Рис. 5. Эпюра эквивалентных напряжений

На рис. 6 показана эпюра коэффициента запаса прочности по эквивалентным напряжениям. При этом после выбора коэффициента запаса по эквивалентным напряжениям в служебном окне «Задачи» укажем в окне «Параметры эпюры – коэффициент запаса», что запас прочности должен определяться по пределу текучести материала детали. Из результатов анализа можно сделать вывод о том, что кронштейн нагружен. Такие элементы детали, как «проушины», сильно нагружены. Если коэффициент запаса меньше 1, то произойдет разрушение.

Из рис. 4 – 6 видно, что наименее нагруженными являются ребра и основания кронштейна.

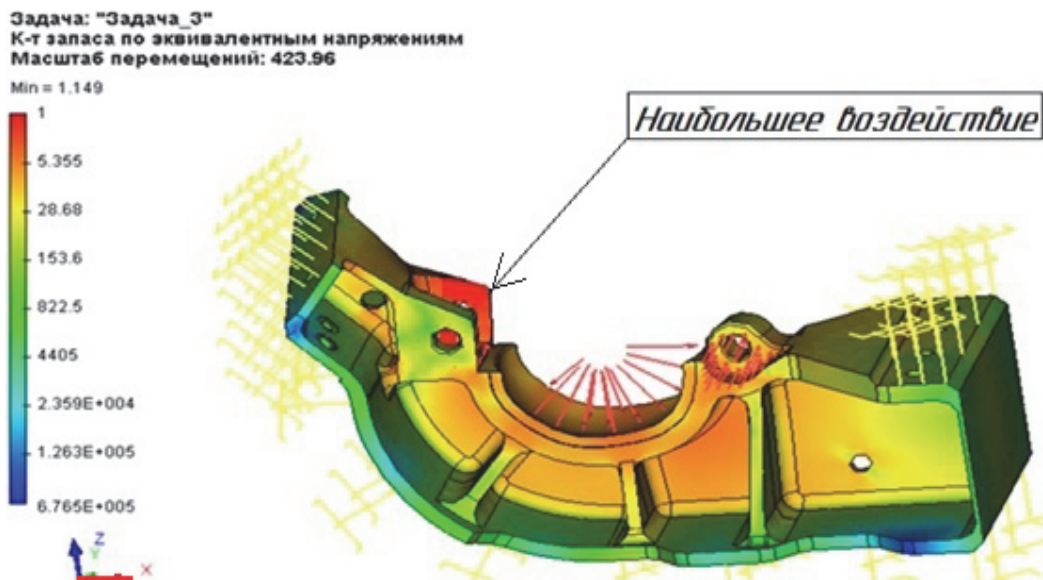


Рис. 6. Эпюра коэффициента запаса прочности по эквивалентным напряжениям

Оценив полученные результаты, делаем вывод, что необходимо оптимизировать конструкцию детали «Кронштейн». Было предложено увеличить на 4 мм толщину стенки «проушин». Конструкция детали после доработки была подвергнута статическому анализу.

После переразбиения модели вновь запустим расчет. Результаты анализа для модифицированной модели кронштейна приведены на рис. 7.

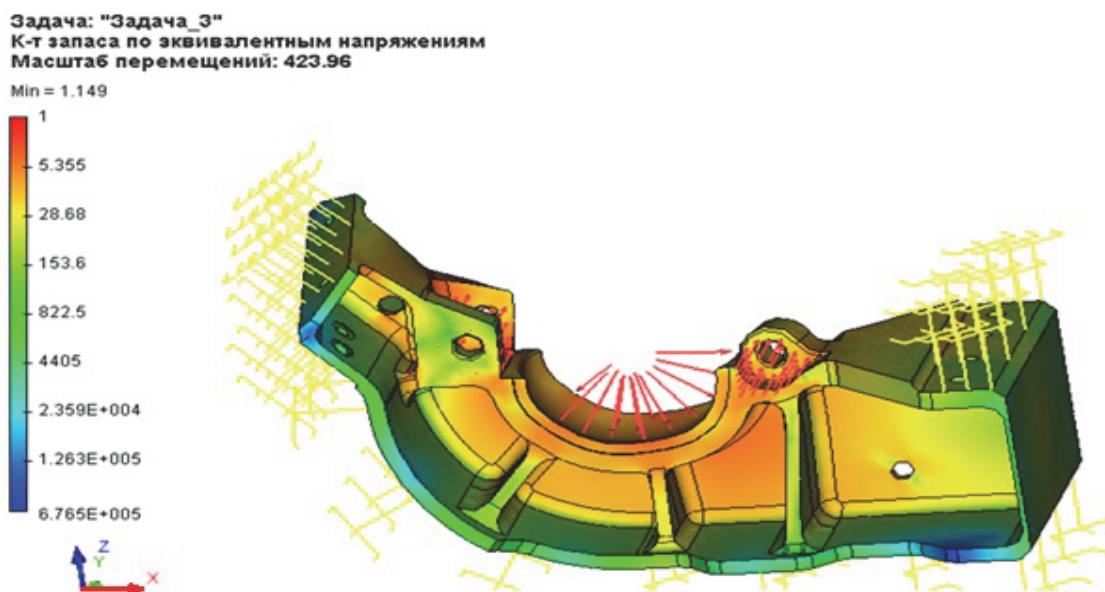


Рис. 7. Эпюра коэффициента запаса прочности по эквивалентным напряжениям

Анализ результатов отчета (см. рис. 7), показывает, что существенно улучшились характеристики коэффициента запаса по эквивалентным напряжениям. Таким образом, задачу оптимизации конструкции можно считать выполненной.

Заключение

Выполненный анализ позволил осуществить расчет напряженного состояния конструкции детали «кронштейн» под действием приложенных к ней сил с помощью модуля «Статический анализ». Была произведена оценка прочности разработанной конструкции по допускаемым напряжениям, определены наиболее слабые места конструкции, изменены размеры исследуемого изделия, обновлена конечно-элементная модель и сразу же получены результаты расчёта измененной модели. Данный анализ позволил в короткие сроки просчитать несколько вариантов конструкции и выбрать из них оптимальный.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек, А. В. Проектирование металлорежущих инструментов и технологической оснастки в T-FLEX CAD: учеб. пособие / А. В. Киричек, А. Н. Афонин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 158 с.
2. Устройство для ориентации заготовок / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, А. И. Пронин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ». – 2016. – № II-1(24). – С. 29-33.
3. Рулева, Н. Е. Современное направление в машиностроении – высокоскоростная обработка / Н. Е. Рулева // Международный журнал «Научный взгляд в будущее». – 2016. – Выпуск 2(2). – С. 133а.

ТЕЛЕГИН А. Н., САРИЛОВ М. Ю.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ЗА СЧЕТ ОБОСНОВАННОГО ВЫБОРА КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

Телегин А. Н., Сариллов М. Ю.
A. N. Telegin, M. Yu. Sarilov

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ЗА СЧЕТ ОБОСНОВАННОГО ВЫБОРА КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

THE EFFICIENCY INCREASE OF MASS EXCHANGE APPARATUS WITH THE HELP OF CONTACT DEVICES

Телегин Андрей Николаевич – магистрант кафедры «Машины и аппараты химических технологий» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ship.1994@mail.ru.

Mr. Andrey N. Telegin – Master's Degree student, Chemical Industry Machinery and Equipment Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ship.1994@mail.ru.

Сариллов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – D.Sc. in Engineering, Head of the Chemical Industry Machinery and Equipment Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Аннотация. В процессе выбора контактного устройства в массообмене обычно используется устройство, которое позволяет повысить выработку определенного продукта. Рассмотрим на примере получения продуктов нефтегазового комплекса. Во время проектирования колонн тарельчатого типа для проведения массообменных процессов в нефте- и газоперерабатывающей промышленности особое внимание уделяется выбору контактных элементов. Оптимальный подбор конструктивных параметров тарелки и направления движения потоков дает возможность создать такие гидродинамические условия проведения процесса массообмена, при которых достигается минимальное значение брызговывнесения, равномерное распределение жидкости между тарелками, эффективное контактирование сплошной и дисперсной фаз.

Summary. In the process of selecting a contact mass exchange apparatus the device which can increase the production capacity is commonly used. The authors consider the example of producing oil and gas products. During the designing of plate-type columns for mass exchange processes in the oil and gas processing industry the selection of the contact elements is focused on. Optimum selection of the design parameters of the plates and the flow streamline makes it possible to create such hydrodynamic conditions of the mass exchange process, in which the minimum value of splashing removal is achieved, as well as even distribution of liquid between the plates, effective contacting of the continuous and dispersed phases.

Ключевые слова: массообмен, контактные устройства, аппарат, выбор, эффективность.

Key words: mass exchange, contact device, an apparatus, selection, efficiency.

УДК 650.98

Введение

Тенденция использования вихревых контактных устройств получила широкое внедрение в процессах абсорбции и ректификации [1]. В исследованиях в основном оценивается влияние способов создания закрученного газового потока на гидродинамику контактных ступеней и почти не уделяется внимание созданию новой организации движения потоков в пределах тарелки и в колонном аппарате [4]. Кроме того, недостаточно изучается вопрос влияния конструкции контактной ступени на эффективность сепарации брызг жидкости [6].

Целью написания статьи является обоснование возможности создания противоточного движения потоков на тарельчатых массообменно-разделительных контактных устройствах и разработка конструкции тарелки с новой организацией движения контактирующих потоков. Противоточное движение в противовес перекрестному [2] делает возможным равномерное распределение движущей силы на каждом из контактных устройств колонны [7]. К преимуществам предложенной схемы движения фаз относятся низкое гидравлическое сопротивление [5] и возможность работы колонны со значительными затратами в газовой и жидкой фазах [3].

Основные задачи работы:

- проведение экспериментальных исследований гидродинамики движения потоков в пределах массообменно-сепарационной секции с прямоточно-центробежными элементами, определение режимов работы тарелки и ее гидравлического сопротивления;
- компьютерное моделирование движения газового потока в пределах прямоточно-центробежного элемента, определение его основных геометрических характеристик;
- сопоставление результатов эксперимента и компьютерного моделирования с целью определения оптимальных условий создания противоточного движения потоков на тарелке;
- корректировка и дополнение методики гидродинамического расчета контактной ступени и конструктивного расчета колонны по результатам проведенных исследований;
- поиск оптимальных размеров контактной ступени в зависимости от нагрузок по сплошной и дисперсной фазам.

В ходе проведения экспериментальных исследований массообменно-сепарационной контактной ступени выделено четыре гидродинамических режима, которые отличаются степенью завихрения жидкости в прямоточно-центробежном элементе, характером движения жидкости в прямоточно-центробежном элементе, поведением жидкости на полотне контактной ступени и интенсивностью брызговынесения с контактной ступени.

При соотношении жидкости к газу $L/G = 0,6 - 0,7$ кг/кг объем жидкости, которая поступает к центральной части массообменного элемента полотна тарелки через трубку, частично диспергируется потоком газа (поскольку расход газа незначителен), а основной объем жидкости сливается по внутренней стенке контактной трубки массообменного элемента. Поток газа, в свою очередь, проходит через центральную часть контактной трубки массообменного элемента. Для данного режима характерно образование единичных пузырьков газа большого размера в слое жидкости; площадь соприкосновения фаз не развита; происходит неравномерный слив жидкости на расположенную ниже тарелку (см. рис. 1, а, режим 1).

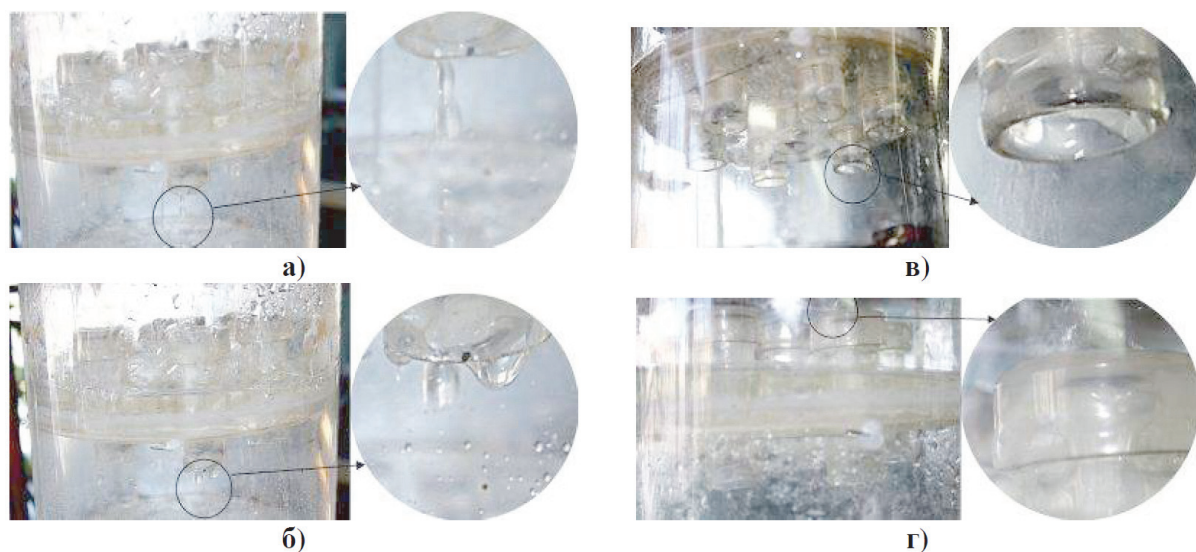


Рис. 1. Гидродинамические режимы работы тарельчатых массообменно-разделительных контактных устройств при соотношении жидкости к газу L/G , кг/кг:
 а – $L/G = 0,6 - 0,7$; б – $L/G = 1,0 - 1,1$; в – $L/G = 1,2 - 1,3$; г – $L/G = 1,4 - 1,5$

При существенном повышении соотношения жидкости к газу $L/G = 1,0 - 1,1$ кг/кг объем жидкости, которая поступает к центральной части массообменного элемента, в значительной по сравнению с предыдущим режимом мере диспергируется потоком газа, но жидкость еще частично сливается по внутренней стенке контактной трубки массообменного элемента в виде капель. Поток газа, в свою очередь, проходит сквозь слой жидкости с более интенсивным по сравнению с предыдущим режимом образованием вихрей, пузырьков газа и пены; площадь соприкосновения фаз более развита, чем в предыдущем режиме. При этом жидкость отдельными каплями стекает по внутренней стенке патрубка, а остальные жидкости сливаются через пленкосъемник (см. рис. 1, б, режим 2).

Гидродинамический режим с соотношением жидкости к газу $L/G = 1,2 - 1,3$ кг/кг характеризуется тем, что объем жидкости, которая поступает к центральной части массообменного элемента полотна тарелки через трубку, полностью диспергируется потоком газа, слив жидкости по внутренней стенке контактной трубки массообменного элемента отсутствует. Поток газа проходит сквозь слой жидкости с интенсивным вихреобразованием и образованием мелкодисперсных пузырьков газа и пены. Таким образом, площадь соприкосновения фаз наиболее развита. При этом жидкость стекает в виде пленки с пленкосъемника, а слив жидкости по внутренней стенке массообменного патрубка отсутствует. Этот режим является оптимальным (см. рис. 1, в, режим 3).

Дальнейшее увеличение соотношения жидкости к газу ($L/G = 1,4 - 1,5$ кг/кг) приводит к тому, что объем жидкости, которая поступает к центральной части массообменного элемента полотна тарелки через трубку, диспергируется в меньшей степени, чем при оптимальном режиме, поскольку газ проходит через слой жидкости в виде струй. Пленка жидкости, которая отбрасывается центробежными силами ко внутренней стенке контактной трубки массообменного элемента в результате завихрения потока, захватывается потоком газа и частично попадает в пленкосъемник вместе с газовым потоком, но большая часть пленки движется с потоком газа на вышерасположенную тарелку сквозь центральное отверстие верхней контактной трубки массообменного элемента, не попадая в пленкосъемник, то есть для данного режима характерно повышенное брызговынесение и значительное уменьшение площади соприкосновения фаз (см. рис. 1, г, режим 4).

При расчетах гидравлического сопротивления сухих тарелок следует руководствоваться полученными экспериментально значениями коэффициента сопротивления массообменно-сепарационных устройств $\xi = 3,5 - 6$ (см. рис. 2).

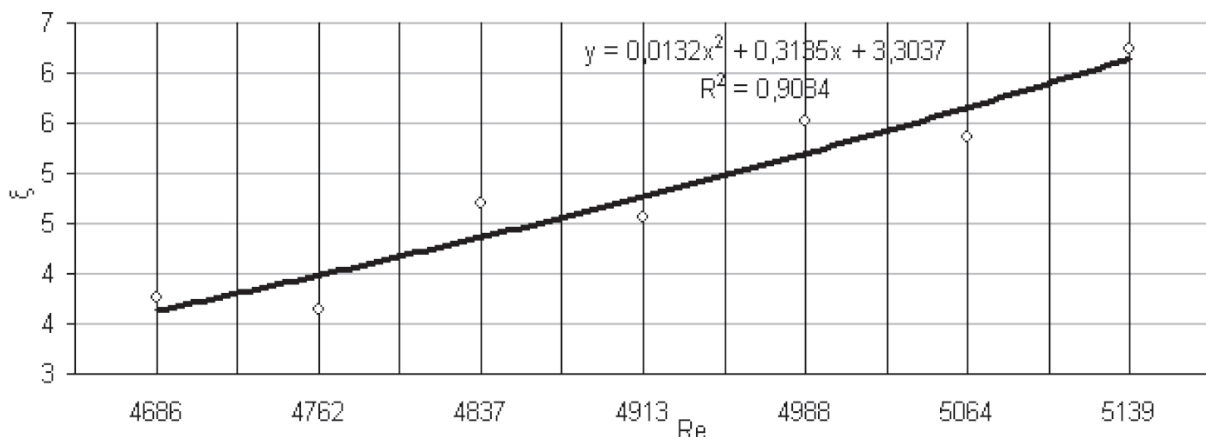


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления сухих тарелок от значения критерия Рейнольдса

Результаты, иллюстрирующие зависимость гидравлического сопротивления контактного устройства в каждом из исследуемых гидродинамических режимов, приведены на рис. 3.

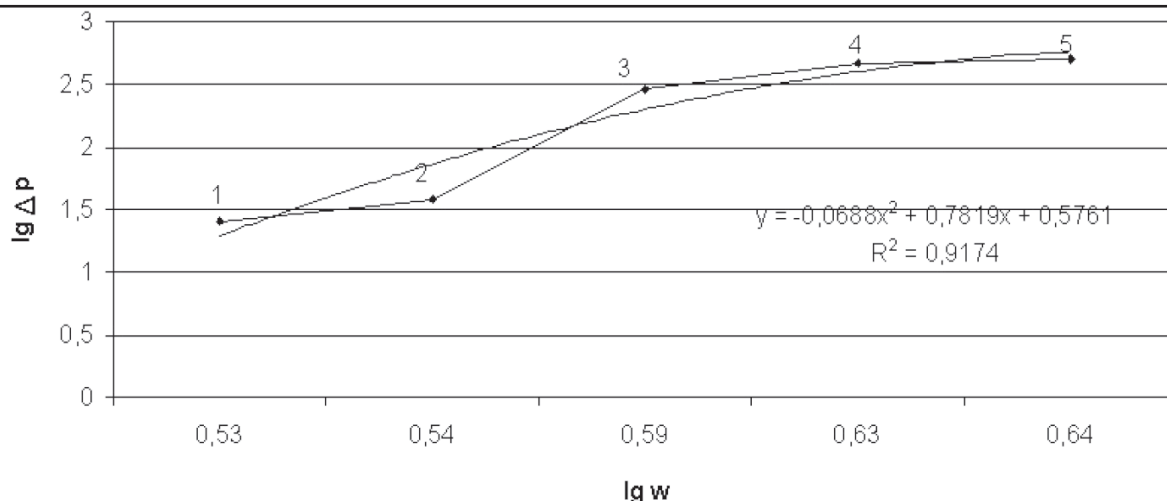


Рис. 3. Логарифмическая зависимость гидравлического сопротивления контактного устройства от скорости газа: 1-2 – режим 1; 2-3 – режим 2; 3-4 – режим 3; 4-5 – режим 4

Зависимость гидравлического сопротивления контактного устройства от соотношения расходов дисперсной (жидкость) и сплошной (газ) фаз показано на рис. 4. Диапазон устойчивой работы тарелки – второй режим.

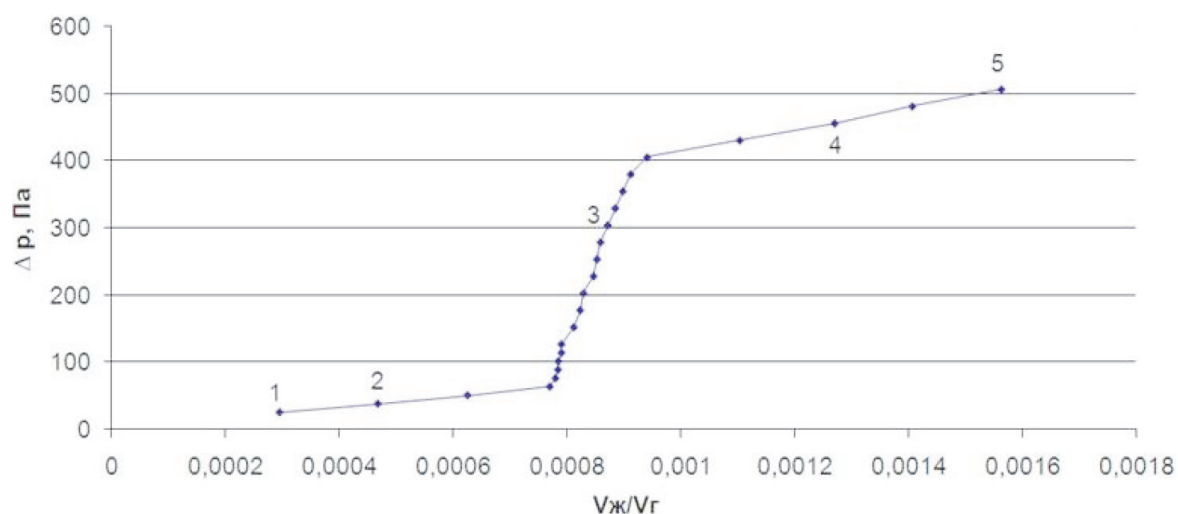


Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления контактного устройства от соотношения объемных расходов жидкости и газа: 1-2 – режим 1; 2-3 – режим 2; 3-4 – режим 3; 4-5 – режим 4

Рассмотреть условия создания противоточного движения фаз на отдельных контактных ступенях, а также основные гидродинамические закономерности движения высокотурбулентных потоков в прямоточно-центробежных элементах массообменно-сепарационных тарелок стало возможным способом математического (компьютерного) моделирования в среде программного продукта SolidWorks Simulation (<http://www.solidworks.com>). В процессе моделирования были испытаны различные варианты процесса с изменением конструктивных параметров контактного массообменно-сепарационного элемента. Смоделированные трехмерные модели течений газового потока с высокодисперсной капельной жидкостью по элементам массообменно-сепарационных устройств визуализированы методами компьютерной графики (см. рис. 5).

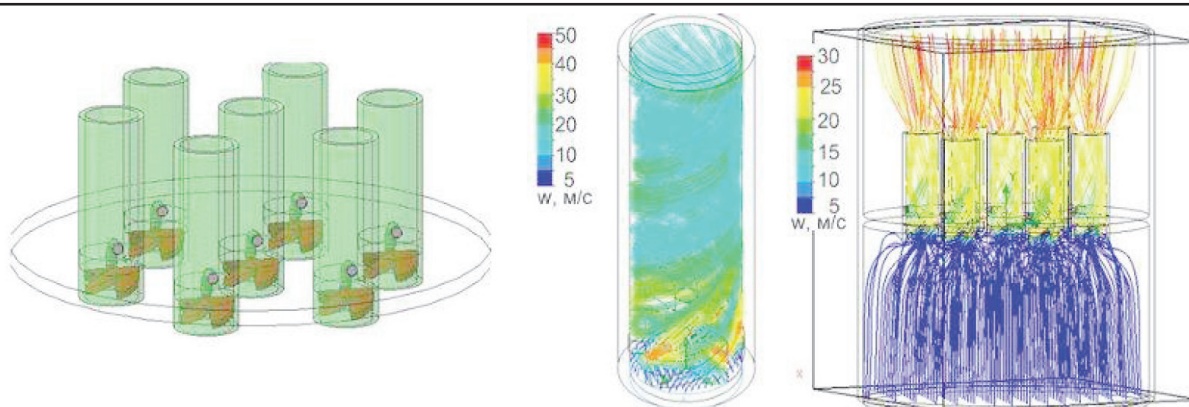


Рис. 5. 3D-модель тарелки с контактными элементами и траектории движения газового потока с заливками по значению локальных скоростей

Выводы

На основании теоретического анализа полученных результатов физических (экспериментальных) и математических (компьютерных) моделирований предложена новая полезная модель контактного устройства (тарелки) с массообменно-сепарационными элементами для колонных абсорберов осушки природного газа.

Внесены изменения в конструкции прямоточно-центробежного элемента (направленное стекание жидкости через пленкосъемник и сегментные отверстия в полотне тарелки), создаются выгодные условия для противоточного движения фаз на контактных тарелках и в пределах колонного аппарата.

Исследования гидродинамики таких аппаратов показали, что использование тарелок с противоточным движением фаз на контактных ступенях и прямоточным в центробежных массообменно-сепарационных элементах позволяет значительно увеличить поверхность контакта фаз и уменьшить брызговынесение. Внедрение противоточного движения в противовес перекрестному делает возможным более равномерное распределение и одновременное увеличение движущей силы на каждом из контактных устройств колонны. К преимуществам предложенной схемы движения фаз относится низкое гидравлическое сопротивление из-за условий работы колонны при значительных затратах по газовой и жидкой фазам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, М. А. Компьютерное моделирование жесткости несущих элементов контактных устройств массообменного аппарата / М. А. Антонов, Р. З. Латфуллин, И. А. Сабанаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 23. – С. 82-84.
2. Массообмен в насадочной колонне экстрактивной ректификации / И. В. Иванов [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50. – № 5. – С. 485-495.
3. Кологривов, М. М. Численное моделирование тепло- и массообмена в эжекционном аппарате / М. М. Кологривов, В. П. Бузовский // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89. – № 1. – С. 158-169.
4. Лапшина, С. В. Оценка прочностных характеристик оборудования / С. В. Лапшина, Е. М. Тупкина // В книге: V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ'16: сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. – 2016. – С. 89-90.
5. Лымбина, Л. Е. Особенности тепло- и массообменных процессов в технических водоемах // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов, ученых. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 160-163.
6. Фарахов, Т. М. Обобщенные гидравлические и массообменные характеристики новых контактных насадок колонных аппаратов / Т. М. Фарахов, М. М. Фарахов, Е. А. Лаптева // Химическая промышленность сегодня. – 2016. – № 2. – С. 50-56.
7. Фарахов, М. М. Конструирование высокоэффективных массообменных устройств газожидкостного контакта / М. М. Фарахов, Е. А. Лаптева // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – № 7-2. – С. 72-77.



Никитина Л. И.

L. I. Nikitina

**ИЗУЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН»
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**STUDING THEORY OF MECHANISMS AND MACHINES WITH THE HELP
OF MODERN EDUCATIONAL TECHNOLOGIES**

Никитина Любовь Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики Тюменского индустриального университета (Россия, г. Тюмень); 625013, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, д. 70, 8-912-926-41-61. E-mail: nikitina_love@bk.ru.

Ms. Lyubov I. Nikitina – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Applied Mechanics, Tyumen Industrial University (Russia, Tyumen); 70 50 October Str., Tyumen, zip code 625013, tel. 8-912-926-41-61. E-mail: nikitina_love@bk.ru.

Аннотация. При изучении дисциплины «Теория механизмов и машин» студенты сталкиваются с трудностями освоения материала в связи с высокой насыщенностью его формулами, чертежами, графиками. Ведущим звеном учебного процесса являются лекции. Разработаны электронные варианты лекционного материала и рабочие тетради по дисциплине. Наглядность материала в сопровождении лектора увеличивает восприятие нового материала у студентов.

Summary. In studying the discipline «Theory of mechanisms and machines», students have difficulties mastering the material due to the high saturation of its formulas, drawings, graphs. The leading element of the educational process is the lectures. Electronic versions of the lecture material and workbooks on the subject are created. Visual material, accompanied by a lecturer enhances the perception of the new material by the students.

Ключевые слова: теория механизмов и машин, мультимедийные презентации, увеличение наглядности, интенсификация лекций.

Key words: mechanisms and machines theory, multimedia presentations, increase the visibility, intensification of lectures.

УДК 621.01(076)

Современный человек живет в среде, насыщенной различными механизмами и машинами. Они окружают нас везде: дома, на транспорте, на отдыхе и, наконец, на производстве. Механизмы и машины преобразуют энергию, материалы и информацию с целью облегчения физического и умственного труда, увеличения его производительности и частичной или полной замены человека в его трудовых и физиологических функциях [1].

При создании новых механизмов и машин, прежде всего пространственных механизмов, роботов, манипуляторов, требуется развитие существующих и разработка новых инженерных методов их анализа и синтеза. В решении этих задач важнейшая роль принадлежит теории механизмов и машин, которая является научной основой создания новых высокоэффективных, надежных машин.

Теория механизмов и машин – это наука, изучающая структуру, кинематику и динамику механизмов и машин в связи с их анализом и синтезом [1].

Теория механизмов и машин является одной из важнейших дисциплин в подготовке инженеров. При изучении в вузах данной дисциплины ставятся следующие основные задачи:

- научить студентов общим методам метрического, кинематического и силового расчета механизмов и машин;

- научить студентов решать задачи синтеза механизмов, т.е. проектирования механизмов, удовлетворяющих заранее поставленным требованиям, и нахождению оптимальных параметров механизмов по заданным условиям работы.

Студенты при изучении дисциплины «Теория механизмов и машин» сталкиваются с трудностями при освоении материала в связи с высокой насыщенностью его формулами, чертежами, графиками. При этом студенты должны уметь использовать ранее изученные дисциплины: высшую математику, физику, теоретическую механику, инженерную графику, информатику. Это необходимо, чтобы осуществлять переход от рассмотрения абстрактного, общего к конкретному. Например, от материальной точки и абсолютно твердого тела – к звену механизма, от системы твердых тел - к механизму в целом, от дифференциальных уравнений движения материальной точки - к движению механической системы.

Ведущим звеном учебного процесса являются лекции. Перед преподавателем стоит задача донести сложный материал дисциплины до студентов доступно, понятно и интересно.

Для улучшения качества чтения лекций в последнее время часто используются новые образовательные технологии, а именно мультимедиа-технологии. Применение мультимедиа-технологий при чтении лекций обладает следующими достоинствами по сравнению с традиционной аудиторной формой обучения «мел – доска»:

- интенсификацией лекции, так как экономится время для написания материала на доске;
- использованием большого количества иллюстративного материала: анимации, рисунков, фотографий, графики, звукового сопровождения;
- постоянным обновлением;
- нелинейностью прохождения материала, то есть возможностью вернуться к материалу лекции на любом её этапе.

Нами разработан курс лекций по дисциплине «Теория механизмов и машин», включающий рабочую тетрадь [2] и 15 мультимедийных слайд – лекций в программе Microsoft Power Point. Слайд – лекции содержат определения, формулы, таблицы, рисунки, фотографии, анимационные примеры.

Рассмотрим построение лекции на примере изучения темы «Кинематическое исследование рычажных механизмов». В лекции рассматриваются вопросы определения скоростей V и ускорений a точек звеньев, угловых скоростей ω и угловых ускорений ε звеньев. Задачи решаются графоаналитическим методом, суть которого заключается в построении планов скоростей и ускорений звеньев механизма при определённых (заданных) положениях ведущего звена на основе заранее составленных векторных уравнений скоростей и ускорений звеньев механизма. Этот метод обладает простотой и наглядностью. На одном плане скоростей или плане ускорений можно определить скорости и ускорения (их величину и направление) множества точек механизма. Недостатком метода является то, что неточность построений приводит к значительным погрешностям в определении скоростей и ускорений.

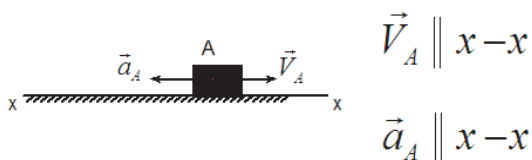
При чтении лекции традиционным способом, когда преподаватель чертит схемы на доске, а студенты перечерчивают их к себе в тетрадь, добиться точности построений и идентичности вычислений у студентов невозможно. Эти недостатки устраняются при чтении лекции по предложенной методике.

На I этапе данной лекции преподаватель демонстрирует слайды, на которых показано движение звеньев рычажных механизмов: поступательное – ползуна, вращательное – кривошипа и коромысла и плоскопараллельное – шатуна (см. рис. 1, а). На слайдах используется эффект анимации – все звенья двигаются. Поскольку данный материал изучался ранее в курсах физики и теоретической механики, проводится фронтальный опрос студентов на знание формул для определения скоростей и ускорений. Далее даются теоретические основы построения планов скоростей и ускорений.

а)

Определение скоростей и ускорений для различных видов движений

1. Поступательное движение (ползун по стойке)



б)

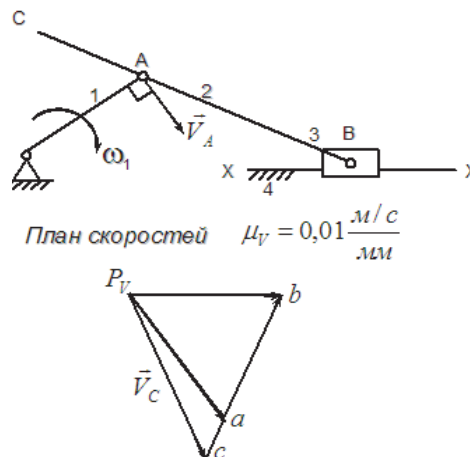


Рис. 1. Фрагменты лекции: а – демонстрация поступательного движения; б – построение плана скоростей

На II этапе идёт работа по закреплению рассмотренного материала на примерах. На слайде демонстрируется кривошипно-ползунный механизм, совершающий движение. Для заданного положения механизма необходимо определить скорости точек звеньев. Начинаем с определения скорости точки A , выбора масштаба для плана скоростей и определения отрезка для начала построений. Всё это демонстрируется на слайдах. Слушая объяснения преподавателя и следуя за построениями, которые выполняются на слайдах (см. рис. 1, б), студенты в рабочей тетради [2] строят план скоростей. Рассмотрим эту часть рабочей тетради (см. рис. 2). Под заголовком «План скоростей $\mu_v = 0,01 \frac{м/с}{мм}$ » оставлено сводное место для построений.

Пример 3.1. Выполнить кинематический расчёт кривошипно-ползунного механизма.

Дано:

1. Угловая скорость кривошипа является постоянной и равна $\omega_1 = 30c^{-1}$.
2. Размеры звеньев: $OA = 20$ мм, $AB = 76$ мм, $AC = 26$ мм.

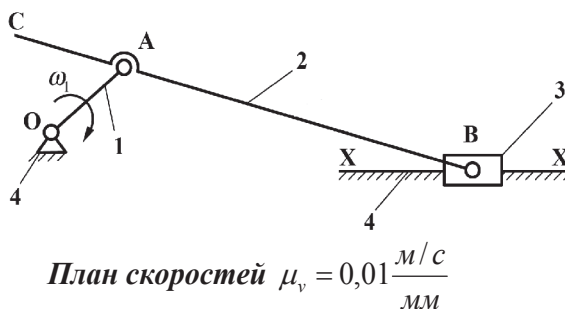


Рис. 2. Фрагмент рабочей тетради

На III этапе проводятся вычисления и осуществляется контроль полученных значений путем сопоставления с результатами преподавателя, который демонстрирует слайд с таблицей (см. рис. 3).

Скорость	Отрезок на плане	Направление	Величина отрезка на плане, мм	Масштабный коэффициент	Значение скорости, м/с
V_A	$p_V a$	$\vec{V}_A \perp OA$	60	$\mu_V = 0,01 \frac{м/с}{мм}$	0,6
V_B	$p_V b$	$\vec{V}_B // X - X$	52		0,52
V_{BA}	ab	$\vec{V}_{BA} \perp AB$	47		0,47
V_C	$p_V c$		70		0,70
ω_2	Против часовой стрелки				6,2 с⁻¹

Рис. 3. Фрагмент лекции. Результаты расчетов

В результате с помощью разработанного учебно-методического комплекса удалось:

- повысить уровень лекционных занятий по дисциплине «Теория механизмов и машин»;
- улучшить восприятие студентами учебного материала, так как мультимедийные лекции содержат много графики, видео, фотографий, анимации;
- использовать презентации для контроля, закрепления, повторения пройденного материала;
- привлечь студентов к подготовке демонстрационного материала для лекций: схем механизмов, видео, демонстрирующих работу механизмов и машин, способов изготовления зубчатых колес и т.д.

Данная методика применяется и для самостоятельного изучения дисциплины, например для студентов, обучающихся дистанционно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин: учебник для студентов вузов / И. И. Артоболевский. – М.: Альянс, 2014. – 640 с.
2. Никитина, Л. И. Теория механизмов и машин: рабочая тетрадь / Л. И. Никитина. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 116 с.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS

Велесевич Е. В., Лихачёв Е. А.
E. V. Velevich, E. A. Likhachev

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НАПЛАВОЧНЫМИ
ЭЛЕКТРОДАМИ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
РЕГИОНА**

**RESEARCH OF COATING PROPERTIES, OBTAINED WITH WELDING ELECTRODES
FROM MINERAL RAW MATERIALS OF THE FAR EAST REGION**

Велесевич Евгений Владимирович – старший преподаватель, Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, г. Хабаровск); тел.: 8(924)107-57-57. E-mail: duomatic.spm@yandex.ru.
Velevich Evgeny Vladimirovich – senior lecturer, Far East state transport university (Russia, Khabarovsk); tel.: 8(924)107-57-57. E-mail: duomatic.spm@yandex.ru.

Лихачёв Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, г. Хабаровск); тел.: 8(924)215-73-40. E-mail: likhachev_e@mail.ru.

Likhachev Evgeny Aleksandrovich – PhD in Engineering, Associate Professor, Far East state transport university (Russia, Khabarovsk); tel.: 8(924)215-73-40. E-mail: likhachev_e@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения метода симплекс-планирования при разработке состава электродного покрытия, пригодность которого доказана авторами экспериментальным путем. Установленные связи между входными и выходными параметрами могут иметь практическую значимость – при создании покрытия, позволяющего формировать наплавленные слои с заданными свойствами.

Summary. The article discusses the possibility of using the method of simplex planning while developing composition of the electrode coatings, which suitability is proven by the authors experimentally. The significance of the set connections between input and output parameters can be of practical value, i.e. when creating the coating that allows the deposited layer formation with desired properties.

Ключевые слова: наплавочные электроды, электродные материалы, минеральное сырье, симплекс-планирование.

Key words: welding electrodes, electrode materials, mineral raw materials, the simplex planning.

УДК 621.791.92:621.791.5.042.4:553.04:519.852.61

При изготовлении наплавочных электродов используют две группы материалов: металлические и неметаллические. К первой группе относятся собственно электродные (переплавляемые), которые являются основой швов и покрытий, и присадочные, выполняющие функции раскислителей и легирующих добавок. Вторая группа обеспечивает защиту расплавленного металла сварочной ванны от вредного воздействия атмосферы и совместно с первой группой формирует состав и свойства наплавляемого материала, при этом происходит окисление или легирование его. Существенное влияние на составы сплавов, получаемых при наплавке, оказывает основа изделия (подложка), на которую наносится материал электрода [1, 129].

При создании наплавочных материалов в качестве электродных нами использовалась сварочная проволока Св-08 А диаметром $d = 3$ мм (см. табл. 1), а для приготовления шихты обмазочного слоя применялись шеелитовый и бадделеитовый концентраты, содержащие оксиды легирующих элементов (см. табл. 2). Для регулирования вязкости шлаковой ванны, увеличения степени ее неравновесности, очищения наплавляемого металла от вредных примесей использовался плавиновошпатовый концентрат (флюорит), выпускаемый Ярославским горно-обогатительным комбинатом Приморского края (см. табл. 3). При этом доля флюорита в шихте сохранялась посто-

янной. Химический анализ концентратов выполнен на рентгеновском спектрометре «Спектроскан МАКС-GV» НПО «Спектрон» (Россия, Санкт-Петербург).

Таблица 1

Химический состав стали электродного сердечника

Марка проволоки	Состав, масс.%						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
						не более	
Св-08А	≤0,10	≤0,03	0,35...0,06	≤0,12	≤0,25	0,03	0,03

Таблица 2

Химический состав легирующих концентратов

Концентрат	Состав, масс.%														
	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	Na ₂ O	K ₂ O	WO ₃	ZrO ₂	B ₂ O ₃	Пр.
Шеелитовый	2,9	26,8	1,6	–	–	0,2	0,6	3,8	1,7	0,3	0,1	59,5	–	–	2,5
Бадделеитовый	30,2	4,1	7,4	0,3	1,4	0,1	0,4	1,7	–	0,1	–	–	49,7	–	4,6

Таблица 3

Химический состав плавленого шпата

Концентрат	Состав, масс.%					
	CaF ₂	SiO ₂	CaCO ₃	S	P	Пр.
Плавленый шпат	90	5,1	3,2	<0,1	<0,01	1,6

В качестве подложек для проведения экспериментальных исследований выбраны конструкционные стали (см. табл. 4), причем сталь 30ХГС рекомендована «Специализированной путевой машинной станцией № 317» г. Хабаровска, из которой изготавливаются футеровки щебнеочистительных машин СЧ-601. Анализ химического состава футеровок также проводился на рентгеновском спектрометре «Спектроскан МАКС-GV».

Таблица 4

Химический состав сталей, используемых в качестве подложек

Марка стали	Химический состав, масс.%							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P
							не более	
Ст.3	0,18...0,20	≤0,07	0,30...0,50	–	–	–	0,045	0,045
30ХГС	0,28...0,35	0,90...1,2	0,80...1,10	0,80...1,10	не более 0,3	не более 0,3	0,035	0,035

Шихта обмазок электродов изготавливались по схеме (см. рис. 1). Сыпучие и комковые компоненты после промывки, дробления и сушки измельчались и разделялись на необходимые фракции [2, 60].

Для разрушения органических флотоагентов порошок плавленого шпата прокаливался при температуре T = 550...600 °С. После дозировки компонентов в соответствии с

рассчитанной рецептурой сухая смесь шихты в течение часа подвергалась перемешиванию в смесителе.

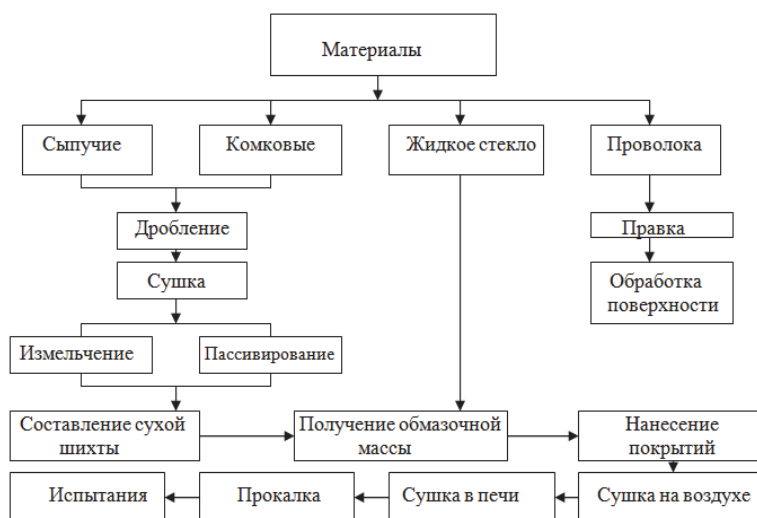


Рис. 1. Схема процесса изготовления наплавочных электродов

После перемешивания шихты с жидким стеклом масса наносилась на стержень по принципу экструзии (опрессовки) на электрообмазочном прессе ПЭ-6 усилием 160 т, предназначенном для изготовления металлических электродов. Подача прутков в обмазочную головку пресса осуществлялась прутковым питателем ПП-800 ООО «Ротэкс». Готовые электроды просушивались, выстаиваясь при комнатной температуре, затем прокаливались в печи при $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исследования качественных и количественных характеристик электродов и наплавленного металла основывались на кибернетической модели объекта исследования (см. рис. 2). Головной эксперимент, план которого приведен в [3, 193], позволил выявить зависимость системы «состав – свойства». Входные воздействия и значение откликов системы представлены в табл. 5.



Рис. 2. Модель объекта исследования

Входными параметрами модели были приняты углерод C (x_1), концентраты: шеелит (x_2) и бадделеит (x_3); а за выходные – твердость и износостойкость (относительно стали 40ХН, закаленной и отпущенной на твердость 41-43 HRC), которые являются одними из важных свойств элементов рабочих органов различных машин и оборудования. Твердость измерялась на автоматизированном стационарном твердомере по Роквеллу ТН-300, а износостойкость формируемых покрытий – на машине для испытания материалов на трение и износ ИИ 5018.

План и результаты экспериментов

Номер опыта	План			Отклики						Обозначения откликов
	X ₁ Графит	X ₂ Шеелит	X ₃ Бадделейт	Твердость у _{НВ} , НВ			Коэффициент износостойкости у _{ки}			
				первое определение	второе определение	среднее значение	первое определение	второе определение	среднее значение	
1	1	0	0	506	518	512	0,921	1,079	1	Y ₁
2	0	1	0	129	133	131	0,754	0,76	0,757	Y ₂
3	0	0	1	128	134	131	0,669	0,325	0,497	Y ₃
4	1/3	2/3	0	493	495	494	1,598	1,868	1,733	Y ₁₂₂
5	1/3	0	2/3	539	571	555	1,071	0,879	0,975	Y ₁₃₃
6	0	1/3	2/3	417	413	415	0,936	0,966	0,951	Y ₂₃₃
7	2/3	1/3	0	416	414	415	0,962	0,94	0,951	Y ₁₁₂
8	2/3	0	1/3	94	98	96	0,1032	0,1428	0,123	Y ₁₁₃
9	0	2/3	1/3	146	140	143	0,59	0,78	0,685	Y ₂₂₃
10	1/3	1/3	1/3	450	438	444	1,06	1,022	1,041	Y ₁₂₃
11	11/20	2/5	1/20	539	551	545	1,063	1,2324	1,15	контрольная точка

Для системы с тремя входными факторами полином и формулы для определения коэффициентов имеют следующий вид:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &= y_1, \beta_2 = y_2, \beta_3 = y_3, \\ \beta_{12} &= 9/4(y_{112} + y_{122} - y_1 - y_2), \\ \beta_{13} &= 9/4(y_{113} + y_{133} - y_1 - y_3), \\ \beta_{23} &= 9/4(y_{223} + y_{233} - y_2 - y_3), \\ \beta_{123} &= 27y_{123} - 27/4(y_{112} + y_{122} + y_{223} + y_{233} + y_{133} + y_{113}) + 9/2(y_1 + y_2 + y_3), \\ \gamma_{12} &= 9/4(3y_{112} - 3y_{122} - y_1 + y_2), \\ \gamma_{13} &= 9/4(3y_{113} - 3y_{133} - y_1 + y_3), \\ \gamma_{23} &= 9/4(3y_{223} - 3y_{233} - y_2 + y_3), \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – содержание компонентов смеси ($\sum x_i = 1$); y_1, y_2, y_3, y_{123} и т.д. – значения откликов системы в узлах симплексной решётки, которые определяются опытным путем.

По формулам (2) были определены соответствующие коэффициенты полиномов, которые путем подстановки в выражение (1) принимают следующий вид:

– для твердости

$$u_{НВ} = 512x_1 + 131x_2 + 131x_3 + 913,5x_1x_2 + 420,75x_1x_3 + 51,75x_2x_3 + 1174,5x_1x_2x_3 + 445,5x_1x_2(x_1 - x_2) + 857,25x_1x_3(x_1 - x_3) + 317,25x_2x_3(x_2 - x_3); \quad (3)$$

– для коэффициента износостойкости

$$y_{ки} = x_1 + 0,757x_2 + 0,497x_3 + 2,14x_1x_2 + 0,911x_1x_3 - 1,064x_2x_3 + 1,861x_1x_2x_3 - 5,663x_1x_2(x_1 - x_2) - 1,132x_1x_3(x_1 - x_3) + 3,026x_2x_3(x_2 - x_3). \quad (4)$$

Адекватность полученных моделей была реализована двумя параллельными опытами в проверочной точке (см. табл. 5, опыт 11). Так как количество проведенных опытов $n < 30$, то справедливо использовать t-критерий Стьюдента [4, 221], который рассчитывался по формулам (5) и (7):

$$t_p = \frac{|y_o - y_p| \sqrt{r}}{\sigma\{y\} \sqrt{1 + \xi}}, \quad (5)$$

где y_p – предсказанное значение отклика в проверочной точке; y_o – экспериментальное значение отклика в проверочной точке; r – число параллельных опытов в проверочной точке; $\sigma\{y\}$ – среднеквадратическое отклонение опытных данных в проверочной точке; ξ – дисперсия предсказания значения отклика в проверочной точке, определяемая как

$$\xi = \sum C_i^2 + \sum C_{ij}^2 + \sum C_{ijk}^2, \quad (6)$$

где $C_i = 0,5x_i(3x_i - 1)(3x_i - 2)$, $C_{ij} = 4,5x_ix_j(3x_j - 1)$, $C_{ijk} = 27x_ix_jx_k$.

Результаты расчета коэффициентов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Расчетные коэффициенты для определения ξ в контрольной точке

Коэффициент	Значение коэффициента	Коэффициент	Значение коэффициента
C_1	-0,1251	C_{223}	0,018
C_2	-0,064	C_{122}	0,198
C_3	0,0786	C_{133}	-0,0096
C_{112}	0,6435	C_{233}	-0,0765
C_{113}	0,0804	C_{123}	0,297

Величина ошибки предсказанных выходов уравнением полинома рассчитана по формуле

$$\Delta = \pm \frac{t_p \sigma\{y\}}{\sqrt{r}} \xi^{1/2}. \quad (7)$$

Итак, с учетом $r = 2$, $\zeta = 0,58$, согласно (5), получено:

– для твердости $y_{нв}$: $\sigma\{y\} = 8$; $t_p = 0,32$;

– для коэффициента износостойкости $y_{ки}$: $\sigma\{y\} = 0,085$; $t_p = 0,58$.

Так как экспериментальные значения t-критерия Стьюдента не превосходят соответствующее табличное значение ($t_{0,05;1} = 12,71$ [4, 359]), то установленная модель третьего порядка адекватно описывает экспериментальные результаты, а следовательно, может быть использована для формирования контурных карт. Контурные карты для твердости $y_{нв}$ и коэффициента износостойкости $y_{ки}$ приведены на рис. 3 – 6.

При этом значения откликов рассчитывались с использованием программы MS Office Excel 2010, а построение контурных карт – программы STATISTICA 10 по сетке изменения входных параметров с шагом варьирования 0,05.

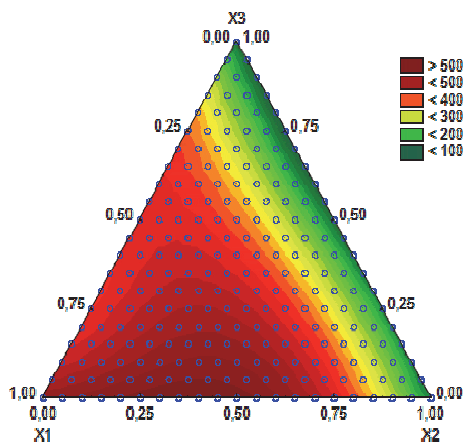


Рис. 3. Контурная карта для поверхности отклика твердости $УНВ$

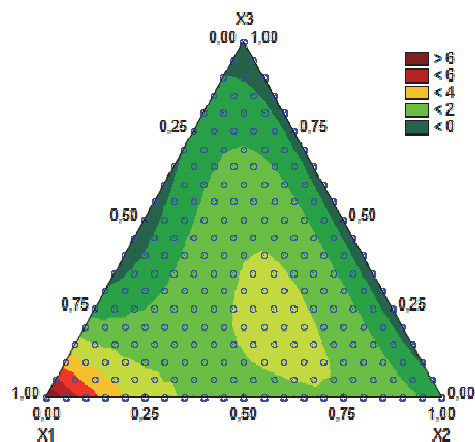


Рис. 4. Контурная карта ошибок предсказанных значений твердости $УНВ$

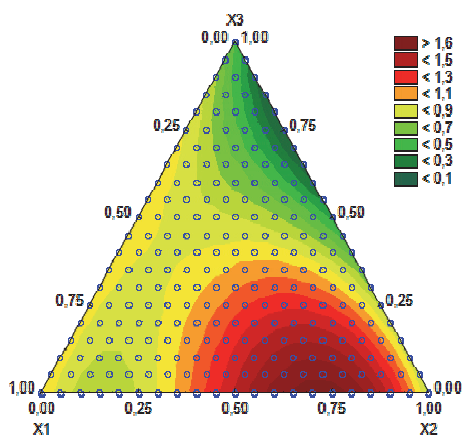


Рис. 5. Контурная карта для поверхности отклика коэффициента износостойкости $К_i$

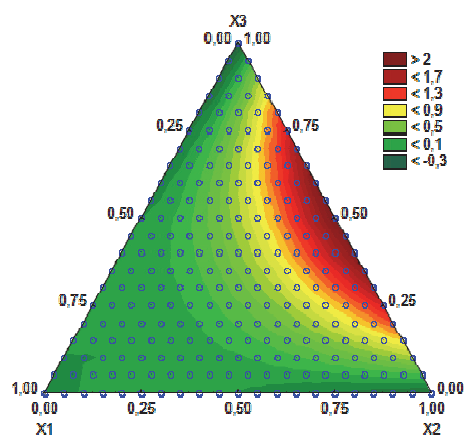


Рис. 6. Контурная карта ошибок предсказанных значений коэффициента износостойкости $К_i$

Полученные контурные карты могут быть применены не только для выбора компонентов состава электродной обмазки, но и для решения обратной задачи – предсказание твердости и коэффициента износостойкости для обмазки определенного состава и доверительных пределов [5, 66].

Выводы

Применение методов планирования эксперимента при разработке составов электродных покрытий доказало свою пригодность. Установленные взаимосвязи между входными и выходными параметрами могут быть использованы для создания состава электродного покрытия, которое позволит формировать наплавленные слои с заданными свойствами.



ЛИТЕРАТУРА

1. Основные аспекты транспортного минералогического материаловедения: моногр. / Э. Г. Бабенко [и др.]; под ред. д.т.н., проф. Ю. Г. Кабалдина. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – С. 129.
2. Методология создания сварочных материалов: моногр. / А. Д. Верхотуров [и др.]; под ред. чл.-корр. РАН Б. А. Воронова. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009. – С. 60.
3. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – С. 193.
4. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 4-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 1972. – С. 221, 359.
5. Зедгинидзе, И. Г. Математическое планирование эксперимента для исследования и оптимизации свойств смесей / И. Г. Зедгинидзе. – Тбилиси: Мецниереба, 1971. – С. 66.

**Пячин С. А., Бурков А. А., Власова Н. М., Кириченко Е. А., Мокрицкий Б. Я., Зайкова Е. Р.
S. A. Pyachin, A. A. Burkov, N. M. Vlasova, Ye. A. Kirichenko, B. Ys. Mokritskii, E. R. Zaikova**

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И ЖАРСТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ Ti_3Al С ДОБАВКОЙ КАРБИДА БОРА

WEAR RESISTANCE AND HEAT RESISTANCE OF THE ELECTRIC SPARK COATINGS BASED ON Ti_3Al WITH THE ADDITION OF BORON CARBIDE

Пячин Сергей Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией функциональных материалов и покрытий Федерального государственного бюджетного учреждения науки, Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, г. Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153, тел. (4212)22-56-98. E-mail: pyachin@mail.ru.

Mr. Sergei A. Pyachin – PhD in Physical and Mathematical Sciences, associate Professor, head of functional materials and coatings laboratory, Institute of Materials, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, Tikhookeanskaya st., 153, tel.: (4212)22-56-98. E-mail: pyachin@mail.ru.

Бурков Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки, Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, г. Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153, тел. (4212)22-56-98. E-mail: burkovalex@mail.ru.

Mr. Alexander A. Burkov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, researcher, Institute of Materials, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, Tikhookeanskaya st., 153, tel.: (4212)22-56-98. E-mail: burkovalex@mail.ru.

Власова Нурия Мунавировна – кандидат технических наук, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки, Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, г. Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153, тел. (4212)22-56-98. E-mail: vlasova64@yandex.ru.

Ms. Nuriya M. Vlasova – PhD in Engineering, researcher, Institute of Materials, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, Tikhookeanskaya st., 153, tel.: (4212)22-56-98. E-mail: vlasova64@yandex.ru.

Кириченко Евгений Александрович – старший инженер, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, г. Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153, тел. (4212)22-56-98. E-mail: himicc@mail.ru.

Mr. Yevgeny A. Kirichenko – senior engineer, Institute of Materials, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, Tikhookeanskaya st., 153, tel.: (4212)22-56-98. E-mail: himicc@mail.ru.

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: boris@knastu.ru.

Mr. Boris Ya. Mokritskii – Doctor of Engineering, professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: boris@knastu.ru.

Зайкова Екатерина Романовна – магистр кафедры физика Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тихоокеанский государственный университет» (Россия, г. Хабаровск), 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, тел. (4212)22-43-47. E-mail: i2011023403@gmail.com.

Ms. Ekaterina R. Zaikova – Master's Degree student, Department of Physics, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, Tikhookeanskaya st., 136, tel. (4212) 22-43-47. E-mail: i2011023403@gmail.com.

Аннотация. Методом порошковой металлургии созданы электродные материалы из алюминидов титана Ti_3Al с добавкой карбида бора, которые были использованы для нанесения защитных электроискровых покрытий на титановый сплав ВТ20. Проведены испытания полученных интерметаллидных покрытий на истирание при трении с микроабразивным порошком, а также на жаростойкость при изотермическом нагреве в среде воздуха при 900 °С. Показано, что за счет нанесения покрытия на сплав ВТ20 удается повысить его износостойкость в 2,5 раза. Скорость высокотемпературного окисления титанового сплава с покрытием в 4 раза меньше, чем у непокрытого материала.

Summary. The titanium aluminide Ti_3Al electrode materials with a boron carbide addition were prepared by powder metallurgy and have been used for the electric spark deposition of protective coatings on titanium alloy VT20. The tests of the obtained intermetallic coatings for abrasion by friction with micro abrasive powder as well as oxidation resistance under isothermal heating in air at 900 °C were carried on. It is shown that by covering the alloy VT20 it is possible to increase its wear resistance by 2.5 times. The oxidation rate of coated titanium alloy was 4 times less than that of uncoated material.

Ключевые слова: электроискровое легирование, титановый сплав, алюминид титана, карбид бора, микроабразивный износ, жаростойкость, микротвердость.

Key words: electric spark deposition, titanium, titanium aluminide, boron carbide, micro abrasive wear, oxidation resistance, micro hardness.

УДК 621.762; 537.523.4

Введение

При использовании титановых сплавов в промышленности возникают проблемы, связанные с их высокой вязкостью при трении, сравнительно низкой жаростойкостью и высокотемпературным охрупчиванием [1; 2]. Традиционными способами устранения этих недостатков являются модифицирование состава и структуры титановых сплавов посредством выбора оптимальных условий литья и применения легирующих добавок [3; 4; 5], а также нанесение защитных покрытий [6]. Интерметаллиды как материал для нанесения защитных покрытий на титановые сплавы имеют ряд преимуществ, поскольку обеспечивают высокую адгезию с подложкой и повышают ее коррозионную стойкость. Среди подобного класса материалов особо следует выделить интерметаллиды бинарной системы Ti-Al, обладающие низкой плотностью, высокой прочностью, стойкостью к воздействию высоких температур и агрессивных сред [7]. Для нанесения Ti-Al покрытий используют различные физико-химические методы: вакуумно-дуговое испарение, ионную имплантацию, лазерную наплавку и др. [8; 9; 10; 11; 12]. Одним из перспективных методов для создания интерметаллидных покрытий является технология электроискрового легирования (ЭИЛ), которая основана на переносе металлов с анода на катод при циклическом воздействии электрических разрядов [13]. Электроискровые покрытия характеризуются однородностью состава поверхностного слоя за счет перемешивания металлов электродов в расплавленном состоянии и высокой адгезией с материалом подложки. Эффективность метода ЭИЛ для создания интерметаллидных покрытий подтверждается результатами наших предыдущих исследований по нанесению электроискровых покрытий из алюминидов на титановые сплавы ВТ20 и ВТ3-1 [14; 15]. Для улучшения характеристик электроискровых Ti-Al покрытий было предложено модифицировать электродный материал – алюминид Ti_3Al – посредством добавления в него тугоплавких соединений, таких как оксид алюминия, карбид вольфрама и карбид титана [16; 17]. Показано, что добавки оксида алюминия и карбида титана повышают износостойкость и жаростойкость таких покрытий. В данной работе изучено влияние добавки в Ti_3Al карбида бора, который является одним из перспективных материалов для упрочнения титановых сплавов [18]. Проведено исследование жаростойкости и износостойкости электроискровых покрытий из боросодержащего интерметаллидного сплава, осажденного на титановый сплав ВТ20 в среде аргона и азота.

Материалы и методы исследования

Электродные материалы (аноды) были получены методом порошковой металлургии из стружки технического титана (сплав ВТ1-0) и алюминиевой пудры ПАП-1 со средним диаметром частиц около 25 мкм. Титановую стружку размалывали в атмосфере аргона до среднего размера частиц 9 мкм. Порошки Ti и Al были взяты в мольных долях 3:1, к ним был добавлен порошок карбида бора B_4C в количестве 10 вес.%. Полученную смесь перемешивали в шаровой мельнице РМ 400 в течение 4 ч в аргоне при скорости вращения 250 об/мин, после чего она была спрессована и спечена при температуре 1400 °С в течение 3 ч в вакууме с последующим охлаждением в печи. Электроды были получены в форме брусков с размерами 4×4×40 мм, поэтому их можно было использовать без дополнительной обработки в качестве легирующих электродов – анодов.

Рентгеновская дифрактограмма электрода, изготовленного из Ti и Al с добавкой B_4C , показана на рис. 1. Установлено, что в процессе спекания формируются интерметаллиды Ti_3Al и Ti_2Al , а также диборид титана TiB_2 и карбид титана TiC, комплексный карбид титана-алюминия $Ti_4Al_2B_2$. Примечательно, что в полученном сплаве исходный карбид бора отсутствует. Данный факт объясняется протеканием твердофазной реакции $3Ti + B_4C \rightarrow 2TiB_2 + TiC$ в условиях продолжительной выдержки порошков при высокой температуре.

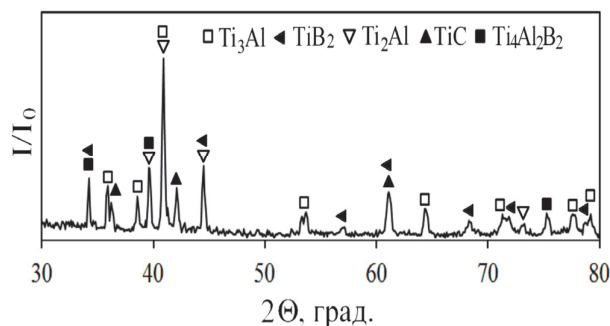


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы электродного материала из Ti_3Al с добавкой B_4C

Интерметаллидные покрытия были нанесены с помощью электроискровой установки IMES-40. Частота следования разрядных импульсов составляла 1 кГц, а длительность разрядов – 100 мкс. Амплитуда импульсов тока была 110 ± 10 А; межэлектродное напряжение – 30 ± 5 В, частота колебаний вибратора – 100 Гц. Покрытия осаждали на пластины из титанового сплава ВТ20 с размерами 10×10×5 мм при обдуве газом – аргоном или азотом. Количество перенесенного с анода на катод вещества контролировали посредством взвешивания электродов через каждую минуту электроискровой обработки на весах Vibra HT с точностью 10^{-4} г.

Фазовый состав полученных покрытий изучен с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в $Cu-K\alpha$ излучении. В целях идентификации линий рентгенограмм применялся программный пакет PDWin (НПП «Буревестник») и база данных PDF-2 Международного центра дифракционных данных (ICDD). Микроабразивная износостойкость и толщина покрытий были определены с помощью трибометра Calotester CSM instruments по схеме «вращающийся шар-плоскость» с применением порошка оксида алюминия в качестве абразивного материала. Стойкость полученных образцов к высокотемпературной газовой коррозии исследована с применением дифференциального сканирующего анализатора STA 449 F3 Jupiter посредством нагрева и изотермической выдержки образцов при 900 °С.

Результаты и обсуждение

Изучение кинетических закономерностей изменения масс электродов показало, что в процессе ЭИЛ масса анода уменьшалась, а масса катода увеличивалась (см. рис. 2), что является признаком электрической эрозии материала анода и переноса его на катод. При осаждении Ti_3Al-B_4C

сплава эрозия анода и привес катода в среде азота были меньше, чем в аргоне. Тем не менее средние значения толщин полученных покрытий примерно одинаковые – 25 – 27 мкм (см. табл. 1). Оптимальное время осаждения покрытия до наступления «порога хрупкого разрушения» не превышает 3 мин/см². Высокая скорость электроэрозии анодного материала 6 – 10 мг/мин обусловлена его низкой прочностью. Микроструктура электроискровых покрытий показана на рис. 3. Видно, что в покрытиях имеются поперечные трещины, а также хорошо различима граница между осажденным слоем и подложкой. Высокий градиент температур в области воздействия разрядов и сопутствующие термические напряжения растяжения являются основной причиной возникновения трещин в электроискровых покрытиях [19].

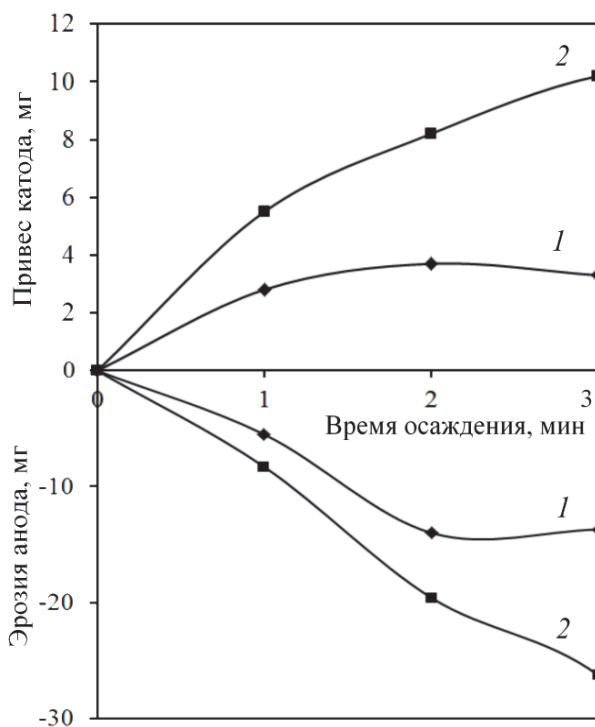


Рис. 2. Изменение масс электродов при электроискровом осаждении Ti_3Al с добавкой V_4C в (1) аргоне и (2) азоте

Таблица 1

Толщина и объем износа полученных электроискровых покрытий

Среда	Толщина, мкм	Износ*, мм ³
Аргон	27,1 ± 7	0,06 ± 0,01
Азот	25,7 ± 6	0,05 ± 0,03

*Износ сплава VT20 – 0,14 ± 0,02 мм³

Рентгенодифракционные исследования покрытия, нанесенного в аргоне, показали, что концентрация интерметаллида Ti_3Al в нем примерно такая же, как и в легирующем электроде (см. рис. 4, а). Однако следует отметить, что диборид титана TiB_2 , присутствующий в анодном материале, при взаимодействии с титановой подложкой частично трансформируется в моноборид титана TiB . При ЭИЛ в азоте в поверхностных слоях сплава VT20 в большом количестве образуется нитрид титана (см. рис. 4, б). Кроме того, наряду с алюминидом Ti_3Al обнаружен интерметаллид $AlTi$, а вместо боридов титана присутствует борид алюминия AlB_2 . Вероятно, это вызвано активным вза-

имодействием титана и азота с уменьшением концентрации титана в исходном интерметаллиде и высвобождением алюминия в условиях высоких температур, развиваемых в области воздействия электрических разрядов. МАХ-фаза $Ti_4Al_2C_2$, обнаруженная в электроде, не содержится в покрытиях, что объясняется ее разложением под действием высоких температур в области воздействия разряда и подтверждается нашими предыдущими работами [17]. В электроде и покрытиях не был обнаружен оксид алюминия, который часто формируется при нанесении электроискровых Ti-Al покрытий в среде воздуха, что может быть объяснено флюсующим действием бора.

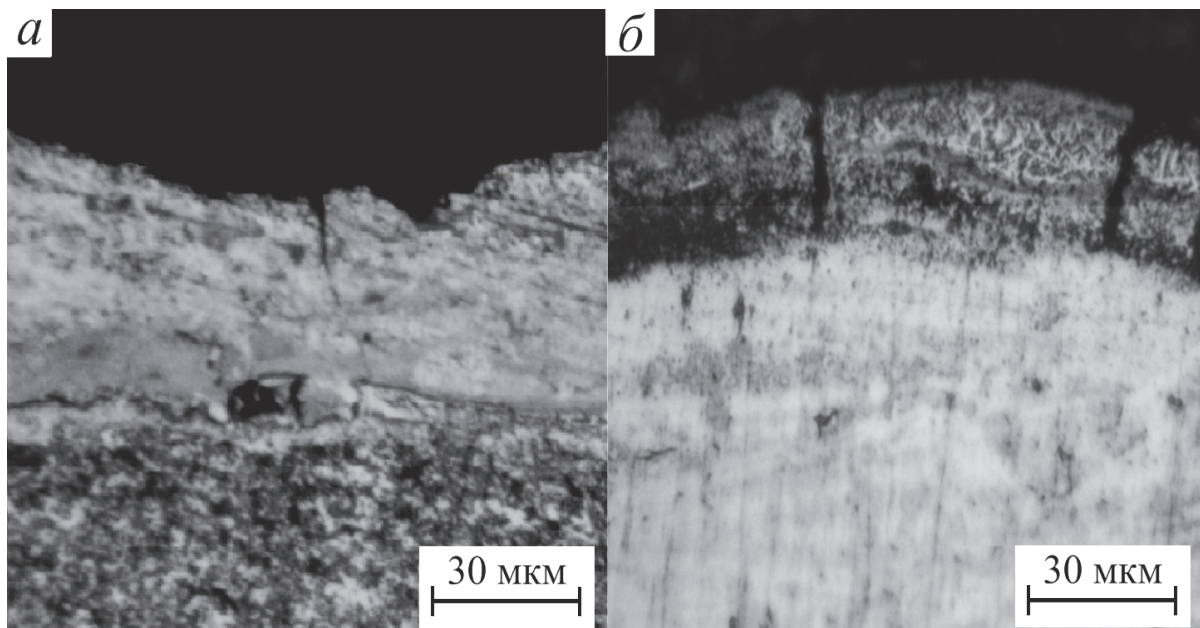


Рис. 3. Микрофотографии поперечных сечений титанового сплава ВТ20 с покрытиями, полученными в среде (а) аргона и (б) азота

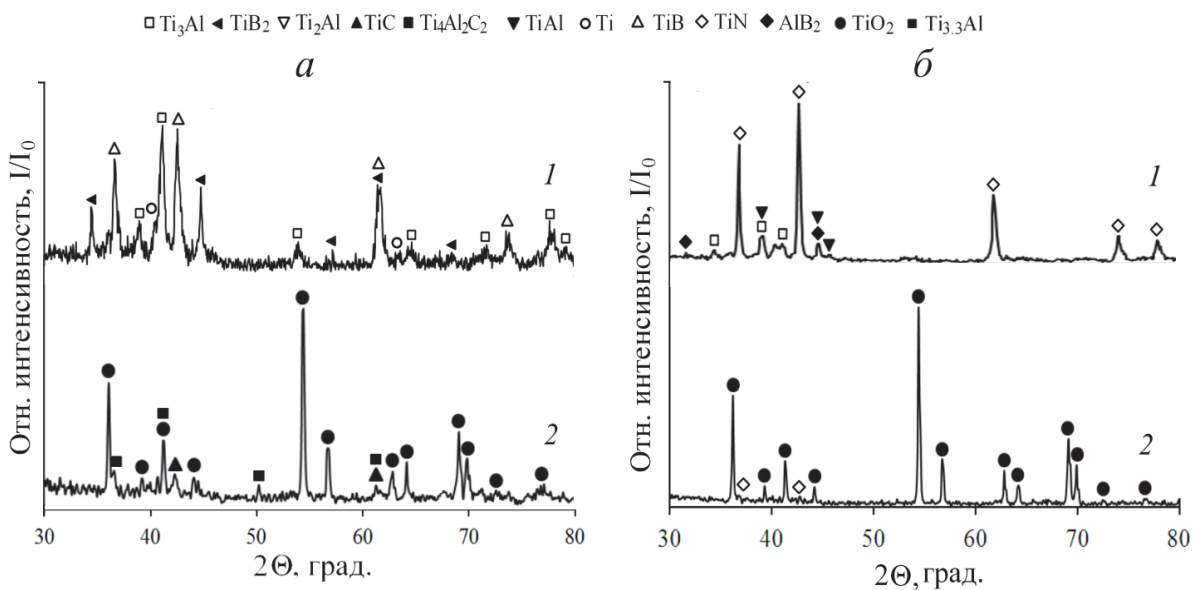


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы интерметаллидных покрытий, полученных в (а) аргоне и (б) азоте, без (1) и (2) после изотермического отжига при 900 °С

Результаты испытания полученных покрытий на микроабразивный износ приведены в табл. 1. Установлено, что нанесение интерметаллидных покрытий в среде аргона и азота позволяет

снизить износ титановой подложки в 2,3 и 2,7 раза соответственно. Наибольшая стойкость электроискровых покрытий, полученных в азоте, к микроабразивному изнашиванию обусловлена высокой твердостью нитрида титана, формируемого в процессе нанесения покрытий.

При продолжительном изотермическом нагреве титанового сплава ВТ20 с электроискровыми покрытиями в воздухе при $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается непрерывное увеличение массы испытуемых образцов (см. рис. 5), что объясняется окислением сплава, в результате которого образуется диоксид титана TiO_2 в структурной модификации рутила. На рентгеновских дифрактограммах, снятых после испытания на жаростойкость, линии рутила хорошо различимы (см. рис. 4). Покрытие, полученное в аргоне, характеризуется наименьшей скоростью окисления около $6,67\text{ мг}/(\text{мин}\cdot\text{м}^2)$. Она более чем в 4 раза меньше, чем скорость окисления титанового сплава ВТ20.

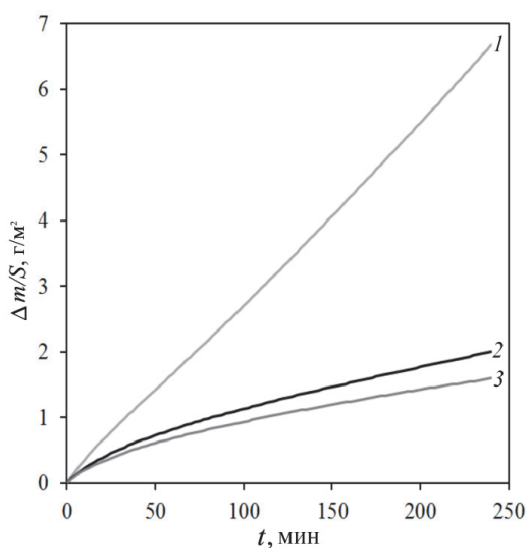


Рис. 5. Кинетика окисления образцов с покрытиями, осажденных в среде азота (2) и аргона (3) по сравнению с титановым сплавом ВТ20 (1)

Выводы

Методом порошковой металлургии получены электродные материалы на основе интерметаллида Ti_3Al с 10%-ной добавкой карбида бора. С их помощью были получены покрытия на титановом сплаве ВТ20 методом электроискрового легирования в среде аргона толщиной около 25 мкм. Анализ кинетики массопереноса показал, что наибольший привес катода достигается при электроискровом осаждении покрытий в среде аргона. В составе полученных покрытий вместо карбида бора наблюдались фазы боридов титана и алюминия. При осуществлении процесса в среде азота состав покрытий характеризовался высоким содержанием нитрида титана. Электроискровое осаждение покрытия из алюминида Ti_3Al с добавкой карбида бора на титановый сплав ВТ20 позволяет повысить его устойчивость к высокотемпературной газовой коррозии до четырех раз, а износостойкость поверхности титанового сплава – более чем в два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fretting Fatigue in Aircraft Components Made of Ti-Al-V Alloys / M. Sujata, M. Madan, K. Raghavendra, S. K. Bhaumik // Procedia Engineering. – 2013. – V. 55. – P. 481-486.
2. Горынин, И. В. Титан в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Имаев, В. М. Современное состояние исследований и перспективы развития технологий интерметаллидных $\gamma\text{-TiAl}$ сплавов / В. М. Имаев, Р. М. Имаев, Т. И. Оленева // Письма о материалах. – 2011. – Т. 1. – № 1. – С. 25-31.

4. Формирование термически стабильной структуры в титановом сплаве с повышенным содержанием алюминия при термоводородной обработке / А. А. Ильин, С. В. Скворцова, О. Н. Гвоздева, В. А. Пожого // Титан. – 2012. – № 2 (36). – С. 4-10.
5. Семенова, И. П. Наноструктурные титановые сплавы: новые разработки и перспективы применения / И. П. Семенова, Г. И. Рааб, Р. З. Валиев // Российские нанотехнологии. – 2014. – Т. 9. – № 5-6. – С. 84-95.
6. Исследование жаростойкости и кинетики изменения элементного состава композиции из титанового сплава ВТ4-1 с жаростойкими покрытиями / Д. А. Александров, С. А. Мубояджян, А. М. Гаямов, Д. С. Горлов // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № 5. – С. 61-66.
7. Wu, X. Review of alloy and process development of TiAl alloys / X. Wu // Intermetallics. – 2006. – V. 14. – P. 1114.
8. PalDey, S. Cathodic arc deposited thin film coatings based on TiAl intermetallics / S. PalDey, S. C. Deevi, T. L. Alford // Intermetallics. – 2004. – V. 12. – Iss. 7-9. – P. 985-991.
9. Influence of ion implantation on nanoscale intermetallic-phase formation in Ti–Al, Ni–Al and Ni–Ti systems / I. A. Kurzina, E. V. Kozlov, Yu. P. Sharkeev, A. I. Ryabchikov, I. B. Stepanov, I. A. Bozhko, M. P. Kalashnikov, D. O. Sivin, S. V. Fortuna // Surface and Coatings Technology. – 2007. – V. 201. – P. 8463-8468.
10. Adachi, S. Improvement of adhesive strength of Ti–Al plasma sprayed coating / S. Adachi, K. Nakata // Surface and Coatings Technology. – 2007. – V. 201. – P. 5617-5620.
11. Phase composition and tribological properties of Ti–Al coatings produced on pure Ti by laser cladding / B. Guo, J. Zhou, S. Zhang, H. Zhou; Y. Pu; J. Chen // Applied Surface Science. – 2007. – V. 253. – P. 9301-9310.
12. Синтез поверхностных сплавов на основе Ti_3Al и TiAl путем импульсного электронно-пучкового плавления системы Al(пленка)/Ti(подложка) / В. П. Ротштейн, Ю. Ф. Иванов, Ю. А. Колубаева [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – № 5. – С. 72-80.
13. Лазаренко, Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко, Б. Р. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – С. 12-16.
14. Пячин, С. А. Создание интерметаллидных покрытий электроискровым осаждением титана и алюминия на стальную подложку / С. А. Пячин, А. А. Бурков // Электронная обработка материалов. – 2015. – № 2. – С. 16-23.
15. Пячин, С. А. Формирование и исследование электроискровых покрытий на основе алюминидов титана / С. А. Пячин, А. А. Бурков, В. С. Комарова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – № 6. – С. 16-24.
16. Бурков, А. А. Повышение жаростойкости титанового сплава вт20 путем формирования композиционных электроискровых Ti_3Al+Al/Al_2O_3 покрытий / А. А. Бурков // Письма о материалах. – 2015. – Т. 5. – № 4 (20). – С. 371-375.
17. Влияние добавок оксидов и карбидов металлов на свойства интерметаллидных Ti_3Al электроискровых покрытий / С. А. Пячин, А. А. Бурков, Н. М. Власова, Е. А. Кириченко // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т. 13. – № 2. – С. 168-173.
18. Поверхностное упрочнение сплава ВТ6 электровзрывным легированием с карбидом бора и электронно-пучковой обработкой / Т. Ю. Кобзарева, В. Е. Громов [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 4 (69). – С. 102-112.
19. Galinov, I. V. Mass transfer trends during electrospark alloying / I. V. Galinov, R. B. Luban // Surface and Coatings Technology. – 1996. – V. 79. – № 1/3. – P. 9-18.



Дворник М. И., Михайленко Е. А., Мокрицкий Б. Я.
M. I. Dvornik, E. A. Mikhailenko, B. Ya. Mokritskii

ПОВЫШЕНИЕ ТВЕРДОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО СПЛАВА WC-8CO-0,4VC-0,4CR₃C₂ ЗА СЧЕТ КОРРЕКТИРОВКИ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ СПЕКАНИЯ

INCREASING HARDNESS AND FRACTURE TOUGHNESS OF ULTRAFINE ALLOY WC-8CO-0.4VC-0.4CR₃C₂ BY ADJUSTING THE CARBON CONTENT IN THE SINTERING INITIAL STAGE

Дворник Максим Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Хабаровск), тел (4212) 226-956. E-mail: Maxxxx80@mail.ru.

Mr. Maksim I. Dvornik – Ph.D. in Engineering, Institute of materials, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk), tel (4212) 226-956. E-mail: Maxxxx80@mail.ru.

Михайленко Елена Альбертовна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Хабаровск), тел (4212) 226-956. E-mail: Mea80@list.ru.

Ms. Elena A. Mikhailenko – Ph.D. in of Physical Mathematical Sciences, Institute of materials of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk), tel (4212) 226-956. E-mail: Mea80@list.ru.

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре), тел (4217)241-117. E-mail: boris@mastu.ru.

Mr. Boris Ya. Mokritskii – doctor of Engineering, Professor, Technology of mechanical engineering Department, Komsomolsk-on-Amur state technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), tel (4217)241-117. E-mail: boris@mastu.ru.

Аннотация. В работе проведены исследования по регулированию концентрации углерода в ультрамелкозернистом твердом сплаве WC-8Co-0,4VC-0,4Cr₃C₂ за счет обработки пористых заготовок в газовой смеси CO + CO₂ на начальной стадии спекания в течение 50 мин при температуре 650 °С. На основе зависимостей концентрации углерода в полученных образцах от концентрации CO в газовой смеси были определены условия увеличения и уменьшения концентрации углерода. Установлено, что восполнение недостатка углерода (0,37 масс.%) позволяет увеличить твердость (с HV1767 до HV1943) и трещиностойкость (с 5,8 до 8,4 МПа√м) ультрамелкозернистого твердого сплава WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂. Показано наличие градиента твердости по глубине образцов, полученных при обработке в смесях с наибольшей и наименьшей концентрациями CO. Построены зависимости твердости и трещиностойкости от содержания углерода в ультрамелкозернистом сплаве.

Summary. The authors present the adjustment of the carbon concentration in the ultrafine hard alloy WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ by treating porous work pieces in the gas mixture CO + CO₂ at an initial sintering stage during 50 minutes at 650 °C. Based on the dependencies of carbon concentration in the obtained samples from the CO volume concentration in the gas mixture the conditions for increasing and decreasing of carbon concentration were determined. It was revealed that the restoring of carbon lack (0,37 mass.%) can induce the rising hardness (from HV1767 to HV1943) and toughness (from 5.8 to 8.4 MPa√m) of ultrafine hard alloy WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂. The presence of hardness gradient depths for samples obtained by processing in the mixtures with the highest and the lowest concentration of CO is shown. The dependences of hardness and fracture toughness from the carbon content of the ultrafine alloys were drawn.

Ключевые слова: ультрамелкозернистый твердый сплав, содержание углерода, твердость, трещиностойкость.

Key words: ultrafine hard allot, carbon content, hardness, toughness.

УДК 621.762

Введение

Вольфрамкобальтовые твердые сплавы были и остаются наиболее распространенным материалом металлорежущих инструментов [1; 2]. Около 65 % всей стружки при механообработке снимается твердосплавным инструментом [3]. Повышение твердости производителями твердых сплавов за счет уменьшения среднего диаметра зерен привело к появлению ультрамелкозернистых и наноструктурных твердых сплавов [4; 5; 6], которые значительно превосходят мелкозернистые твердые сплавы по износостойкости [7; 8; 9; 10; 11]. Основным путем дальнейшего повышения твердости и износостойкости твердых сплавов остается совершенствование технологии спекания.

В процессе получения, хранения и транспортировки поверхность частиц может окисляться, что приводит к потере углерода при спекании [1; 12; 13; 14]. Для решения данной проблемы в процессе спекания можно добавить некоторое количество углерода путем подачи газа CO [15; 16]. Из-за более высокой скорости реакции на поверхности данный метод приводит к значительной неравномерности распределения углерода, которую можно устранить дополнительной выдержкой в CO₂. В данное время исследователи обратили внимание на то, что градиент содержания углерода по глубине образцов является перспективным способом создания функциональных градиентных твердых сплавов с управляемым распределением свойств [17; 18]. Управлять скоростью реакции и распределением углерода можно путем обработки образцов твердого сплава газовой смесью CH₄ + H₂ [19]. Перспективным способом управления распределением углерода может быть обработка в газовой смеси CO + CO₂. Экспериментальные данные о влиянии содержания CO на содержание углерода и свойства получаемых твердых сплавов отсутствуют. Также исследователями не рассмотрена возможность улучшения характеристик ультрамелкозернистого сплава за счет управления содержанием углерода.

Целью работы является создание методики корректировки содержания углерода за счет обработки заготовок в газовых смесях CO + CO₂ для восполнения недостатка или удаления избытка углерода, увеличения твердости и трещиностойкости ультрамелкозернистого твердого сплава.

Методика

В работе были созданы 8 партий ультрамелкозернистого твердого сплава WC-8Co-0,4VC-0,4Cr₃C₂ по 3 образца. Для создания ультрамелкозернистого сплава использовали нанодispersный порошок WC Hongwu (80 – 100 нм), порошки Co, VC и Cr₃C₂. Смешивание всех порошков для получения ультрамелкозернистого сплава производили в планетарной шаровой мельнице в PM-400 при частоте 250 об/мин в стаканах объемом 500 мл в течение 40 мин при соотношении масс шаров к порошку 10:1. Гранулирование смесей для получения ультрамелкозернистого сплава производили после смешивания порошка с 2 масс.% раствора каучука в бензине, прессование этих смесей производили под давлением 360 МПа.

Спекание каждой партии из 3 образцов производили в трубчатой печи Carbolite STF в вакууме. После удаления пластификатора при температуре 650 °С в течение 50 мин через печь с образцами пропускали газовую смесь CO + CO₂ со скоростью 180 ± 20 мл/мин. Расход и концентрацию задавали с помощью цифровых ротаметров massView. Спекание первой партии производили без выдержки в атмосфере CO + CO₂. Объемная доля CO для партий со 2 по 8 составляла 0, 35, 65, 72,5, 75, 77,5 и 80 % соответственно. Отклонение доли CO в газовой смеси не превышало 0,5 %. После выдержки спекание прекращали для анализа содержания углерода на анализаторе Horiba EMIА 320V2. После анализа производили окончательное спекание при температуре 1430 °С в течение 60 мин.

Полученные образцы размером $20 \times 6,5 \times 5,25$ мм были распилены и отшлифованы. Исследование микроструктуры и свойств осуществлялось на перпендикулярном срезе по сечению от края к центру образцов. Пористость рассчитывали на основе плотности, которую определяли гидростатическим взвешиванием. Исследование микроструктуры образцов производили на растровом микроскопе Sigma 300 VP. Средний диаметр зерен WC в сплавах был определен методом секущих. Твердость (HV) измеряли с помощью твердомера HVS-50 при нагрузке $P = 294,2$ Н на поверхности и в глубине образцов. Погрешность измерения твердости составляет 3 %. Трещиностойкость (K_{IC}) рассчитывали по суммарной длине трещин по схеме Палмквиста (ИСО 28079) с помощью уравнения Шетти:

$$K_{IC} = 0,028 \sqrt{HV \cdot P / \Sigma l} .$$

Диаметр кристаллитов WC (областей когерентного рассеивания) был определен по результатам рентгеноструктурного анализа, проведенного на дифрактометре ДРОН-7 при Cu/Ka излучении с длиной волны $\lambda = 0,15406$ нм. Размер кристаллитов рассчитан по формуле Стокса-Вильсона:

$$\beta = \beta_d + \beta_\varepsilon = k\lambda / (d \cos \theta) + 4\varepsilon \tan \theta,$$

где β – полуширина дифракционного пика на полувысоте (ПШПВ) после инструментальной коррекции; β_d и β_ε – уширения дифракционных пиков, вызванные малым диаметром кристаллитов, и внутренние напряжения соответственно; k – константа (0.9); d и ε – средний диаметр кристаллитов и внутренние напряжения соответственно; θ – брэгговский угол.

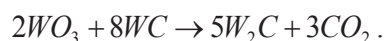
Анализ был произведен по семи пикам. Инструментальная корректировка была выполнена следующим образом:

$$\beta(2\theta) = \text{ПШПВ}_{\text{эксп}} - \text{ПШПВ}_{\text{инст}},$$

где $\text{ПШПВ}_{\text{эксп}}$ – полуширина дифракционного пика на полувысоте по результатам анализа; $\text{ПШПВ}_{\text{инст}}$ – инструментальная функция дифрактометра, определенная в результате анализа эталонного образца гексаборида лантана (LaB_6 – стандартный образец NIST 660b).

Результаты и обсуждение

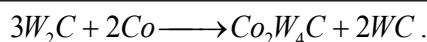
Массовая доля углерода в сплаве стехиометрического состава согласно простейшему расчету на основе известных значений молярных масс компонентов в твердом сплаве WC-8Co-0,4VC-0,4Cr₃C₂ составляет 5,64 %. Окисление порошков кобальта и карбида вольфрама при хранении, транспортировке и измельчении приводит к потере углерода при спекании в результате восстановления оксидов:



По результатам анализа образцов без дополнительной обработки установлено, что содержание углерода в них снижается до 5,27 масс.%. Обработка заготовок в среде CO₂ приводит к дальнейшему снижению концентрации углерода до 5,03 масс.% в результате следующей реакции:



После обработки в смесях с содержанием CO₂ 35 % содержание углерода так же снижается, но значительно меньше (до 5,17 масс.%). При недостатке углерода в процессе нагрева до максимальной температуры спекания происходит образование η-фазы (Co₂W₄C) по следующей схеме:



По результатам травления образцов η -фаза не была выявлена. Это может быть связано с равномерностью ее распространения и малым размером включений, который может оказаться меньше разрешения оптического микроскопа из-за использования нанодисперсного порошка. Прогнозируемое наличие η -фазы (Co_2W_4C) было подтверждено лишь на дифрактограмме образца, полученного после обработки заготовки в атмосфере CO_2 , недостаток углерода в котором был максимальным (см. рис. 1). На остальных дифрактограммах пиков η -фазы так же не выявлено.

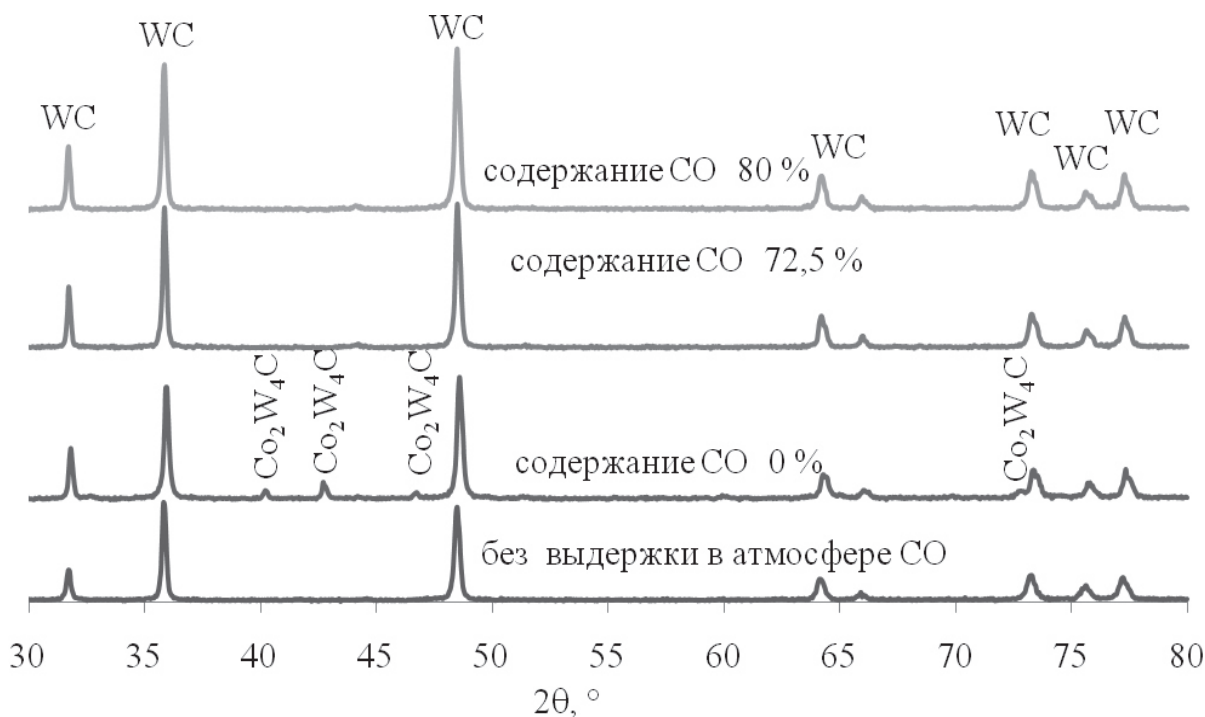
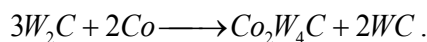


Рис. 1. Дифрактограммы спеченных образцов WC-8Co-0,4VC-0,4Cr₃C₂

При дальнейшем повышении содержания CO в газовой смеси до 65 об.% и выше равновесие реакции смещается в сторону увеличения концентрации углерода. Разложение CO внутри пор по всему объему прессовки происходит под каталитическим воздействием кобальта. При 65%-й концентрации CO в газовой смеси содержание углерода оказывается ниже уровня стехиометрического состава. При достижении объемной концентрации CO 72,5 % содержание углерода достигает стехиометрического состава, а при дальнейшем росте концентрации CO до 80 % скорость реакции резко возрастает, что приводит к превышению стехиометрической концентрации углерода (см. рис. 2). Концентрация CO при этом в поверхностных слоях остается выше, чем внутри образцов, что приводит к появлению градиента концентрации углерода. Градиент значительно возрастает при увеличении концентрации CO за счет того, что разлагающийся углерод препятствует диффузионному проникновению газов в глубину образцов. При высокой концентрации CO₂ происходит формирование отрицательного градиента в результате повышенной концентрации CO₂ вблизи поверхности образцов.

При дальнейшем нагреве до 1430 °C происходит диффузия углерода внутрь частиц карбида вольфрама и его восстановление по следующей формуле:



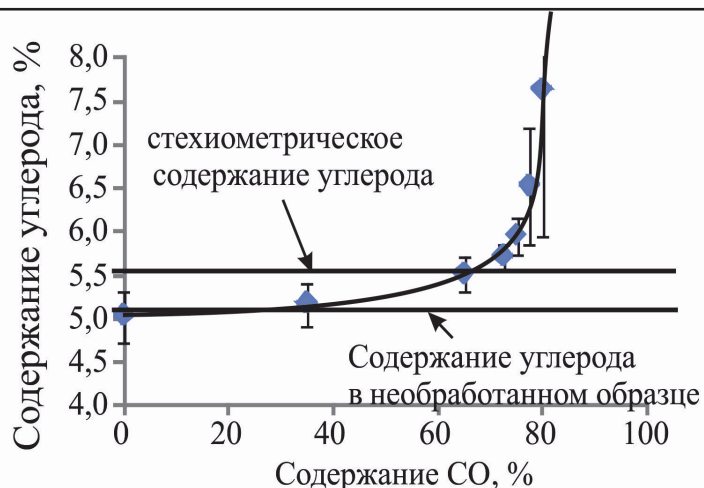


Рис. 2. Зависимость содержания углерода в полученных образцах от содержания CO в смеси CO + CO₂

Повышение концентрации η-фазы приводит к снижению содержания жидкой фазы на основе кобальта, что затрудняет заполнение пор и в конечном итоге приводит к повышению пористости. Свободный углерод, образующийся при высокой концентрации CO, так же препятствует уплотнению образцов. Включения свободного углерода, обладая пренебрежительно малой плотностью и прочностью, играют ту же роль, что и поры (снижают плотность, твердость и трещиностойкость). На рис. 3 видно, что недостаток углерода и избыток углерода приводят к резкому снижению плотности и повышению пористости. Пористость достигает 4,6 % у образцов с содержанием свободного углерода 2 масс.%. Пористость образцов с недостатком углерода (0,4 – 0,7 масс.%) достигает 5 – 7 %.

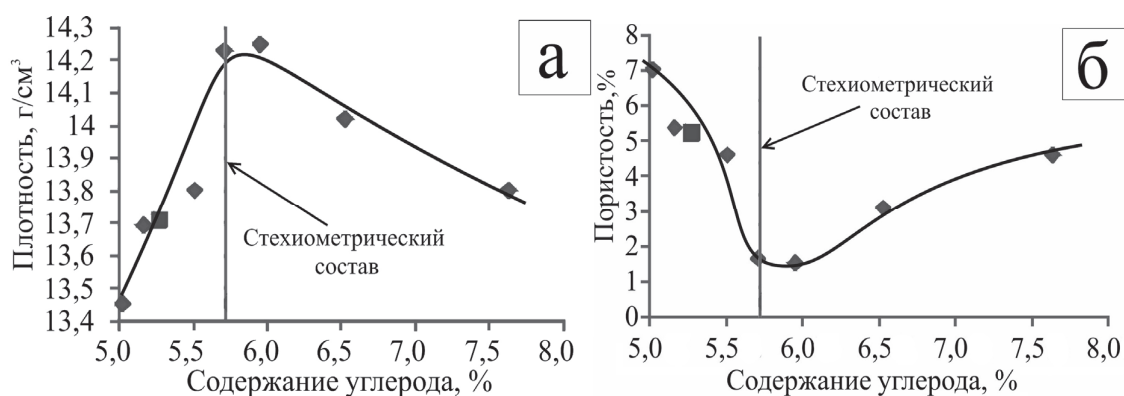


Рис. 3. Зависимости плотности (а) и пористости (б) от содержания углерода в ультрамелкозернистом сплаве WC-8Co-0,4VC-0,4Cr₃C₂ после обработки заготовок в CO (◆) и без обработки (■)

Наименьшей пористостью (1,5 и 1,63 %) обладают образцы ультрамелкозернистого сплава стехиометрического состава, полученные при объемной концентрации CO 72,5 и 75 %. Дальнейшее снижение пористости возможно лишь за счет применения дорогостоящих методов спекания с применением давления, либо за счет повышения температуры. Однако последний вариант приведет к ускоренному росту зерен и снижению твердости.

Структура полученных сплавов, представленная на рис. 4, состоит из зерен WC, пространство между которыми заполнено кобальтом. На рис. 4 видно, что в сплавах с наименьшим содержанием углерода, полученных без обработки и обработанных в среде CO₂ (см. рис. 4, а, б), доля кобальта (черного цвета) значительно меньше, чем в сплаве стехиометрического состава (см. рис. 4, в) и в сплаве с наивысшим содержанием углерода (см. рис. 4, г).

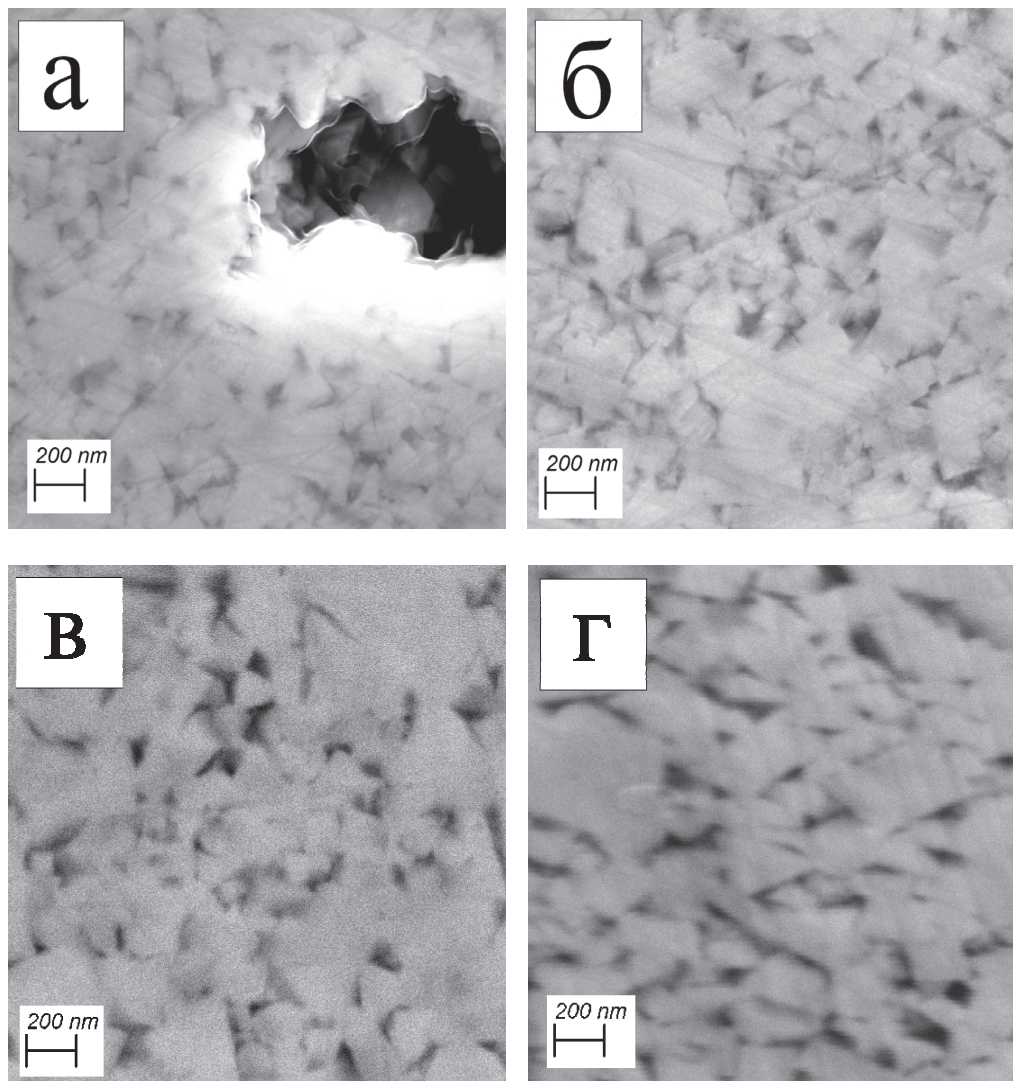


Рис. 4. Микроструктуры образцов, спеченных без выдержки (а), после выдержки в атмосфере CO + CO₂ с содержанием CO 0 % (б), 72,5 % (в) и 80 % (г)

Анализ микроструктур (см. табл. 1) показал, что средний диаметр зерен WC в полученных образцах не зависит от содержания углерода и составил 0,37 мкм, что соответствует ультрамелкозернистому сплаву (0,2 – 0,5 мкм). Этот диаметр значительно меньше, чем средний диаметр зерен в широко известных промышленных особомелкозернистых твердых сплавах ВК6ОМ и ВК10ХОМ (0,8 – 1 мкм).

Таблица 1

Концентрация СО, состав и свойства полученных образцов ультрамелкозернистого сплава WC-8Co-0,4VC-0,4Cr₃C₂

Номер образца	Объемная концентрация СО в смеси СО + СО ₂ , %	Содержание углерода по результатам анализа, %	Плотность, г/см ³	Диаметр кристаллитов, нм	Пористость, %	Твердость, НВ	Трещиностойкость, МПа√м
1	–	5,27 ± 0,21	13,71	41 ± 7	5,23	1767 ± 22	5,8 ± 1,0
2	0	5,03 ± 0,29	13,45	39 ± 8	7,02	1394 ± 60	5,6 ± 0,3
3	35	5,17 ± 0,25	13,69	32 ± 6	5,36	1696 ± 149	7,4 ± 2,3
4	65	5,51 ± 0,19	13,8	40 ± 5	4,60	1858 ± 53	8,2 ± 1,8
5	72,5	5,72 ± 0,15	14,23	39 ± 3	1,63	1943 ± 34	8,4 ± 0,9
6	75	5,96 ± 0,21	14,25	45 ± 4	1,49	1910 ± 32	8,2 ± 0,7
7	77,5	6,53 ± 0,67	14,02	39 ± 6	3,08	1877 ± 55	8,3 ± 0,7
8	80	7,64 ± 1,68	13,8	40 ± 5	4,60	1811 ± 109	8,2 ± 1,8

Относительно высокая скорость диффузии углерода через кобальтовую фазу приводит к снижению градиента концентрации углерода. Тем не менее наличие остаточного градиента содержания углерода приводит к появлению разброса значений твердости и трещиностойкости по глубине образцов (см. рис. 5). Наибольший разброс значений концентрации углерода и твердости наблюдается у образцов, полученных при наименьшей (0 %) и наибольшей (80 %) объемных концентрациях СО. При большой концентрации СО (77,5 – 80 %) на поверхности образцов образуется повышенная концентрация углерода, что объясняет пониженные значения твердости на поверхности по сравнению с твердостью в глубине образцов. При низкой концентрации СО твердость на поверхности так же оказалась ниже из-за высокой концентрации η-фазы, образованной в результате удаления углерода газом СО₂. Для увеличения градиента свойств по разрабатываемым методикам [17; 18; 19] можно уменьшить максимальную температуру спекания и время выдержки, что в данном случае может негативно сказаться на уровне свойств.

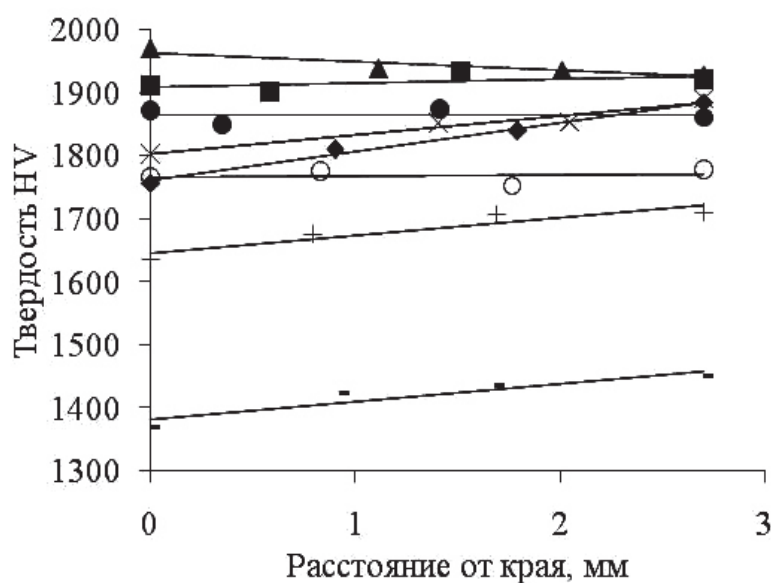


Рис. 5. Распределение твердости по глубине образцов, спечённых без выдержки (○) и после выдержки в атмосфере с содержанием СО 0 % (-), 35 % (+), 65 % (●), 72,5 % (▲), 75 % (■), 77,5 % (×), 80 % (◆)

На рис. 6, а видно, что твердость значительно увеличивается при увеличении концентрации углерода, уменьшаться начинает, достигнув максимума при стехиометрическом составе. Трещиностойкость так же значительно увеличивается при приближении к стехиометрическому составу. Избыток углерода в сплавах, содержащих более 6 масс.% углерода, не приводит к значительному падению трещиностойкости (см. рис. 6, б). Это может быть связано как с изменением состава кобальтовой фазы, в которой растворяется больше углерода, так и с влиянием включений свободного углерода на процесс деформации сплавов в зоне распространения трещины. Также можно заметить, что в сплавах с избытком и недостатком углерода наблюдается разброс значений трещиностойкости. Этот разброс вызван наличием градиента свойств по глубине в результате неравномерного распределения углерода.

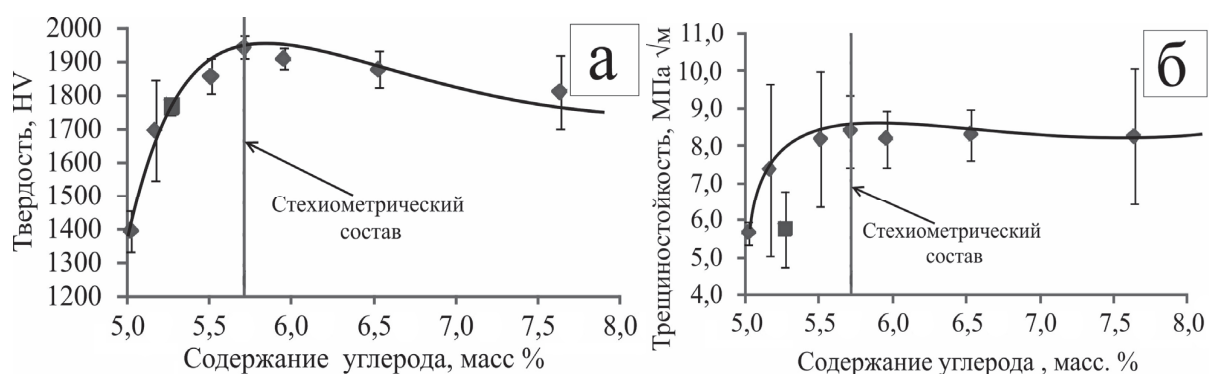


Рис. 6. Зависимости твердости (а) и трещиностойкости (б) от содержания углерода в сплавах, полученных после обработки в газовой смеси (♦) и без обработки (■)

Благодаря малому размеру зерна значения твердости полученных после восполнения углерода образцов стехиометрического состава (партия № 5) значительно превосходят значения твердости субмикронных твердых сплавов [1; 2; 3]. Полученные образцы так же превосходят по твердости ультрамелкозернистые аналоги, полученные жидкофазным спеканием [20], горячим прессованием [21], электроискровым и индукционным спеканием [22; 23]. Некоторое отставание в трещиностойкость можно объяснить большим размером зерен у аналогов [21; 23; 22]. Таким образом, предложенная методика корректировки содержания углерода позволяет без особых затрат добиться повышения характеристик твердых сплавов.

Выводы

Установлено, что обработка пористых заготовок ультрамелкозернистого твердого сплава WC-8Co-0,4VC-0,4Cr₃C₂ в атмосфере CO + CO₂ на начальной стадии спекания позволяет увеличивать и уменьшать содержание углерода в твердом сплаве за счет увеличения и уменьшения концентрации CO. В частности, выдержка в газовой смеси с концентрацией CO 72,5 % при температуре 650 °C в минуту пористой заготовки с недостатком углерода (0,37 %) в течение 50 мин позволяет восполнить этот недостаток и добиться снижения пористости (с 5,23 до 1,63 %), увеличения твердости (с HV1767 до HV1943) и трещиностойкости (с 5,8 до 8,4 МПа√м) ультрамелкозернистого твердого сплава WC-8Co-0,4VC-0,4Cr₃C₂ после спекания. При увеличении содержания CO от 65 до 80 % происходит увеличение концентрации углерода в полученных образцах с 5,51 до 7,64 масс.%. При уменьшении концентрации CO с 35 до 0 % наблюдается уменьшение концентрации углерода. Недостаток углерода приводит к резкому снижению твердости и трещиностойкости образцов из-за формирования хрупкой η-фазы и соответствующего роста пористости. Избыток углерода так же снижает твердость и в меньшей степени трещиностойкость полученных сплавов. Повышенная скорость реакций образования и удаления углерода в приповерхностных слоях во время обработки приводит к формированию градиентов твердости в сплавах со значительным избытком и недостатком углерода.



Снимки на растровом микроскопе получены в Дальневосточном центре электронной микроскопии на базе ИБМ ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панов, В. С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В. С. Панов, А. М. Чувилин. – М.: МИСИС, 2001. – 452 с.
2. Третьяков, В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов / В. И. Третьяков. – М.: Металлургия, 1976. – 512 с.
3. Григорьев, С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 380 с.
4. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide – A review / Z. Zak Fang, Xu Wang, Taegong Ryu, Kyu Sup Hwang, H. Y. Sohn // *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 27. – 2009. – P. 288-299.
5. Mukhopadhyay, A. Consolidation–microstructure–property relationships in bulk nanoceramics and ceramic nanocomposites: a review / A. Mukhopadhyay, B. Basu // *International Materials Reviews*. – 2007. – Vol. 52. – N. 5. – P. 257-288.
6. Панов, В. С. Тенденции развития технологии ультрадисперсных и наноразмерных твердых сплавов WC–Co / В. С. Панов, А. А. Зайцев // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2014. – № 3. – С. 38-48.
7. Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts / B. Gille, K. Szesny, Dreyer, H. van den Berg, J. Schmidt, T. Gestrich, G. Leitner // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. – 2002, 20. – P. 3-22.
8. Hiroyuki Saito. Effects of Co content and WC grain size on wear of WC cemented carbide / Hiroyuki Saito, Akira Iwabuchi, Tomoharu Shimizu. – *Wear*, 2006, 261. – P. 126-132.
9. Jia, K. Sliding wear of conventional and nanostructured cemented carbides / K. Jia, T. E. Fischer. – *Wear*, vol. 203-204. – P. 310-318.
10. Дворник, М. И. Сравнительный анализ износостойкости субмикронного твердого сплава WC-8Co-1Cr₃C₂ и традиционных твердых сплавов при сухом трении / М. И. Дворник, А. В. Зайцев // *Перспективные материалы*. – 2015. – № 5. – С. 34-41.
11. Дворник, М. И. Сравнительный анализ микроабразивной износостойкости традиционных твердых сплавов и субмикронного твердого сплава WC-8Co-1Cr₃C₂ / М. И. Дворник, Б. Я. Мокрицкий, А. В. Зайцев // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 1(81). – С. 45-51.
12. S. Xiaoliang, Y. Hua, W. Sheng, S. Gangqin, D. Xinglong. Influences of Carbon Content on the Properties and Microstructure of Ultrafine WC-10Co Cemented Carbide // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*. – 2007. – P. 473-476.
13. Gwan-Hyoung Lee, Shinhoo Kang. Sintering of nano-sized WC–Co powders produced by a gas reduction–carburization process // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2006. – Vol. 419, Issues 1-2. – P. 281-289.
14. Chongbin Wei, Xiaoyan Song, Jun Fu, Xiaosen Lv, Haibin Wang, Yang Gao, Shixian Zhao, Xuemei Liu. Effect of Carbon Addition on Microstructure and Properties of WC-Co Cemented Carbides // *J. Mater. Sci. Technol*. – 2012. – Vol. 28(9). – P. 837-843.
15. Дворник, М. И. Повышение прочности и твердости субмикронного твердого сплава WC-8%Co-1%Cr₃C₂ за счет докарбидизации в процессе спекания / М. И. Дворник, А. В. Зайцев, Т. Б. Ершова // *Вопросы материаловедения*. – 2011. – № 4(68). – С. 81-88.
16. Дворник, М. И. Влияние дефектов на прочность субмикронного твердого сплава WC-8% Co-1% Cr₃C₂ / М. И. Дворник, А. В. Зайцев, Т. Б. Ершова // *Материаловедение*. – 2012. – № 3. – С. 19-23.
17. O. Eso, Z. Fang, A. Griffo. Liquid phase sintering of functionally graded WC–Co composites. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2005. – Vol. 23, Issues 4-6. – P. 233-241.
18. Peng Fan, Z. Zak Fang, Jun Guo. A review of liquid phase migration and methods for fabrication of functionally graded cemented tungsten carbide. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 36 (2013). – P. 2-9.
19. I. Konyashin, B. Ries, F. Lachmann, A. T. Fry. A novel sintering technique for fabrication of functionally gradient WC–Co cemented carbides. *J Mater Sci*, 2012. – Vol. 47, issue 20. – P. 7072-7084.
20. Прочность на изгиб и микротвердость твердых сплавов WC-8%Co на основе порошков разной дисперсности / А. С. Курлов, А. А. Ремпель, А. Leenaers, S. Van Der Bergh // *Материаловедение*. – 2009. – № 4. – С. 18-21.

21. M. Sherif El-Eskandarany , Amir A. Mahday, H.A. Ahmed , A.H. Amer. Synthesis and characterizations of ball-milled nanocrystalline WC and nanocomposite WC–Co powders and subsequent consolidations. *Journal of Alloys and Compounds* 312 (2000) 315-325.
22. Hwan Cheol Kim, In Kyoon Jeong, In Jin Shon, In Yong Ko, Jung Mann Doh. Fabrication of WC–8 wt.%Co hard materials by two rapid sintering processes. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2007. – Vol. 25, Issue 4. – P. 336-340.
23. Hwan-Cheol Kim, In-Jin Shon, Jin-Kook Yoon, Jung-Mann Doh. Consolidation of ultra fine WC and WC–Co hard materials by pulsed current activated sintering and its mechanical properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2007. – Vol. 25, Issue 1. – P. 46-52.



Ким К. К., Спичкин Г. Л., Иванов С. Н.

K. K. Kim, G. L. Spichkin, S. N. Ivanov

**ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ГИДРОФИЛЬНОСТИ
БУМАЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

PLASMA INSTALLATION FOR INCREASING PAPER PRODUCT HYDROPHILY

Ким Константин Константинович – член-корреспондент АЭН РФ, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin K. Kim – correspondent member of Russian Academy of electrical engineering, Dr. Sc. (Engineering), professor, Head of Theoretical Foundations of electrical engineering Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Спичкин Георгий Леонидович – к.т.н., ведущий научный сотрудник кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: speechkin@inbox.ru.

Mr. Georgii L. Spichkin – Dr. Sc. (Engineering), leading researcher, Theoretical fundamentals of electrical engineering Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9. E-mail: speechkin@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВО «КнАГТУ» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681021, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681021, Komsomolsk-on-Amur, Lenin av., 27. E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация. Обработка тонкой бумажной ленты с целью повышения ее гидрофильности низкотемпературной газоразрядной плазмой весьма перспективна из-за генерации частиц, вступающих в реакцию с молекулами примесей или основного материала. Кроме того, на молекулы поверхностного слоя материала воздействуют ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучения, генерируемые в катодном слое разряда. Объемный разряд обеспечивает высокую степень однородности воздействия на поверхность материала. Для повышения интенсивности плазмохимических реакций необходимо повышать частоту питающего напряжения источника газоразрядного реактора или переходить к импульсно-периодическому режиму электропитания. Частота повторения импульсов согласуется с характерной частотой протекания плазмохимических реакций.

Summary. The treatment of a thin paper tape with the help of low-temperature gas-discharge plasma to increase its hydrophilic property is rather perspective, because of the generation of particles, which react with molecules of impurities or basic material. Besides, the molecules of a material surface are influenced by of ultraviolet and soft x-ray radiations, generated in a cathode layer of the discharge. The volumetric gas discharge guarantees a high degree of influence uniformity on the material surface. To increase plasma chemical reaction intensity it is important to increase the frequency of discharge reactor supplied voltage or to pass to a pulse-periodic regime of the power supply. The frequency of pulse recurrence is coordinated with characteristic frequency of plasma chemical reactions passing.

Ключевые слова: объемный газовый разряд, низкотемпературная газоразрядная плазма, бумага, обработка, газоразрядный реактор.

Key words: space gas charge, low temperature low temperature plasma, paper, treatment, gas-discharge generator.

УДК 533.9; 537.572

Введение

Повышение гидрофильности изделий из бумаги с помощью обработки в среде низкотемпературной плазмы, созданной газоразрядным реактором, посредством изменения ее структуры является весьма перспективным, поскольку в данной плазме происходит генерация электронов, ионов, активных атомных частиц и радикалов, которые могут вступать в реакцию с молекулами примесей или основного материала на его поверхности. Кроме того, молекулы поверхностного слоя бумаги подвергаются воздействию ультрафиолетового (УФ) и мягкого рентгеновского излучений, генерируемых в катодном слое разряда.

Физико-химические процессы и принцип действия установки. В газоразрядном реакторе, входящем в состав установки для повышения гидрофильности поверхности бумаги, могут использоваться различные типы разрядов: объемный [1; 2; 3], коронный [1] и разряд по поверхности диэлектрика [4] (скользящий разряд). Из всех известных форм газового разряда только объемный разряд может обеспечить высокую степень однородности воздействия на обрабатываемую поверхность материала в газоразрядном реакторе. Формированию однородного самостоятельного разряда в воздухе атмосферного давления препятствует развитие ионизационно-абсорбционной и других видов неустойчивостей [2], для подавления которых можно использовать емкостную стабилизацию. В этом случае электроды покрывают диэлектрическими барьерами, при этом ток носителей в разрядном промежутке замыкается током смещения (емкостным током) через барьеры. Если в некоторой зоне разрядного промежутка увеличивается плотность тока, то увеличивается падение напряжения на емкости барьеров, что приводит к снижению напряженности электрического поля в канале разряда и, следовательно, к снижению плотности тока. Наиболее эффективна стабилизация разряда диэлектрическими барьерами с низким значением удельной поверхностной емкости $C_{\text{вд}}$. В том случае, когда $C_{\text{вд}}$ – величина порядка единиц пФ/см² и менее, а отношение амплитуды прикладываемого к разрядному промежутку импульсного напряжения к значению напряжения статического пробоя (коэффициент импульса) не менее 2, структура разряда весьма однородна. Низкотемпературная плазма такого разряда неравновесна, температура газа, как правило, не превышает 50 – 100 °С, а отношение температуры электронов к температуре газа – 60 – 100 [2].

Ток разряда протекает и через материал, помещенный в газоразрядный реактор. Если обрабатываемый материал – диэлектрик (бумага), то ток через него протекает в виде тока смещения, а если проводник – то в виде тока проводимости.

Специфической особенностью высоковольтного импульсного объемного разряда емкостного типа является высокая напряженность электрического поля вблизи поверхности обрабатываемого материала, поэтому поверхность подвергается бомбардировке ионами и электронами со средней энергией 2 – 5 эВ. Кроме того, указанные процессы идут на фоне облучения поверхности обрабатываемого материала квантами УФ и мягкого рентгеновского излучений, возникающими при соударении ускоренных электронов с самой поверхностью или атомами остаточного газа. В условиях электрон-ионной бомбардировки и облучения активизируются все реакции взаимодействия плазмы с поверхностью материала.

Эффективность процессов взаимодействия продуктов плазмохимических реакций в воздухе с молекулами модифицируемого материала связана с увеличением доли энергии, запасенной в накопительных элементах высоковольтного источника электропитания, вкладываемой в каналы ионизации, диссоциации, отлипания и другие, т.е. в каналы образования химически активных частиц. Для повышения интенсивности плазмохимических реакций целесообразно повышать частоту питающего напряжения источника газоразрядного реактора или переходить к импульсно-периодическому режиму электропитания. При этом частота повторения импульсов должна быть согласована с характерной частотой протекания плазмохимических реакций.

Проиллюстрируем работу установки по функциональной схеме на примере установки для обработки движущейся бумажной ленты.

Оценка возможного использования газоразрядной плазмы для модификации объемной структуры тонкой бумажной ленты с целью повышения ее гидрофильности проводилась на основе следующей исходной информации:

- влажность так называемой высушенной ленты составляет около 50 %, температура около 100 °С,
- влажность невысушенной ленты доходит до 95 %, температура комнатная. Такая лента находится на основе – гибком пористом армированном пластике толщиной около 1 мм.

Желательно оказывать плазменное воздействие на невысушенную ленту, одновременно высушивая ее (снижая процентное содержание влаги).

Блок-схема установки для обработки движущейся бумажной ленты в низкотемпературной газоразрядной плазме показана на рис. 1.

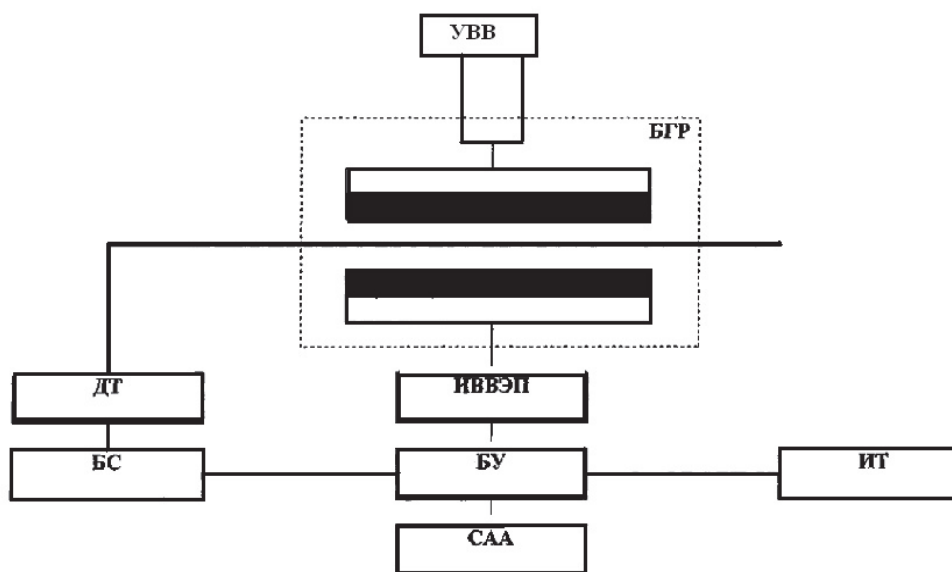


Рис. 1. Блок-схема установки

Основным элементом установки является блок газоразрядных реакторов (БГР), в котором формируется квазиоднородный по своей структуре объемный разряд емкостного типа при подаче на электроды БГР импульсов напряжения знакопеременной формы от источника высоковольтного электропитания (ИВВЭП). Последний, как правило, состоит из низковольтного высокочастотного тиристорного или транзисторного генератора, повышающего трансформатора и, при необходимости, устройства для сжатия (укорочения) высоковольтных импульсов. Блок управления (БУ) управляет работой установки и через блок согласования (БС) регулирует работу двигателя транспортера ленты (ДТ). Режимы работы установки отображаются на табло индикации (ИТ). Установка должна быть снабжена системой аварийной автоматики (САА), отрабатывающей аварийные режимы (электрический пробой в БГР, наведение статического заряда выше принятых норм, выброс в производственное помещение озона или других вредных веществ, сопутствующих технологическому процессу, в концентрациях выше ПДК и др.). Работой установки может управлять ЭВМ, в памяти которой хранится протокол режимов работы. Кроме того, установка должна комплектоваться нейтрализаторами статического электричества (НСЭ) (на рис. 1 не показан), полярность и величина которого могут быть заранее неизвестны, а также узлом вытяжной вентиляции (УВВ).

При выборе наиболее важного параметра БГР – газового зазора – расстояния между диэлектрическими покрытиями (барьерами) электродов (D) следует исходить из того, что движущая лента не должна касаться диэлектрического покрытия. В противном случае возрастает вероятность

деформации (разрыва) ленты и наведения значительного статического заряда на ленте и барьерах БГР. При естественном провисе ленты, обусловленном ее значительной шириной и длиной с учетом ее толщины (0,1 мм) и толщины подложки (1,0 – 1,5 мм), а также возможности перекосов во время движения, следует принять значения газоразрядного промежутка в пределах $D = (4 - 6)$ мм. Увеличение длины газового промежутка до величин свыше (6 – 8) мм нежелательно из-за значительно возрастающих при этом трудностей, связанных с внешней изоляцией высоковольтного оборудования. При выбранной длине газоразрядного промежутка величина амплитуды напряжения на выходе ИВВЭП должна составлять $U_a = 2(E_i/p)pD \sim (30 \pm 6)$ кВ, где p – давление воздуха ($p = 1$ атм), E_i/p – приведенное значение напряженности электрического поля, при котором начинаются интенсивные ионизационные процессы (формируется газовый разряд), для воздуха – $E_i/p = 30$ кВ/(см×атм). Длина газоразрядного реактора вдоль направления движения ленты определяется, главным образом, двумя факторами: необходимым характерным временем воздействия газоразрядной плазмы на бумажную ленту для ее модификации и интенсивностью воздействующих газоразрядных факторов, определяющейся механизмом развития газового разряда, средней мощностью, выделяемой в газоразрядном промежутке, и пиковой мощностью в единичном импульсе тока.

Оценки и проблемы. Оценка характерного времени воздействия, необходимого для модификации бумаги, может быть выполнена лишь после необходимых экспериментов. Интенсивность плазмохимического воздействия на бумажную ленту ограничена величиной вводимой в газоразрядную плазму средней мощности – $(10 - 30)$ Вт/см², превышение которой недопустимо с точки зрения изоляционных свойств барьеров и может привести к их термоэлектрическому пробою. Приведем пример оценки предельного энергопотребления установки. Пусть требуемое время воздействия $(0,5 - 1,0)$ с. В этом случае длина газоразрядного реактора – моноблока или выполненного в виде последовательно расположенных газоразрядных секций при скорости протяжки ленты 0,1 м/с составляет 10 м. Таким образом, при ширине протягиваемой ленты 1 м сечение газоразрядного реактора составляет 10 м², а общее энерговыделение в реакторе характеризуется средней мощностью $P = (10 - 30)$ кВт, что с учетом КПД – 0,5 – 0,6, характерного для установок такого типа, определяет энергопотребление установки на уровне $(20 - 50)$ кВт.

Для препятствия распространения воздуха, содержащего продукты плазмохимических реакций – озон, окислы азота и другое, в производственное помещение необходимо вытяжную вентиляцию от блока газоразрядных реакторов рациональнее выполнять с использованием завес. В систему вентиляции необходимо дополнительно ввести систему подогрева воздуха, поступающего с бумажной лентой в газоразрядный реактор с целью повышения в нем температуры выше критической $(60 - 80)$ °С, для уменьшения концентрации образующегося в реакторе озона. Разложение образовавшегося в реакторе озона может быть осуществлено и за счет специального ухудшения теплоотвода через диэлектрические покрытия и автоматического поддержания температуры в газоразрядном реакторе на требуемом уровне $(60 - 80)$ °С. Уровень оптимальной температуры (и распределения температуры по зазору) следует выбирать также с учетом необходимости одновременной плазмохимической обработки и сушки бумажной ленты с учетом возможной деформации органической подложки – несущей основы движущейся невысушенной ленты.

При разработке установки для обработки движущейся бумажной ленты низкотемпературной плазмой возникает ряд проблем.

Большая ширина ленты и, следовательно, газоразрядного реактора может вызвать значительную деформацию диэлектрических барьеров, поэтому конструкция верхнего электрода должна основываться на прочных несущих металлических конструкциях, покрытых тонким (1 – 2) мм равномерным по толщине слоем диэлектрика, например стекломалью. Требования к диэлектрическому покрытию, ограничивающему газоразрядный промежуток снизу, несколько проще, и в качестве такого покрытия могут быть рекомендованы различные виды специальных, но недефицитных стекол. Не следует использовать керамические материалы, т.к. обладая значительной пористостью (6 – 15) % они адсорбируют влагу атмосферного воздуха и становятся центрами концентрирования объемного разряда и накопления продуктов плазмохимических реакций.

Диэлектрические покрытия испытывают воздействие значительных температурных градиентов и напряженности электрического поля, причем в момент включения установки имеет место эффект термоудара по диэлектрику. Электрическое поле в диэлектрике, возникающее при замыкании через него тока объемного разряда, строго говоря, нельзя считать однородным. Более того, в зоне газового разряда, где в силу наличия дефектов или других причин, локальная плотность тока, а следовательно, и плотность энерговыделения, и температура вблизи поверхности диэлектрического покрытия выше, выше и напряженность электрического поля. Наличие совокупности выше-названных факторов – неоднородность электрических полей большой напряженности и значительных градиентов температуры – снижает долговременную прочность диэлектриков. Эксплуатационный режим, определяемый средним значением вводимой в разряд мощности, должен быть значительно менее интенсивным, чем режим ввода энергии, при котором происходит пробой, определяемый термоэлектрическим разрушением диэлектриков.

Некоторые рекомендации. При анализе возможности использования газоразрядных технологий для модификации объемной структуры и одновременно сушки бумажных лент необходимо учитывать электрофизические и плазмохимические аспекты взаимодействия. Регулирование теплового режима реактора, а следовательно, скорости химического взаимодействия возможно за счет изменения теплоотвода через диэлектрические покрытия и электроды и принудительного изменения объемного теплообмена в реакторе.

Также температурный режим, особенно при наличии влаги атмосферного воздуха, существенно влияет на однородность объемного газового разряда, а следовательно, на длительную электрическую стойкость покрытий.

При обработке увлажненной бумаги необходимо учитывать, что увеличение влажности в газоразрядном промежутке способствует ухудшению однородности разряда. В литературе отсутствуют данные по формированию барьерного разряда в воздухе с влажностью более (30 – 40) %. Возможно, что при повышении влажности воздуха необходимо будет принимать специальные меры, направленные на дополнительное повышение однородности объемного разряда.

При работе с газоразрядными реакторами, работающими в среде атмосферного воздуха, часто возникает проблема нейтрализации активных относительно долгоживущих продуктов плазмохимических реакций (озона, окислов азота и др.) с тем, чтобы не допустить попадание их в помещении в концентрациях выше ПДК. Учитывая значительные размеры реактора, его принципиальную негерметичность и сравнительно низкие уровни ПДК на озон ($0,1 \text{ мг/м}^3$) и окислы азота в смеси с озоном ($0,05 \text{ мг/м}^3$), решение вопросов производственной гигиены становится весьма непростым. Кроме того, даже в случае использования мощной вытяжной вентиляции в зоне работающего газоразрядного реактора задача нейтрализации агрессивных продуктов плазмохимических реакций при расходах вентиляционных потоков ($10^3 - 10^4$) $\text{м}^3/\text{ч}$ весьма не простая.

Из-за значительных размеров реактора и наличия на электродах знакопеременного высоко-частотного высоковольтного напряжения последний является источником интенсивных электромагнитных колебаний в открытое пространство, что недопустимо с точки зрения электромагнитной экологии. Избежать или, по крайней мере, значительно уменьшить излучение можно экранировкой высоковольтных электродов заземленным проводящим электродом или благодаря специальной конструкции газоразрядного реактора. При обработке увлажненной бумаги вследствие ее высокой проводимости часть движущейся ленты вне газоразрядного реактора может оказаться под напряжением, что крайне нежелательно с точки зрения техники безопасности.

Результаты экспериментов. На созданной авторами установке был проведен экспресс-эксперимент по исследованию влияния обработки низкотемпературной газоразрядной плазмой на гидрофильность образцов тонких микропористых структур (тонкая бумага, пористый листовой ПВХ). Образцы помещались в газоразрядный промежуток длиной 4 мм, образованный двумя плоскопараллельными электродами с диэлектрическими покрытиями (стекло с диэлектрической проницаемостью – 6,5; толщиной 4 мм). Амплитуда импульсов напряжения на электродах – 35 кВ, частота следования импульсов – 50 Гц. Средняя мощность, вводимая в разряд, варьировалась в пределах (2 – 5) Вт/см^3 . Время экспозиции – 30 с. Края необработанного и обработанного в газо-

разрядной плазме образцов опускались в воду на глубину 5 мм, наблюдался капиллярный эффект. Высота подъема воды по обработанным образцам (бумаге и пористым ПВХ) была в (2 – 2,5) раза выше, чем по необработанным образцам.

Выводы. Повышение гидрофильности изделий из бумаги с помощью обработки в среде низкотемпературной плазмы, созданной газоразрядным реактором, посредством изменения ее структуры является весьма перспективным.

Для повышения интенсивности скорости обработки целесообразно повышать частоту питающего напряжения источника газоразрядного реактора или переходить к импульсно-периодическому режиму электропитания. При этом частота повторения импульсов должна быть согласована с характерной частотой протекания плазмохимических реакций.

Рассматриваемые установки характеризуются невысоким энергопотреблением, а их эксплуатация не связана с возникновением неразрешимых экологических проблем, что делает их внедрение в различные технологические процессы вполне обоснованным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 736 с.
2. Велихов, Е. Л. Физические явления в газоразрядной плазме / Е. Л. Велихов, А. С. Ковалев, А. Т. Рахимов. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
3. Никандров, Д. С. Низкочастотный барьерный разряд в таунсендском режиме / Д. С. Никандров, Л. Д. Цендин // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75. – Вып. 10. – С. 29-38.
4. Masuda, S. Pulse corona induced plasma chemical process: a horizon of new plasma chemical technologies / S. Masuda // Pure and Applied Chemistry. – 1988. – Vol. 60. – № 5. – P. 727-731.



Еренков О. Ю., Рожков А. И., Козиев А. М.
O. Yu. Erenkov, A. I. Rozhkov, A. M. Koziev

ПОЛУЧЕНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКА ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

PRODUCTION OF HIGH STRENGTH FIBERGLASS

Еренков Олег Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре), профессор кафедры «Химическая технология и биотехнология» ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (Россия, г. Хабаровск). E-mail: Erenkov@list.ru.
Mr. Oleg Yu. Erenkov – D.Sc. in engineering, professor, Department of Chemical Industry Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), professor of the Chemical Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: erenkov@list.ru.

Рожков Артур Игоревич – магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: artur-90_90@mail.ru.

Mr. Artur I. Rozhkov – Master's degree student, Chemical Industry Machinery and Equipment Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: artur-90_90@mail.ru.

Козиев Афзалшох Мирзоевич – магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: erenkov@list.ru.

Mr. Afzalshokh M. Koziev – Master's degree student, Chemical Industry Machinery and Equipment Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: erenkov@list.ru.

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния электрофизической обработки полимерного связующего непосредственно в пресс-форме на механические характеристики стеклопластика. Приведены результаты структурных исследований и физическая их интерпретация.

Summary. The influence of electrical and physical treatment of polymer binder in the mold on the mechanical characteristics of fiberglass is investigated experimentally. Structural data are presented.

Ключевые слова: стеклопластик, полимерное связующее, надмолекулярная структура, наносекундные электромагнитные импульсы, электромагнитное поле, механические свойства.

Key words: fiberglass, polymer binder, super molecular structure, nanosecond electromagnetic pulses, electromagnetic field, mechanical properties.

УДК 621.763

Введение

Как известно из практического опыта, интенсивное применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) для производства ответственных и высоконагруженных деталей и изделий сдерживается предельными значениями прочности материала, достигнутыми в процессе его изготовления. Прочность материала формируется под влиянием внешних и внутренних факторов. К внешним факторам относятся обеспечение стабильности параметров технологического режима, правильная эксплуатация и своевременное техническое обслуживание технологического и вспомогательного оборудования, качество исходных материалов. К внутренним факторам можно отнести специфику структурообразования полимерного материала, наличие специфических свойств, например вынужденная эластичность, подверженность различным физико-химическим воздействиям и излучениям.

В связи с этим задача получения полимерных композиционных материалов с повышенной прочностью является актуальной задачей, решение которой позволит снизить массоемкость машин и механизмов за счет замены части деталей и узлов из дефицитных металлических материалов и сплавов.

На сегодняшний день модификации полимерного связующего являются одним из перспективных тенденций в производстве ПКМ с комплексом физико-механических показателей, включая прочность, значения которых превышают установленные стандартами или техническими условиями. В технологии получения ПКМ известно значительное количество многообразных методов модификации эпоксидного связующего [1; 2; 3]. На основании анализа научно-технической информации и с учетом оценки технологичности, экономической и экологической целесообразности известных методов модификации можно обосновано выдвинуть предположение о том, что одним из эффективных способов модификации полимерных связующих является электрофизическая обработка, т.е. обработка физическими полями, в том числе электромагнитными волнами и импульсами [4; 5]. Данное предположение в полной мере экспериментально подтверждено результатами проведенных исследований физико-механических свойств армированного полимерного материала типа стеклопластика [6; 7]. Установлено экспериментальным путем повышение комплекса прочностных свойств изделий из исследуемого стеклопластика до 1,7 раз после осуществления предварительной электрофизической обработки полимерного связующего наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) и одновременно электромагнитным переменным полем (ЭМП).

Экспериментальные исследования

Цель исследования – установить экспериментально взаимосвязь между значениями комплекса прочностных показателей стеклопластика и параметрами электрофизической обработки полимерного связующего непосредственно в форме для изготовления лопатки рабочего колеса центробежной компрессорной установки во время технологического процесса формования детали.

Схема и фотография экспериментальной установки представлены на рис. 1. Параметры электрофизической обработки связующего поддерживались такими же, как в работе [7].

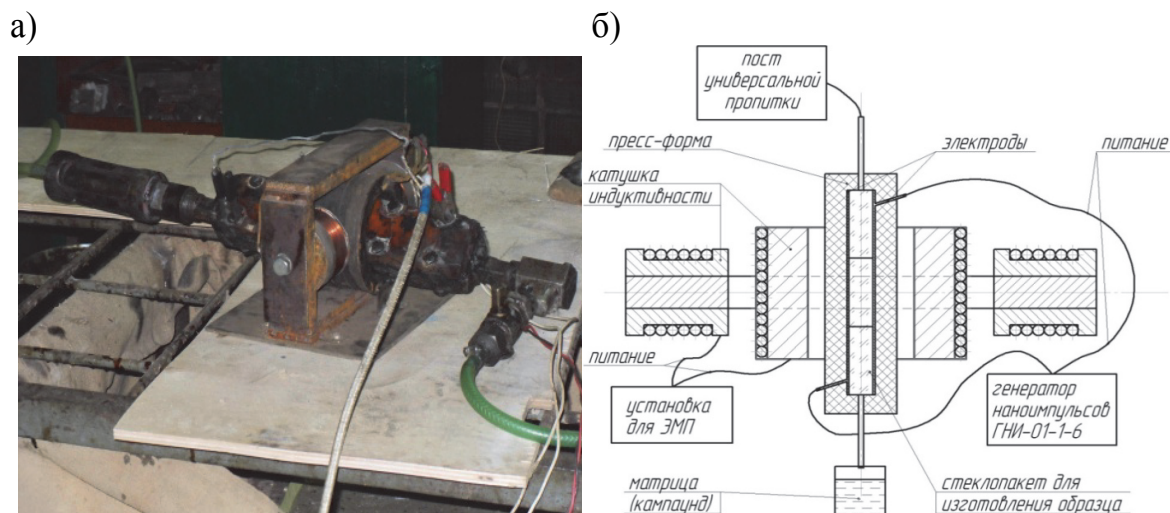


Рис. 1. Схема и общий вид экспериментальной установки

На рис. 2 – 5 представлены экспериментальные данные, позволяющие оценить взаимосвязь между видом и временем электрофизического воздействия на эпоксидное связующее Этал Т 210 и механическими характеристиками образцов из стеклопластика Этал Т 210-Т11-ГВС9.

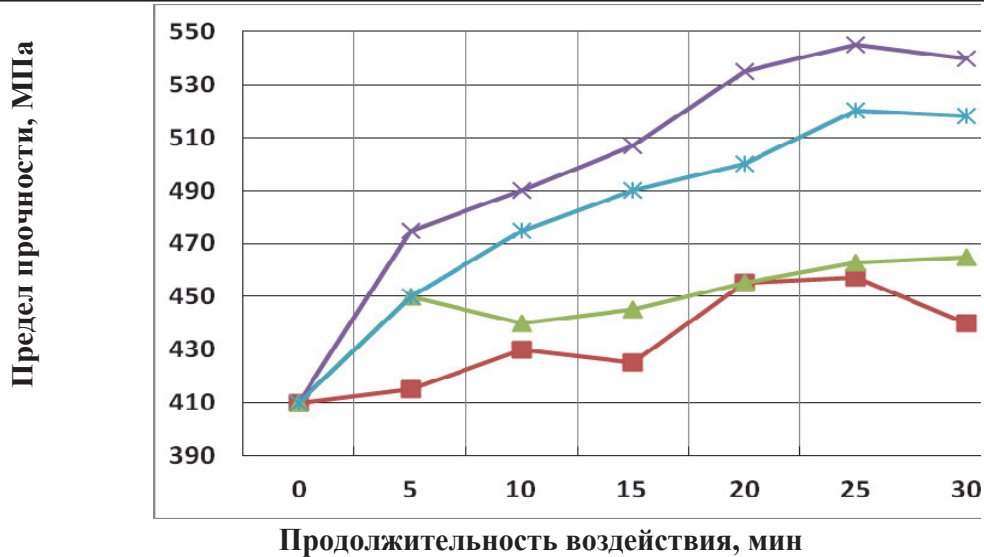


Рис. 2. Прочность при растяжении стеклопластика: 1 – воздействие НЭМИ; 2 – воздействие ЭМП; 3 – совместное воздействие НЭМИ и ЭМП; 4 – предварительное совместное воздействие НЭМИ и ЭМП

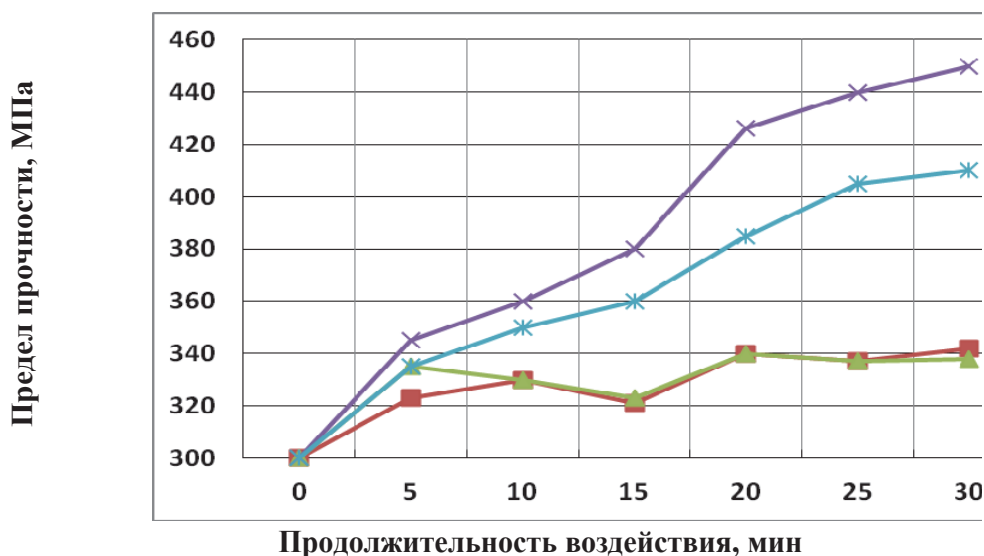


Рис. 3. Прочность при статическом сжатии стеклопластика: 1 – воздействие НЭМИ; 2 – воздействие ЭМП; 3 – совместное воздействие НЭМИ и ЭМП; 4 – предварительное совместное воздействие НЭМИ и ЭМП

Анализ полученных данных позволяет заключить, что совместная обработка НЭМИ и ЭМП (см. кривую 3, рис. 2 – 5) полимерного связующего непосредственно в форме позволяет повысить качество готового стеклопластика, о чем свидетельствуют более высокие значения механических характеристик материала по сравнению с базовыми значениями и полученными при индивидуальных обработках НЭМИ (см. кривую 1, рис. 2 – 5) и ЭМП (см. кривую 2, рис. 2 – 5). Максимальные приращения значений механических характеристик стеклопластика происходят после совместной обработки НЭМИ и ЭМП полимерного связующего в течение 25 мин, а именно:

- $\sigma_{сж}$ возрастает от 415 до 455 МПа при 25-минутной обработке, т.е. повышается предел прочности при сжатии на 9,8 %;

- σ_v увеличивается от 510 до 550 МПа при 25-минутной обработке, т.е. повышается предел прочности при растяжении на 7,3 %;
- $\sigma_{изг}$ возрастает от 715 до 765 МПа при 25-минутной обработке, т.е. повышается предел прочности при изгибе на 7,5 %;
- a_n возрастает от 325 до 360 кДж/м² при 25-минутной обработке, т.е. ударная вязкость повышается на 9,8 %.

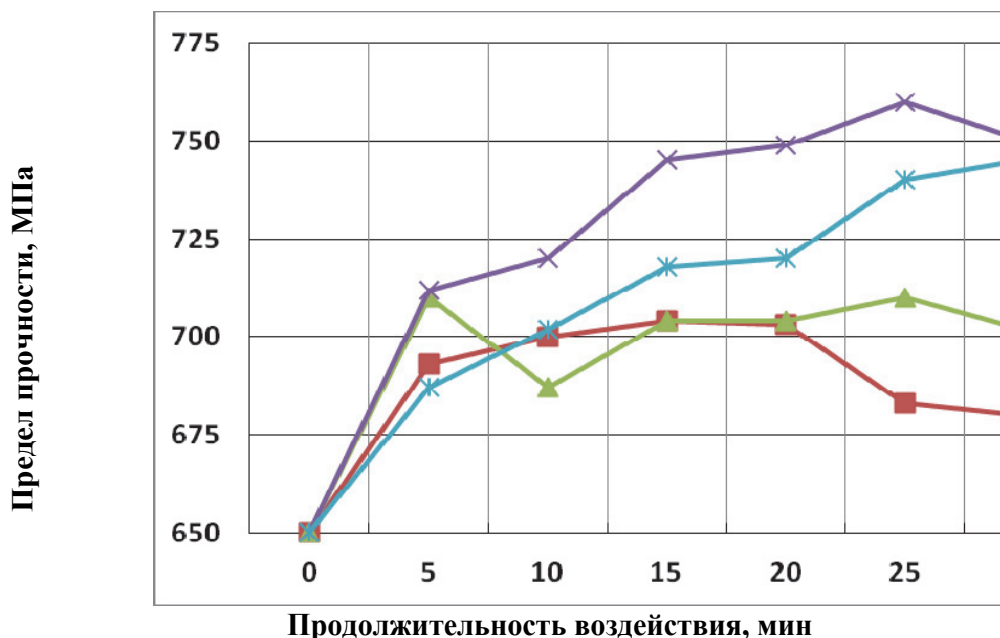


Рис. 4. Прочность при статическом изгибе стеклопластика: 1 – воздействие НЭМИ; 2 – воздействие ЭМП; 3 – совместное воздействие НЭМИ и ЭМП; 4 – предварительное совместное воздействие НЭМИ и ЭМП

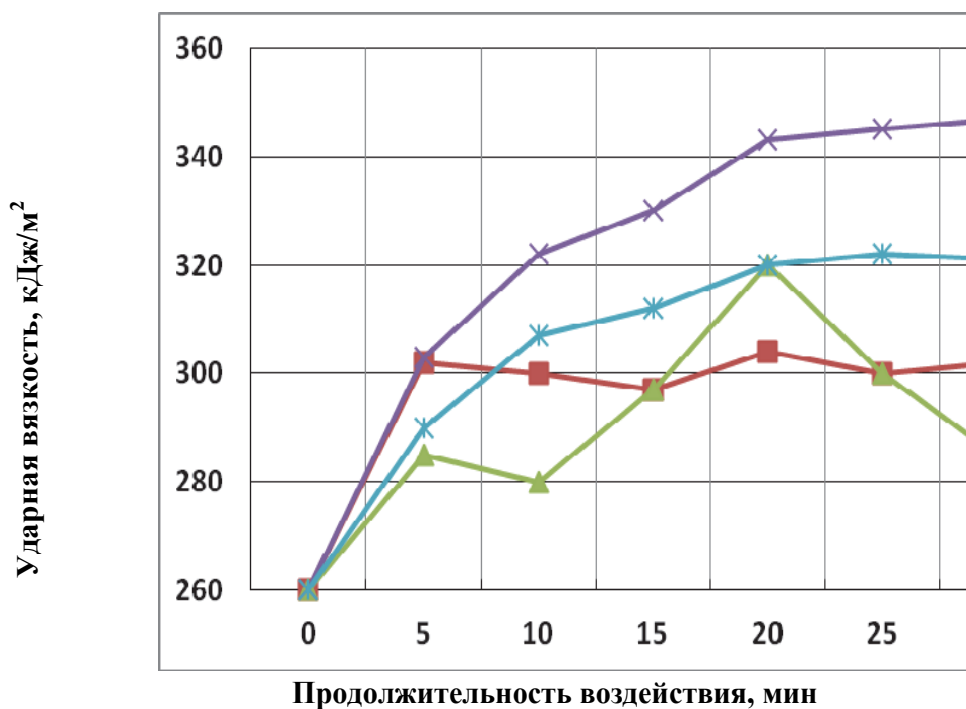


Рис. 5. Ударная вязкость стеклопластика: 1 – воздействие НЭМИ; 2 – воздействие ЭМП; 3 – совместное воздействие НЭМИ и ЭМП; 4 – предварительное совместное воздействие НЭМИ и ЭМП

Для проведения сравнительного анализа эффективности предложенного технического решения по обработке полимерного связующего непосредственно во время формования детали на рис. 2 – 5 представлены данные (см. кривую 4) по влиянию совместной обработки связующего НЭМИ и ЭМП предварительно операции формования, полученные ранее [6]. На основании сопоставления представленных данных можно сделать заключение о том, что электрофизическая обработка полимерного связующего непосредственно в форме способствует совершенствованию технологии производства ПКМ, так реализация такого подхода позволяет получать материал с более высокими прочностными показателями и осуществлять процесс формования деталей и изделий непрерывным образом, т.е. повысить производительность технологического процесса в целом.

Исследование надмолекулярной структуры полимерного связующего

В работе проводились микроструктурные исследования образцов отвержденного полимерного связующего с целью определения характера изменения надмолекулярной структуры полимера после его электрофизической обработки совместно НЭМИ и ЭМП. Данные исследования проводились с помощью растрового электронного микроскопа марки JSM-6480.

На рис. 6, а представлены микрофотографии необработанного образца. Видно, что структура образца сферолитная, сферолиты размером от 2 – 6 мкм по длине и от 2 – 5 мкм по ширине, сколы рельефные, что свидетельствует о хрупком разрушении образцов. После электрофизической обработки НЭМИ и ЭМП в течение 25 мин надмолекулярная структура композитов (см. рис. 6, б) значительно меняется. В первую очередь это отражается на механизме разрушения образцов, которое происходит по пластическому механизму, т.к. сколы отличаются сглаженными границами разрушения. Во-вторых, наблюдается еще более выраженная анизотропия роста надмолекулярных образований, которые представляют собой больше фибриллярную структуру, чем сферолитную, несмотря на наличие центров кристаллизации по сферолитному типу.

Таким образом, электрофизическая обработка полимерного связующего, находящегося непосредственно в пресс-форме, совместным воздействием НЭМИ и ЭМП привела к тому, что в образцах происходит переориентация сферолитных образований в фибриллярные.

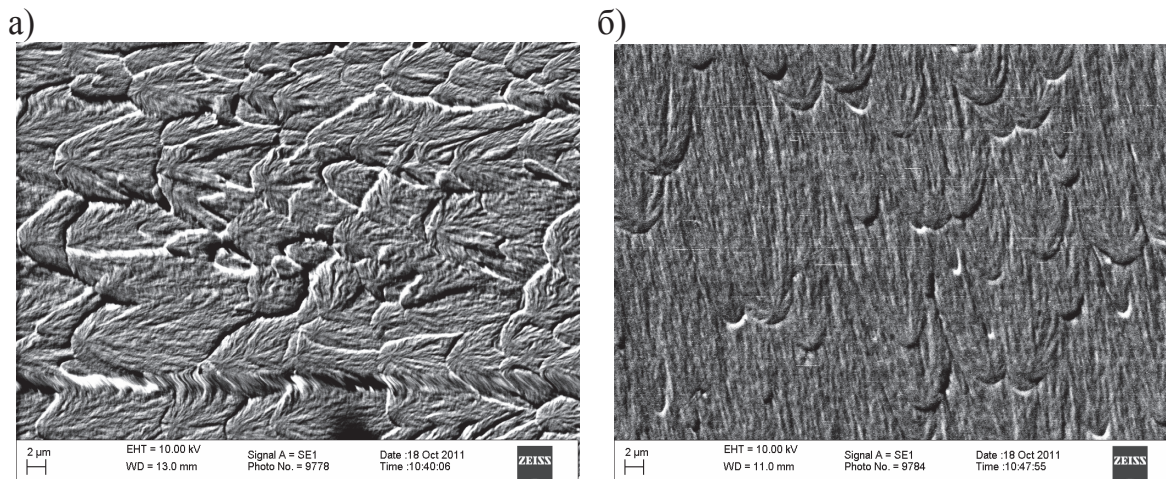


Рис. 6. Надмолекулярная структура полимерного связующего: а – до электрофизической обработки; б – после совместной обработки НЭМИ и ЭМП в течение 25 мин

Физическая интерпретация полученных результатов

Согласно дырочной концепции жидкого состояния [8] частицы жидкости находятся в гармоническом колебании около некоторого положения равновесия, при этом через некоторый промежуток времени атом может переместиться в новое положение равновесия, расположенное на близком к межатомному расстоянию.

Воздействие НЭМИ на полимерное связующее в жидком состоянии, очевидно, способно увеличить количество атомов, обладающих избыточной энергией, необходимой для совершения акта перехода частицы из одного положения равновесия в другое. Такой переход, как известно [8; 9; 10], вызывает разрыв химических связей. При этом разрыв связей обычно сопровождается образованием на их концах радикалов, обладающих высокой реакционной способностью, что является причиной последующего восстановления разорванных химических связей. Учитывая малую длительность одного импульса, составляющую 1нс , можно предположить, что вероятности процессов разрыва связей и их восстановления будут примерно одинаковы, т.е. в некоторых случаях равновесие между актами разрыва связей и актами их восстановления несколько смещается в сторону преобладания актов разрыва, а в других случаях – в сторону преобладания актов восстановления. Таким образом, индивидуальное воздействие НЭМИ при установленных параметрах на эпоксидный олигомер в жидком состоянии не приводит к значительным изменениям его структуры и, соответственно, механических характеристик получаемого впоследствии стеклопластика.

Индивидуальное воздействие ЭМП на исследуемый эпоксидный олигомер Этал Т 210 в жидком состоянии приводит к образованию в его объеме пондеромоторных сил, т.е. сил давления электромагнитных волн на помещенное в электромагнитное поле вещество. Механизмы возникновения и действия данных сил подробно исследованы и представлены в известном труде [11]. Под действием пондеромоторных сил происходит упругое деформирование основных полимерных цепей связующего, что связано с изменением в макромолекулах межатомных расстояний и валентных углов, а также с изменением межмолекулярных расстояний за счет преодоления межмолекулярных Ван-дер-ваальсовых сил упругости.

Таким образом, должно иметь место изменение формы макромолекул связующего, т.е. изменение их конформаций. В работах [9; 10] отмечено, что конформационные превращения макромолекул не сопровождаются разрывом химических связей. Следовательно, можно заключить, что индивидуальное воздействие ЭМП при установленных параметрах на эпоксидный олигомер в жидком состоянии не приводит к значительным изменениям его структуры и, соответственно, механических характеристик получаемого впоследствии стеклопластика.

При комбинированном воздействии НЭМИ и ЭМП одновременно имеют место, по всей вероятности, вышеописанные эффекты. Изменение конформации макромолекул с большой вероятностью позволит обеспечить интенсивное взаимодействие образующихся во время обработки НЭМИ активных радикалов и концевых групп друг с другом, образуя поперечные химические связи между макромолекулами. Это должно привести к образованию, возможно частично, пространственной структуры полимерного связующего на данной стадии производства стеклопластика. Возможность протекания реакции сшивания в полимерах до проведения технологической операции отверждения установлена, например, исследованиями [10]. При последующем отверждении связующего происходит, возможно, окончательное формирование пространственной структуры полимерного связующего. Образование пространственной структуры способствует повышению ряда физико-механических свойств конечного продукта – стеклопластика, что и подтверждается результатами экспериментальных исследований [7].

Выводы

1. Доказано экспериментально, что модификация полимерного связующего непосредственно в форме на основе совместного облучения наносекундными электромагнитными импульсами и электрическим переменным полем позволяет получать материал с более высокими, до 15 %, прочностными показателями по сравнению с вариантом предварительной обработки и осуществлять процесс формования деталей и изделий непрерывным образом, т.е. повысить производительность технологического процесса в целом.

2. Методом растровой электронной микроскопии установлена трансформация надмолекулярной структуры полимерного связующего от сферолитной к фибриллярной после его совместной обработки наносекундными электромагнитными импульсами и электромагнитным полем. Трансформация надмолекулярной структуры полимерного связующего приводит к образованию



пространственной структуры, что способствует повышению ряда физико-механических свойств конечного продукта – стеклопластика.

3. Применение полученного стеклопластика с повышенной прочностью открывает широкие перспективы изготовления и использования деталей и изделий, трубопроводных систем в производственной деятельности машиностроительных, авиа и судостроительных предприятий, нефтегазоперерабатывающих производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулезнев, В. Н. Химия и физика полимеров / В. Н. Кулезнев, В. А. Шершнев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 2007. – 367 с.
2. Зеленев, Ю. В. Прогнозирование изменения физических свойств полимерных материалов при разных способах их модификации / Ю. В. Зеленев, В. И. Хромов // Пластические массы. – № 11. – 2002.
3. Кестельман, В. Н. Термомагнитная обработка полимерных композиционных материалов / В. Н. Кестельман, А. Д. Стадник. – М.: НИИ-ТЭХИМ, 1989.
4. Бартенев, Г. М. Курс физики полимеров / Г. М. Бартенев, Ю. В. Зеленев. – Л.: Химия, 1976.
5. Арьев, А. М. Термоэлектрическая модификация полимерных материалов / А. М. Арьев, Ю. В. Зеленев // Наука и технология в России. – 1995. – № 9. – С. 13.
6. Еренков, О. Ю. Исследование механических свойств полимерных композитных материалов / О. Ю. Еренков, П. В. Игумнов, В. Л. Никищечкин // Вестник машиностроения. – 2010. – № 4. – С. 61-63.
7. Еренков, О. Ю. Исследование эффективности влияния предварительной электрофизической обработки связующего на прочностные характеристики ПКМ / О. Ю. Еренков, В. Л. Никищечкин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – № I-1 (2). – С. 99-104.
8. Френкель, Я. И. Кинетическая теория жидкостей / Я. И. Френкель. – Л.: Наука, 1975.
9. Аскадский, А. А. Деформация полимеров / А. А. Аскадский. – М.: Химия, 1973. – 448 с.
10. Тагер, А. А. Физикохимия полимеров / А. А. Тагер. – М.: Химия, 1978. – 544 с.
11. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Физматгиз, 1959. – 532 с.

Марьин Б. Н., Ким В. А., Сысоев О. Е., Пхон Хтет Кьяв, Мин Ко Хлайнг
V. N. Maryn, V. A. Kim, O. Ye. Sysoyev, Phone Htet Kyaw, Min Ko Hlaing

АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГИДРОГАЗОВЫХ СИСТЕМ ТРУБОПРОВОДОВ

DEFECT ANALYSIS OF OPERATING HYDROGASIFIED PIPING SYSTEMS

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Boris N. Maryn – D.Sc. in Engineering, professor, Mechanical Engineering and metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Vladimir A. Kim – D.Sc. in Engineering, professor, Materials and technology of new materials Department, Komsomolsk-on-Amur state technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

Mr. Oleg Ye. Sysoyev – D.Sc. in Engineering, Professor, Dean of the of Cadastre and Civil Engineering Faculty; Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave. (Russia, Komsomolsk-on-Amur). Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: fks@knastu.ru.

Пхон Хтет Кьяв – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Phone Htet Kyaw – a postgraduate student, Materials and technology of new materials Department, Komsomolsk-on-Amur state technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Мин Ко Хлайнг – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Min Ko Hlaing – a postgraduate student, Materials and technology of new materials Department, Komsomolsk-on-Amur state technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В статье проведен анализ причин возникновения дефектов в трубопроводах и гидрогазовых системах при их изготовлении, сборке и монтаже агрегатов, а также эксплуатации. Разработана подробная классификация неисправностей трубопроводов и гидрогазовых систем. Определены факторы надежности трубопроводных коммуникаций и агрегатов. Разработаны предложения по дальнейшему совершенствованию технологии ремонта трубопроводных систем. Показано влияние конфигурации и материала трубопроводов на надежность работы гидрогазовых систем в целом. Особое внимание уделено дефектам соединительных элементов трубопроводов на этапе их изготовления, монтажа, а также эксплуатации.

Summary. The article analyzes the causes of defects in pipelines and hydro gasified systems in their manufacture, assembly and installation units, as well as in operation. A detailed classification of the fault lines and hydro gasified systems is drawn. The factors of reliability of pipeline and communications units are determined. Further improvement of repairing pipeline system technology is suggested. The authors show the impact of piping configuration and its material on the system reliability as a whole. Particular attention is paid to the defects of pipelines connecting elements during their manufacture, installation and operation.

Ключевые слова: классификация дефектов, трубопроводы, гидрогазовые системы, деформация, дефектация, негерметичность, соединительные элементы.

Key words: classification of defects, pipelines, hydro gasified system, deformation, flaw detection, leakage, connecting elements.

УДК 621.01

Трубопроводы и гидрогазовые системы находят широкое применение во всех отраслях машиностроения, выход их из строя может привести не только к экономическим потерям, но и к техногенным катастрофам. Особенно это важно при строительстве и эксплуатации нефтяных и газовых платформ северных районов около береговых линий, где условия работы жёсткие по температурным колебаниям, а окружающая среда агрессивная, вызывающая коррозию (морская вода).

Трубопроводные магистрали гидрогазовых систем предназначены для соединения источников энергии систем (насосов, гидроаккумуляторов, баллонов) с потребителями энергии или исполнительными механизмами (силовыми цилиндрами, гидроусилителями, демпферами, насосами гидромоторами и др.). Эта связь осуществляется подачей от источников к потребителям рабочего вещества (жидкости или газа) под давлением через управляющие и распределительные устройства (краны, клапаны, золотники и др.) по системе трубопроводов.

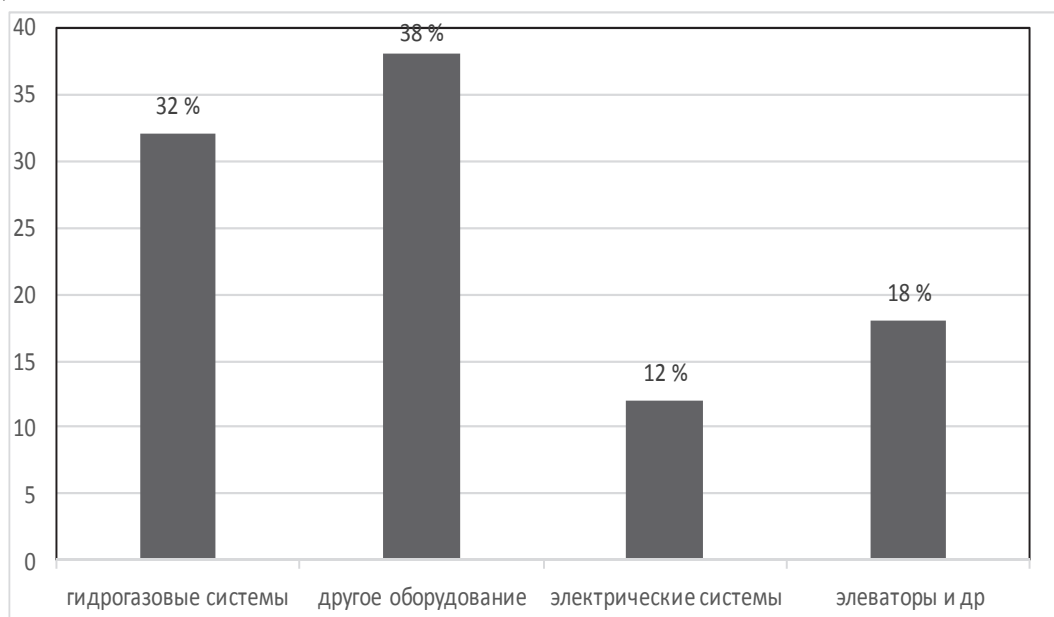
Аварии на трубопроводных магистралях и гидрогазовых системах могут привести к человеческим жертвам и экологическим катастрофам. Поэтому исследования дефектов трубопроводных магистралей и гидрогазовых систем позволяют обеспечивать их качество и изготовления, монтаж и эксплуатацию. Рабочее давление в трубопроводах, в частности современных самолетов (вертолетов), может достигать значительных величин [1].

Анализ статистических отказов и неисправностей, выявленных при эксплуатации новых и ремонтных изделий авиационной техники, показывает, что надежность работы изделия в целом в большой степени определяется надежностью работы его жидкостно-газовых систем и, в частности, надежностью работы его трубопроводных магистралей (см. рис. 1). Наибольший процент обнаруживаемых дефектов приходится на трубопроводы систем высокого давления (гидравлические и воздушные) [2; 3].

Анализ материалов дефектации системы в процессе их ремонта на эксплуатационных ремонтных предприятиях (ЭРП) подтверждает в основном этот вывод, несмотря на то, что значительная часть трубопроводов заменяется в процессе эксплуатации (до поступления в ремонт) [2; 3]. Наиболее распространенными неисправностями трубопроводных магистралей являются (см. рис. 1, б) нарушение герметичности из-за дефектов ниппельных соединений (до половины и более от числа всех дефектов трубопроводов) и разрушение трубопроводов, также приводящее к негерметичности систем. Графики изменения интенсивности неисправности в авиастроении трубопроводов, построенные для новых и ремонтных изделий, показывают, что до 70...80 % всех неисправностей обнаруживается на первых 50...60 ч налета после изготовления изделий или выпуска их из ремонта (см. рис. 2).

Результаты качественного и количественного анализов, выполненных по данным эксплуатирующих и ремонтных организаций, свидетельствуют о том, что характер проявления и причины появления основных наиболее массовых и опасных дефектов трубопроводов аналогичны. Поэтому существует возможность классификации дефектов трубопроводов по основным признакам с последующей разработкой типовых методов выявления и устранения дефектов, а также рекомендаций по их предупреждению. Эта работа должна систематически проводиться на ЭРП одновременно с совершенствованием методов дефектации, ремонта и изготовления трубопроводов. Наиболее опасными неисправностями трубопроводов гидрогазовых систем являются механические повреждения труб, вызывающие негерметичность систем. Негерметичность систем может быть также вызвана коррозионным разрушением труб. В результате неисправностей трубопроводов может происходить заклинивание золотниковых и плунжерных пар агрегатов гидравлических систем из-за попадания в них продуктов разрушения трубопроводов.

а)



б)

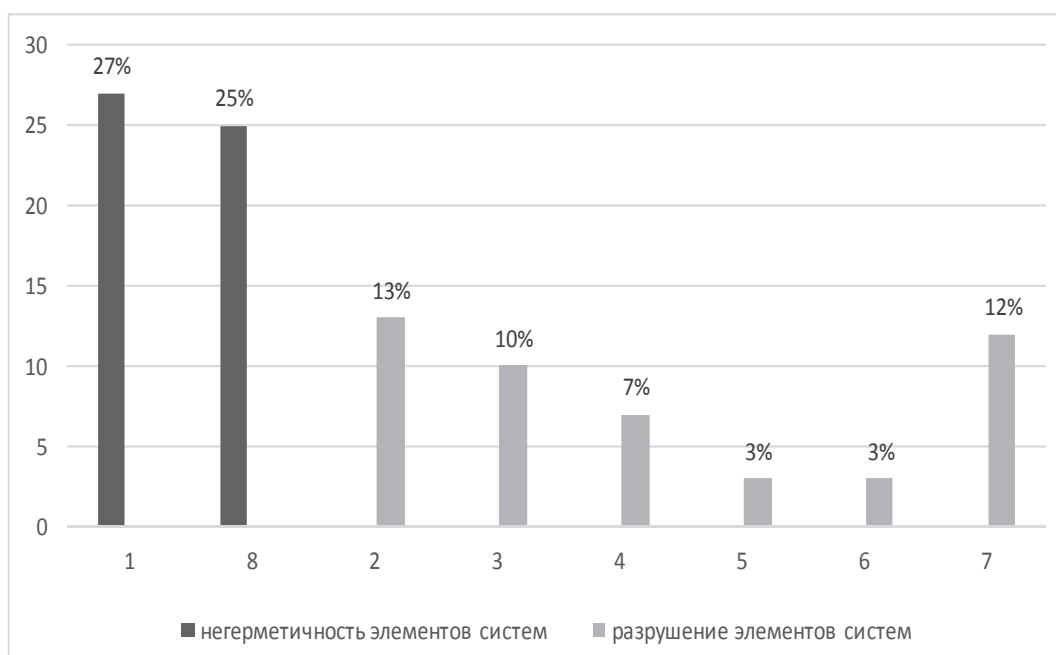


Рис. 1. Диаграммы распределения отказов и дефектов: (а) по системе в целом: 1 – газогозовые системы; 2 – другое оборудование; 3 – электрические системы; 4 – элеваторы и др.; б – по трубопроводным системам и характеру их неисправностей: 1 – агрегаты; 2 – трубопроводы в местах развальцовки, пайки и сварки (в заделках); 3 – фильтры, гидроусилители, гидроаккумуляторы и др.; 5 – соединительная арматура (ниппели, гайки, штуцера, крестовины, угольники и др.); 6 – трубопроводы из-за металлургических дефектов; 7 – топливные и гидравлические системы; 8 – соединения трубопроводов.

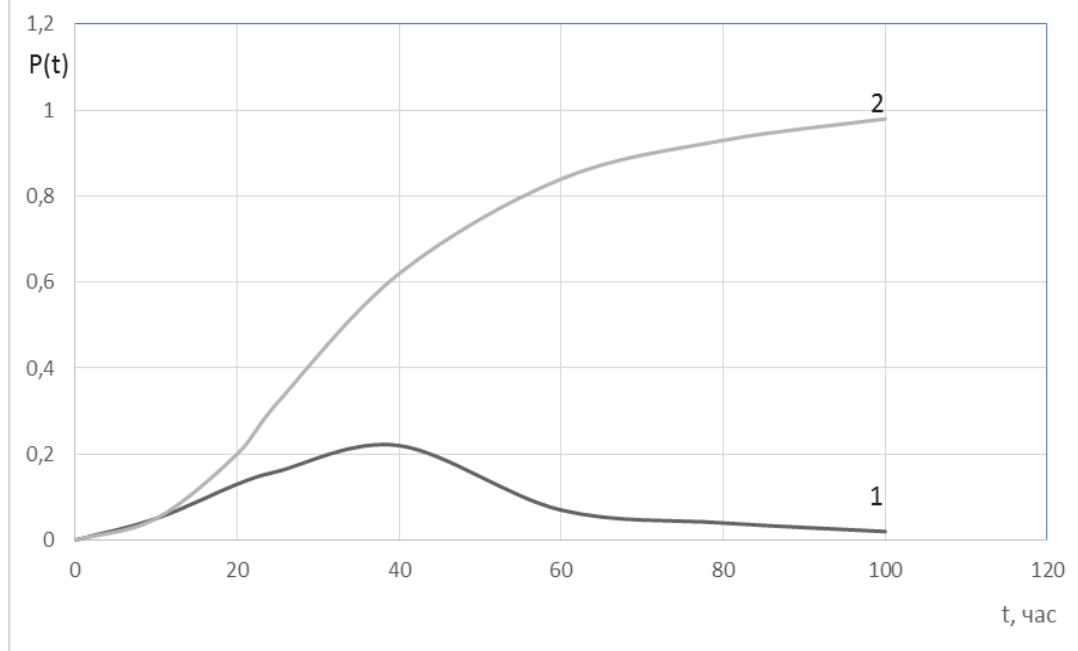


Рис. 2. Вероятность отказов (1) и накопление отказов (2) трубопроводов в авиастроении

Основными факторами, определяющими надежность трубопроводных коммуникаций, являются:

- качество изготовления и монтажа трубопроводов в производстве и при ремонте [4-7];
- эксплуатационные условия работы трубопроводов (вибрации, температуры, пульсации давления и т.п.); качество антикоррозионной защиты труб и деталей соединительной арматуры; качество технической эксплуатации (соблюдение правил ухода, использование качественного инструмента и т.п.).

Для обеспечения высокого уровня надежности трубопроводных коммуникаций при эксплуатации и ремонте необходимо знание основных видов неисправностей трубопроводов, причин их возникновения и методов предупреждения, а также систематическое совершенствование технической эксплуатации трубопроводов и методов их ремонта, а также классифицировать неисправности трубопроводов и гидрогазовых систем.

Классификация неисправностей трубопроводов произведена по основным группам разрушений и повреждений, которые, в свою очередь, делятся на виды неисправностей (см. рис. 3). В классификатор включены также неисправности, возникающие в результате поломок, пожаров и других отклонений от эксплуатационных режимов работы систем. Возникновение неисправностей трубопроводов обусловлено целым рядом факторов. Каждая неисправность имеет свой характер проявления, отличительные признаки и особенности выявления. Ниже дается краткая характеристика неисправностей в последовательности, принятой в классификаторе. Нумерация приводится в соответствии с присвоенными индексами.

Разрушения труб, встречающиеся при эксплуатации, монтаже и ремонте монтажных заготовок, подразделяются на следующие основные виды: поперечные усталостные трещины (разрушения); продольные трещины (разрывы); разрушения от воздействия внешних сил (нагрузок); разрушения от воздействия высоких температур. Кроме того, в эту группу можно бы было включить разрушение стенок труб (образование свищей) при их коррозионном поражении. Однако для удобства классификации этот дефект отнесен к группе с индексом 300.

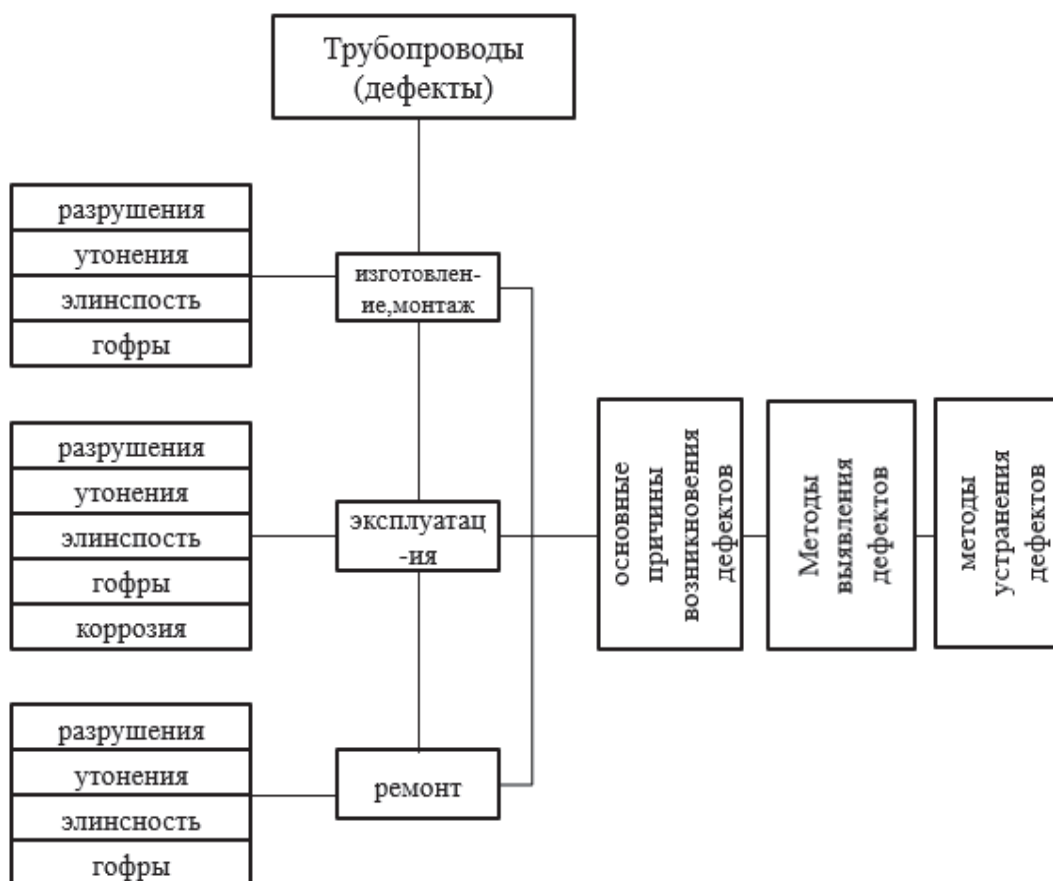


Рис. 3. Классификация неисправностей трубопроводов

Поперечные усталостные трещины (разрушения). Этот вид разрушения труб является одним из наиболее распространенных дефектов. Трещины возникают в зоне соединения труб со штуцерами агрегатов и соединительных элементов, в зоне сварных труб с ниппелями, а также в зоне крепежных точек.

Основными причинами усталостного разрушения труб в поперечном сечении могут быть:

- высокий уровень изгибных колебаний труб, источником возбуждения которых обычно являются вибрации элементов конструкции монтажных заготовок и колебания давления рабочей жидкости; эксплуатационных переменных нагрузок;
- основными источниками монтажных напряжений являются монтажные неточности при сочленении труб и деталей арматуры (перекос, несоосность и недотяг);
- повторное нагружение материала труб в зоне заделки в случае периодического касания о них подвижных элементов конструкции;
- возникновение поперечных усталостных трещин стенок труб возможно также при их радиальных колебаниях из-за пульсаций давлений рабочей жидкости.

Типичным внешним признаком негерметичности соединения из-за образования сквозной усталостной трещины в зоне развальцовки трубы является возникновение в процессе эксплуатации течи рабочей жидкости из-под хвостовика ниппеля. При попытке устранить негерметичность дополнительным подтягиванием накидной гайки течь обычно усиливается.

В сварном соединении усталостное разрушение может быть вызвано, кроме указанных выше причин, наличием резких переходов в зоне стыка, пережогом материала, непроваром и т.д.

Продольные трещины и разрывы. К этому виду дефекта относятся усталостные трещины и разрывы от воздействия внутреннего давления.

Усталостное продольное разрушение труб наиболее часто возникает в сечениях с большой овальностью, которая образуется главным образом при гибке труб. Источником колебаний искаженного сечения трубы в этом случае является пульсация давления рабочей жидкости.

Повторные нагружения материала стенок трубы в зонах максимальной кривизны овала возникают также в случае ее периодических изгибов в процессе работы механизмов (например, в поворотных бесшланговых соединениях) или при вибрациях изогнутой трубы в плоскости изгиба.

Отличительными признаками усталостной трещины по сравнению с трещиной, возникающей в результате ослабления стенки трубы металлургическими дефектами (волосовинами, закатами и др.), являются характерные завалы внешних кромок трещины и их извилистость. При наличии волосовины кромки трещины имеют острые края, извилистость отсутствует.

Разрыв стенки трубы из-за местного ее ослабления (разностенность, утонение) или из-за чрезмерного избыточного давления характеризуется значительным раскрытием и пластической деформацией (вытяжкой) материала стенок в зоне разрыва. При воздействии чрезмерного давления регистрируется раздутие трубы по всей ее длине. В случае недостаточной прочности стенки трубы в зоне разрушения раздутие происходит только вблизи места разрушения.

Разрушения от воздействия внешних сил (нагрузок). В результате поломок гидрогазовых систем или попадания в зону подвижных элементов посторонних предметов возможны следующие разрушения труб: продольный разрыв; излом от поперечного или продольного изгиба; перерубание (срез) соударяющимися деталями; срез со скручиванием.

Разрушение от растягивающих нагрузок характеризуется образованием шейки (сужения) в зоне разрыва.

Если растягивающие усилия действуют на трубопровод, состоящий из нескольких труб, то, как правило, его разрушение происходит из-за вырыва из заделки одной из труб (см. группу с индексом 433).

Излом трубы от изгиба наступает лишь при последующих повторных ее распрямлениях и изгибах за счет вторичных перемещений заделок (отбортовочных точек) трубы.

Разрушения от воздействия высоких температур. При пожаре, прорыве горячих газов из камер сгорания (форсажных камер) двигателей, замыкании электрического провода на трубу и других видах воздействия высоких температур возможны разрушения труб.

Разрушение стальных труб от воздействия внутреннего давления рабочей жидкости (газа) при их местном нагреве сопровождается значительным раскрытием разрыва и пластической деформацией (вытяжкой) материала стенки трубы в зоне нагрева.

Трубы из алюминиевых сплавов (АМгМ, АМц) при нагреве до температур не более 300...350 °С разрушаются так же, как стальные трубы. При более высоких температурах вследствие потери пластичности материала разрушение труб происходит при меньшем внутреннем давлении и сопровождается «выпаданием» целых участков с характерной крупнокристаллической поверхностью излома.

Разрушение стенок труб при попадании на них расплавленного металла или замыкании электропровода сопровождается образованием отверстия с характерным оплавлением кромок, что позволяет отличить его от отверстий (свищей), которые могут образоваться при коррозии с последующим обгоранием трубопровода при пожаре.

Внешние повреждения труб. Наиболее распространенными являются следующие группы внешних повреждений труб:

- повреждения защитного покрытия (без нарушения поверхности материала трубы);
- повреждения поверхностей труб, не имеющих защитного покрытия и с защитным покрытием; нарушение заданной геометрии труб.

Внешние повреждения труб могут являться следствием касания их друг о друга или об элементы конструкции, нарушения технологии монтажа, использования некачественного инструмента и т.п.

Повреждения защитного покрытия могут быть в виде потертостей в зоне закрепления трубы колодками, разного рода дефектов при монтажно-демонтажных работах.

Кроме того, повреждениями покрытий являются их растрескивание, вспучивание, отслоение из-за воздействия внешних факторов (агрессивной среды, высоких температур и т.д.) или некачественного их нанесения при изготовлении трубопроводов. При воздействии высоких температур возможно потемнение и обугливание защитных покрытий.

Повреждения поверхностей труб. К этому виду повреждений относятся риски, царапины, мелкие забоины (не более 0,1 мм), глубокие забоины (более 0,1 мм) и вмятины, потертости из-за касания об элементы конструкции или о сопряженные трубопроводы с образованием свищей.

Нарушение заданной геометрии труб. При изготовлении трубопроводов, монтаже и их эксплуатации, ремонте возможны следующие нарушения заданной геометрии труб [4-7]:

- резкие перегибы (надломы) труб;
- недопустимая (более 5... 10 %) овализация труб при их гибке;
- деформация (смятие) трубы колодками и кронштейнами;
- скручивание труб из-за провертывания штуцеров при затяжке накидных гаек или при заклинивании развальцованной части трубы и ниппеля в гайке и их совместном провертывании;
- раздутие трубы при гидроударе или чрезмерном повышении внутреннего давления.

Коррозионное поражение труб и соединительных деталей. Различают следующие основные формы коррозионного разрушения:

- равномерную (поверхностную) коррозию;
- местную (точечную, язвенную) коррозию;
- межкристаллитную коррозию.

Кроме того, встречаются такие разновидности местной коррозии, как транскристаллитная, подповерхностная и др.

По виду продуктов коррозии можно определить механизм ее протекания. Например, при электрохимической коррозии продукты рыхлые, легко удаляются механическим путем. Продукты химической коррозии (газовой, коррозии из-за содержания в топливах, маслах и других жидкостях химически активных примесей и компонентов) имеют более плотную структуру.

Очагом коррозионного поражения труб являются участки с нарушенным защитным покрытием, а также зоны воздействия коррозионно-активных сред. Наиболее часто подвержены коррозии внутренние поверхности участков трубопроводов, расположенных в самой низкой части системы и изогнутых в вертикальной плоскости (U-образных участках), где возможно скопление влаги и различных осадков, способствующих возникновению коррозии.

С течением времени может наступить сквозное разрушение трубы с образованием свища.

При обнаружении точечной или язвенной коррозии на внутренней поверхности труб производится выборочный контроль (с разрезкой) труб данного типа (10 % труб из АМГМ и АМц и 5 % стальных).

Соединительные детали арматуры трубопроводов (гайки, ниппели, проходные штуцера и др.) наиболее подвержены механическим воздействиям при сборке и разборке соединений. Смятия, забоины, истирание резьбы и другие дефекты вызывают повреждение защитного покрытия и, как следствие, коррозионное поражение соединительных деталей.

Основными последствиями коррозии на соединительных деталях являются:

- резкое разрастание трещины («прихватывание») в резьбовом соединении и в парах ниппель-труба, ниппель-гайка, в результате чего возможны такие повреждения труб и деталей, как скручивание, смятие граней, срез резьбы и т.д.;
- загрязнение систем продуктами коррозии при монтажно-демонтажных работах.

Дефекты соединительных элементов труб. Основными видами дефектов соединительных труб являются (см. рис. 4):

- 1) дефекты, возникающие в процессе разделки (развальцовки, разбортовки, зиговки и др.) концов труб под соответствующий тип соединения;
- 2) дефекты сварки (пайки) ниппелей с трубами;
- 3) повреждения соединительных элементов труб в процессе эксплуатации и ремонта.

Дефекты первой и второй групп обусловлены несовершенством отдельных операций технологии подготовки труб к соединению и некачественным выполнением этих операций (несоблюдением заданных режимов, плохой настройкой станков и приспособлений и т.п.), наличием металлургических дефектов и другими причинами.

Дефекты третьей группы образуются главным образом вследствие отклонений от технических требований (при перезатяжке соединений, сборке соединений с большими монтажными неточностями, использовании некачественного инструмента и т.д.).

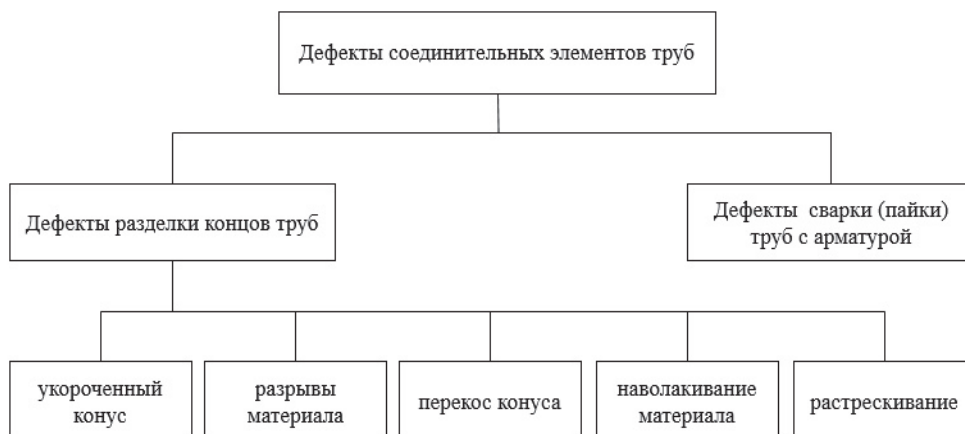


Рис. 4. Дефекты соединительных элементов

Дефекты разделки концов труб. При контроле состояния труб могут быть выявлены следующие дефекты:

- укороченный конус развальцованной части трубы. Дефект возникает в результате неправильной первоначальной установки трубы перед развальцовкой (недостаточное ее выступание над ниппелем или матрицей) или вследствие сползания (утопания) трубы под действием осевых усилий от развальцовочной головки из-за недостаточного зажима ее в матрице;
- разрывы материала трубы из-за чрезмерного завышения ее установочной высоты при развальцовке;
- перекос конуса трубы из-за несоосности трубы и развальцовочной головки, либо из-за развальцовки трубы без фиксации ее в ниппеле или в матрице;
- наволакивание материала на конической части трубы, заусенцы из-за нарушения режима развальцовки (отсутствие смазки, заклинивание роликов головки и др.);
- растрескивание и разрывы материала трубы из-за наличия в нем волосовин, закатов и других металлургических дефектов;
- разностенность, неравномерная развальцовка (разбортовка, зиговка).

Все вышеперечисленные дефекты ведут к неравномерности соединения, поэтому при их обнаружении трубы должны подвергаться отбраковке.

Дефекты сварки (пайки) труб с арматурой. Разрушения труб по месту сварки (пайки) их с соединительными деталями, а также негерметичность соединений могут быть вызваны наличием таких дефектов, как непровар (непропай) в зоне шва, пережог материала, плохая подгонка (стыковка) свариваемых деталей и т.п. Выявление указанных дефектов наиболее эффективно осуществляется по образцу-свидетелю и с помощью макро- и микрошлифов в плоскости, перпендикулярной шву.

Повреждения соединительных элементов труб. В процессе монтажно-демонтажных работ на трубопроводах возникают следующие основные повреждения соединительных элементов труб:

- смятие и обламывание материала конической части трубы, имевшей завышенную высоту;
- смятие, "съедание" материала конической части трубы при неоднократных переборках соединения и чрезмерных его затяжках;
- смятие материала конической части трубы и вырыв ее из заделки из-за чрезмерной затяжки соединения;
- односторонняя вытяжка конической части трубы и разрыв материала трубы в этой зоне из-за наличия в соединении монтажных неточностей (перекоса, несоосности и натяга);
- срез конической части трубы при сочленении труб, развальцованных на угол 74° , со штуцерами, имеющими угол конуса 60° . Дефект встречается на изделиях, выпущенных в течение 1950 – 1955 гг., когда происходила замена нормалей ГОСТ 551-41...ГОСТ 570-41 (угол конуса 60°) нормальями МАП 1001А50, 115СТ54 и др. (угол конуса 74°);
- повреждения защитных покрытий (царапины, забоины и т.п.), являющиеся следствием использования нестандартного инструмента и небрежного выполнения монтажно-демонтажных работ.

Дефекты деталей соединительной арматуры. Детали соединительной арматуры (гайки, ниппели, штуцера, уплотнительные детали и др.) наиболее подвержены повреждениям при изготовлении, эксплуатации и ремонте трубопроводных систем монтажных заготовок. Помимо ошибок и небрежностей при проведении монтажно-демонтажных работ, дефекты деталей соединительной арматуры могут возникать вследствие эксплуатационной и ремонтной нетехнологичности соединений (из-за плохих подходов, отсутствия обзора, большого объема вспомогательных операций и т.п.), а также из-за конструктивного несовершенства соединений (недостаточной прочности отдельных элементов, нерационального выбора типа уплотнительных деталей, их посадочных мест и т.п.).

Дефекты накидных гаек. Типичными повреждениями гаек являются: разрыв контрольных отверстий; смятие граней; истирание и срез резьбы.

Разрыв контрольных отверстий затрудняет контровку соединения, однако непосредственного влияния на герметичность соединения не оказывает.

Смятие грани и повреждение резьбы - дефекты, делающие гайки полностью непригодными к дальнейшей эксплуатации.

Важными условиями предотвращения смятия граней и среза резьбы гаек являются использование качественных ключей, обеспечение удобных подходов к соединениям. Кроме того, усилия приложения к ключу не должны превышать допустимых норм.

Дефекты ниппелей. Основными повреждениями ниппелей (накидных, приварных и паяных) являются:

- продольные трещины, разрывы из-за наличия в материале ниппелей металлургических дефектов (закатов, волосовин и т.п.);
- деформация (расклинивание) вследствие недостаточной прочности ниппелей и перезатяжки соединений, забоины, царапины, вмятины и др.

Разрыв ниппеля вызывает расслабление стыка и, как следствие, негерметичность соединения. Деформация (расклинивание) ниппеля ведет к его заклиниванию в гайке.

Неисправности соединений в сборе. При испытании систем на прочность, герметичность, а также проведении монтажно-демонтажных работ и исследовании аварийных систем на трубопроводах могут быть выявлены дефекты, присущие только соединениям труб в сборе. Их можно подразделить на следующие виды: монтажные дефекты, негерметичность соединений и повреждения соединений от воздействия внешних нагрузок. Кроме того, к числу неисправностей собранных магистралей следует отнести загрязнения их внутренних полостей продуктами разрушения труб и соединительных элементов, а также попадание в систему герметизирующих смазок (составов).

Основными причинами неисправностей соединения труб в сборе являются дефекты соединительных элементов труб и деталей арматуры, монтажные неточности, недозатяжка или перезатяжка соединений, конструктивное несовершенство соединений, небрежность при монтаже и об-

служивании, а также воздействие на трубопроводы внешних нагрузок при поломках и авариях монтажных заготовок.

Монтажные дефекты соединений труб в сборе. К их числу относятся: обрыв (отсутствие) контровки; несвинчиваемость соединения из-за наличия перекоса между трубой и штуцером.

Типичным признаком перекоса в соединении является наличие одностороннего смятия (деформации) материала на конической части штуцера, одностороннего истирания (иногда и среза) витков резьбы штуцера, а также наличие на поверхности хвостовика ниппеля спиральных следов от касания гайки; неразвинчивание соединения из-за «пригорания» резьбы; провертывание гайки вместе с трубой из-за расклинивания в ней ниппеля и конической части трубы.

Негерметичность соединений труб является самым распространенным дефектом в эксплуатации трубопроводных систем. Причинами негерметичности соединений могут быть:

- потеря контакта в уплотняемом стыке трубы и штуцера из-за ослабления затяжки, усадка уплотнительных деталей и др.;

- наличие на уплотняемых поверхностях повреждений различного рода;

- временное расслабление стыка при тепловом ударе (резком охлаждении нагретых деталей соединения), когда линейное (осевое и радиальное) сжатие обхватывающих деталей (гаек) временно запаздывает относительно сжатия обхватываемых деталей (ниппеля, конической части трубы, штуцера);

- образование сквозной усталостной трещины на границе перехода конической части трубы в цилиндрическую и др.

По характеру течи рабочей жидкости в соединении можно без его разборки приблизительно определить причину негерметичности:

- а) течь рабочей жидкости через резьбовое соединение гайки и штуцера, а также из-под торца гайки свидетельствует о негерметичности стыка между трубой и штуцером;

- б) подтекание жидкости из-под хвостовика ниппеля, как правило, происходит в случае возникновения сквозной поперечной трещины в трубе, в зоне ее развальцовки;

- в) внезапное возникновение негерметичности соединения труб в горячей зоне двигателя примерно через 5...6 с после начала движения по ним охлажденной жидкости (масла, топлива) и последующее исчезновение негерметичности являются признаком теплового удара.

Рекомендации по учету и анализу неисправностей трубопроводов:

- анализ неисправностей трубопроводов гидрогазовых систем проводится с целью установления конкретных причин их возникновения и разработки мероприятий по предупреждению подобных случаев;

- регистрация (учет) неисправностей трубопроводов в процессе монтажа на ЭРП, а также получение информации о неисправностях трубопроводов, выявленных в процессе эксплуатации;

- метод устранения дефекта указывается в соответствии с классификатором и технологией ремонта изделия;

- учет неисправностей трубопроводов, выявленных на ремонтных изделиях в процессе их эксплуатации, осуществляется на АРП путем получения и обобщения информации от эксплуатирующих организаций.

При статистическом анализе неисправности трубопроводов классифицируются как по их группам и видам в соответствии с классификатором, так и по системам, участкам систем и типам (наименованиям, чертежным номерам) трубопроводов. Материал трубопроводов с часто повторяющимися и опасными дефектами подвергается тщательному анализу с целью установления возможных причин дефектов и путей их устранения. Качественный анализ проводится только по дефектам, причины возникновения которых ранее не были установлены или были установлены предположительно.

В результате качественного анализа должна быть дана объективная оценка причин образования дефектов и разработаны мероприятия по их предупреждению. Разрушения трубопроводов, являясь наиболее опасным видом неисправностей трубопроводных систем (особенно таких, как топливные, масляные, кислородные и др.), даже при единичных случаях должны тщательно ана-

лизироваться и исследоваться с привлечением при необходимости научно-исследовательских учреждений.

На основании результатов анализа неисправностей трубопроводов, связанных с ремонтом на ЭРП, разрабатываются предложения по дальнейшему совершенствованию технологии ремонта трубопроводных систем. По результатам анализа и исследования дефектов трубопроводов, возникающих в процессе эксплуатации, появляется реальная возможность выбора конфигурации и материала трубопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марьин, Б. Н. Изготовление трубопроводов гидрогазовых систем летательных аппаратов / Б. Н. Марьин. – М.: Машиностроение, 1988. – С. 5-45.
2. Колыхалов, Д. Г. Оценка технологичности трубопроводных систем летательных аппаратов на ранних этапах проектирования / Д. Г. Колыхалов, О. Е. Сысоев, И. Н. Иванов // Труды МАИ. – 2016. – Вып. 90. – С. 26-30.
3. Исследование совмещенных процессов при изготовлении деталей летательных аппаратов / Б. Н. Марьин, С. И. Феоктистов [и др.] // Ученые записки КнАГТУ. – 2016. – Т. 1. – № 2 (26). – С. 34-41.
4. Пат. 2337779 С2. Способ гибки тонкостенных труб с наполнителем / Марьин Б. Н.; опубл. 10.11.2008. Бюл. № 31.
5. Пат. 2322320 С2. Способ гибки тонкостенных труб / Марьин Б. Н.; опубл. 20.04.2007. Бюл. № 11.
6. Пат. 1787617 А1. Рогообразный сердечник для изготовления отводов с фланцами из трубных заготовок / Марьин Б. Н.; опубл. 15.01.93. Бюл. № 2.
7. Пат. 1581411 А1. Способ изготовления крутоизогнутых тонкостенных переходников / Марьин Б. Н.; опубл. 30.07.90. Бюл. № 28.



Кузьмичев Е. Н., Верхотуров А. Д., Евстигнеев А. И., Дроздов Е. А.
E. N. Kuzmichev, A. D. Verhoturov, A. I. Evstigneev, E. A. Drozdov

**КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
КАК ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ ШИХТЫ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ
ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ**

**INTEGRATED USE OF MINERAL RAW MATERIALS AS THE BASIS OF CHARGE
OF WELDING ELECTRODES CREATING FOR MANUAL ARC WELDING**

Кузьмичев Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, г. Хабаровск), тел 8 (4212) 407-076. E-mail : accord@festu.khv.ru.

Mr. Kuzmichev Evgenii N. – PhD of Engineering, Associate Professor, Locomotive Department Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: e_kuzmichev@mail.ru.

Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, г. Хабаровск). E-mail: Verhoturov36@mail.ru.

Anatoly D. Verhoturov – Doctor of Engineering, Professor, senior researcher at the Institute of Water and Environmental Problems, the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: Verhoturov36@mail.ru.

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, проректор по научной работе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: offise@knastu.ru.

Mr. Alexey I. Evstigneev – Doctor of Engineering, Professor, Provost for Research at Komsomolsk-on-Amur State Technical University, bearer of the little «Honoured Worker of Science and Engineering of Russia» (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Дроздов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, кафедры «Подвижной состав железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, г. Хабаровск), тел 8 (4212) 407-656. E-mail: vag6@festu.khv.ru.

Mr. Drozdov Evgenii A. – PhD of Engineering, Associate Professor, Rolling Stock Department Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: vag6@festu.khv.ru.

Аннотация. Приведены результаты исследований по разработке покрытых электродов для ручной дуговой сварки, особенностью которых является использование минеральных ассоциаций Дальневосточного региона. Предложена новая методика синтеза шихты покрытий электродов общего назначения, основанная на генерировании многообразия составов с последующим выбором рационального.

Summary. The authors displayed results of working out the covered electrodes for the manual arc welding. The specific feature is the use of mineral associations of Far East region. The new technique of charge synthesis for covering electrodes of the general purpose is based on generating a variety of structures with the subsequent choice of the rational variant.

Ключевые слова: восстановление деталей; электрод; покрытие, шихта; свойства; минеральное сырье.

Key words: restoration of details; an electrode; a covering, charge; properties; mineral raw materials.

УДК 621.791-03

Введение

Из практики известно, что большинство выбракованных по износу деталей теряют не более 2 % исходной массы, при этом их прочность практически остается на прежнем уровне. В то же время до 80 % деталей, выбраковываемых по износу, могут быть восстановлены до состояния, пригодного к дальнейшей эксплуатации, при этом себестоимость ремонта не превышает 65 – 70 % стоимости новых деталей, а расход материалов на восстановление в 15 – 20 раз меньше, чем на их изготовление [1].

Анализ способов восстановления деталей технических устройств показывает, что наибольшее распространение (до 40 – 50 %) имеют ручная дуговая сварка и наплавка покрытыми электродами, что требует пристального внимания к их разработке и производству.

В настоящее время промышленность поставляет более сорока типов покрытых металлических электродов [2]. Однако, несмотря на такое многообразие, проблема формирования требуемых заранее заданных свойств поверхностей, восстанавливаемых этим способом, в полной мере еще не решена по многим причинам, основными из которых являются следующие:

- каждый тип электрода предназначен для сварки или наплавки определенной группы сплавов с фиксированным химическим составом. Учитывая, что железнодорожный транспорт постоянно пополняется новыми конструкционными материалами, становится проблематичным подбор для их сварки и наплавки необходимого присадочного материала для формирования требуемых свойств. Кроме того, из-за малых оборотных средств и небольшой продолжительности срока годности потребители не в состоянии иметь регулярно пополняемый запас сварочно-наплавочных материалов широкой номенклатуры. Особенно болезненно этот фактор сказывается на небольших предприятиях;

- сварочно-наплавочные материалы производятся, как правило, на небольшом числе крупных предприятий монополистов, которые не могут оперативно реагировать на запросы предприятий железнодорожного транспорта;

- высокая стоимость наплавочных материалов не только по причине того, что в их состав входят дорогостоящие и дефицитные легирующие элементы (вольфрам, никель, кобальт, бор, хром и др.), но и потому, что основные производители находятся, как правило, в центральной части России и используют сырье, завозимое из отдаленных районов (Забайкалье, Урал, Западная Сибирь, Заполярье и др.). Кроме того, значительную часть приходится закупать в ближнем зарубежье (Украина, Узбекистан, Казахстан и др.). Увеличивает стоимость и транспортировка готовых материалов на большие расстояния.

Актуальность вопроса обеспечения промышленных предприятий качественными и недорогими сварочно-наплавочными материалами состоит в создании сравнительно небольших гибких производств, чутко реагирующих на постоянно меняющиеся запросы потребителей, максимально приближенных к сырьевым запасам, учитывающих особенности местного сырья.

Это особенно наглядно прослеживается в Дальневосточном экономическом районе, который обладает очень большими запасами минерального сырья, пригодного для производства высокоэффективных сварочно-наплавочных материалов. Здесь сосредоточено до 30 % полезных ископаемых России.

В [3; 4; 5] отмечено, что горнодобывающая промышленность Дальневосточного региона занимает одну из ведущих позиций в добыче минерального сырья СНГ: борного – 90 %, олова – 80 %, золота – 50 %, флюорита – 85 %. Значительны запасы руд вольфрама, титана, свинца, цинка, бора, меди, графита и др. В целом в регионе выявлено более 70 видов полезных ископаемых.

Однако, несмотря на богатейшие и уникальные запасы минерального сырья, на сегодняшний день Дальневосточный регион не обладает необходимой базой для его переработки [6; 7] и фактически является поставщиком вольфрамового, оловосодержащего, полиметаллического, борного и других видов сырья для западных регионов России и промышленно-развитых стран. Образовать же такую базу в короткие сроки весьма

проблематично. Поэтому наиболее рациональным решением в настоящее время следует считать разработку относительно простых технологий получения материалов (в том числе сварочно-наплавочных) непосредственно из вырабатываемого горно-обогатительными комбинатами сырья, без его затратной переработки и реализовывать эти технологии непосредственно на предприятиях потребителей или небольших специализированных предприятиях, максимально приближенных к источникам сырья.

Методика и материалы

Современные электродные покрытия являются сложными многокомпонентными системами. Входящие в них материалы выполняют различные функции, причем очень часто одни и те же элементы одновременно решают несколько задач: защиту жидкого металла сварочной ванны от вредного воздействия окружающей среды, стабилизацию технологического процесса, раскисление, легирование наплавленного металла и ряд других. В общем случае они подразделяются на шлакообразующие, газообразующие, легирующие, раскисляющие, пластификаторы, стабилизирующие и связующие [8].

Наибольший объем в составе электродных покрытий занимают шлакообразующие (руды, концентраты, минералы), такие как гематит, магнетит, рутиловый концентрат, слюда, полевошпат, мрамор и т.д. Из них целый ряд может быть использован одновременно в качестве газообразующих: мрамор, магнетит, доломит, известняк и др. Некоторые геологические материалы (слюда, полевошпат, мел) можно применять в качестве ионизаторов.

Особый интерес представляет многокомпонентное минеральное сырье, которое может (наряду с решением отмеченных задач) осуществлять одновременно и легирование наплавленного металла. К такому сырью, например, относятся шеелитовый, бадделеитовый, датолитовый и другие концентраты, в состав которых входят вольфрам, цирконий, бор и другие элементы, используемые для легирования стали.

Таким образом, из отмеченного видно, что имеющееся в регионе сырье дает возможность организации на предприятиях Дальнего Востока производства сварочно-наплавочных материалов широкой номенклатуры. В соответствии с изложенным разработаны электроды с покрытиями на основе минеральных ассоциаций Дальневосточного региона.

На первом этапе решалась задача создания электродов общего назначения для сварки углеродистых и низколегированных сталей, обеспечивающих следующие требования:

- хорошую комбинированную газошлаковую защиту сварочной ванны от воздействия внешней среды;
- качественную металлургическую обработку переплавляемого металла;
- легкое отделение шлаковой корки, малое разбрызгивание металла;
- свойства наплавленного металла не ниже свойств, получаемых при наплавке электродами типа Э-46А.

Формирование шихты покрытий электродов заключалось в генерировании многообразия составов с последующим выбором рационального.

На начальном этапе назначались компоненты шлаковой ванны, имеющие некоторую совокупность показателей x_1, x_2, \dots, x_n , которые составляют неупорядоченное множество Z_y . Совокупность таких показателей отражает определенный набор вариантов состава шихты покрытий. Каждый вариант характеризуется n показателями, любое изменение которых порождает новый вариант. В этом случае формирование шихты покрытия сводится к выбору наиболее рационального варианта (для определенных условий использования электродов) из множества допустимых в соответствии с целевой функцией $y_i = f(x_i)$.

Следовательно, задачей формирования состава шихты является определение области существования системы Z_y , в которой находятся варианты, обеспечивающие получение параметров электродов, соответствующих нормативным требованиям и заданным свойствам наплавленного металла.

Анализ априорной информации показал, что планируемые свойства наплавленного металла могут обеспечить основные покрытия, так как при использовании рудно-кислых сложно выдержать заданный уровень содержания кислорода, серы и фосфора, а введение в покрытие органических составляющих способствует насыщению металла шва водородом, ведущим к образованию трещин. Из этого следует, что газовая защита может обеспечиваться CO_2 , являющимся продуктом диссоциации карбонатов (CaCO_3 , MgCO_3), а в шлаке должны преобладать основные окислы. Основная обмазка, обеспечивая технологические параметры и воздействуя на характер металлургической обработки жидкого металла сварочной ванны, оказывает положительное влияние на качество наплавленного слоя, обеспечивая защиту металла от вредного влияния воздушной среды, минимизирует в наплавленном слое содержание кислорода, азота, серы, фосфора, повышает ударную вязкость шва, снижает вероятность образования кристаллизационных трещин, дает возможность легировать наплавленный металл активными элементами.

За основу шихты покрытий электродов был принят известняк Вяземского месторождения Хабаровского края (см. табл. 1) по следующим основным критериям:

- обладает высокой шлакообразующей способностью;
- выделяет при температурах сварочной дуги до 42 % CO_2 ;
- хорошо десульфирует жидкий металл;
- увеличивает основность шлаковой ванны.

Для поддержания на необходимом уровне вязкости жидкого шлака, его хорошей отделимости после кристаллизации, регулирования размеров и качества сварного шва в состав шихты введены флюорит Ярославского месторождения и гранит Корфовского разреза (Хабаровский край), которые одновременно являются шлакообразующими компонентами.

Таблица 1

Состав нелегирующего минерального сырья

Наименование сырья	Состав, масс. %											
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	Na ₂ O	K ₂ O	S	P	Прочие
Известняк	8,79	48,7	2,1	0,81	–	0,54	–	0,05	0,33	0,05	0,04	1,53
Гранит	67,6	2,92	1,75	15,20	0,50	0,84	2,44	3,50	4,30	0,01	0,12	0,82

В качестве раскислителей приняты наиболее распространенные при производстве электродов ферромарганец и ферросилиций, а в качестве сердечника – низкоуглеродистая сварочная проволока Св08А.

При составлении шихты соблюдалось условие, чтобы основность шлака была более единицы, а активность находилась на уровне стандартных качественных электродов типа УОНИИ, т.е. в пределах $A = 0,02 \dots 0,04$.

Результаты и обсуждение

Головной эксперимент, включающий проверку одиннадцати марок электродов с основными покрытиями, средний состав которых приведен в табл. 2, показал их работоспособность, удовлетворительную технологичность, качественное формирование шва, чем доказана пригодность выбранного сырья для производства качественных электродов общего назначения.

Таблица 2

Состав покрытий опытных электродов (без сухого остатка жидкого стекла)

Компоненты	Известняк	Гранит	Флюорит	Ферромарганец	Ферросилиций
Количество, масс. %	50...60	10...30	15...20	3...15	2...3

По результатам головного эксперимента установлены уровни входных факторов шлаковой системы и характер их влияния на выходной. В качестве входных факторов приняты гранит (x_1), флюорит (x_2), ферромарганец (x_3), а в качестве выходного – коэффициент формы шва $K = v/a$, где v – ширина наплавленного валика, мм; a – высота усиления, мм. Этот коэффициент наиболее полно характеризует технологические свойства электрода, так как зависит от стабильности дугового разряда, глубины проплавления основного металла, текучести металла сварочной ванны, вязкости шлака, наличия чешуйчатости и др.

Для оценки коэффициентов полинома на основании составленного плана симплексной решетки реализовывались опыты, по результатам которых с помощью ЭВМ был определен его вид:

$$K = 2,1x_1 + 3,22x_2 + 2,28x_3 + 7,54x_1x_2 + 2,88x_1x_3 + 4,43x_2x_3 + 8,89x_1x_2(x_1 - x_2) + 9,58x_1x_3(x_1 - x_3) + 4,75x_2x_3(x_2 - x_3) + 73,46x_1x_2x_3, \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3 – процентное содержание в шихте покрытий гранита, флюорита и ферромарганца соответственно.

Из множества вариантов, допустимых в соответствии с функцией (1), к дальнейшим исследованиям был принят электрод, имеющий коэффициент формы шва $K = 6,2$, близкий к коэффициенту стандартного качественного электрода с основным покрытием УОНИИ 13/55К, для которого $K = 6,42$.

Основность покрытия опытного электрода, химический состав которого приведен в табл. 3, превышает основность УОНИИ 13/55К в 1,4 раза при активности $A = 0,02$, что создает благоприятные условия для легирования наплавленного металла активными химическими элементами посредством их введения в шихту покрытий.

Таблица 3

Химические составы покрытий опытного стандартного электрода

Электроды	Компоненты, масс. %									
	SiO ₂	CaO	MgO	CaF ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O K ₂ O	FeMn	FeSi	FeTi
Опытный	9,61	46,9	6,60	23,0	0,59	0,65	0,96	7,00	3,00	-
УОНИИ 13/55К	11,68	49,32	-	18,0	-	-	-	2,00	3,00	15,0

Пониженное содержание в покрытии ферросплавов сокращает стоимость и улучшает технологию изготовления, так как исключается ряд ограничений, связанных с размерами частиц металлических порошков, вводимых в шихту покрытий: чрезмерное увеличение размеров (более 0,06 мкм) осложняет производство электродов, ухудшает технологические характеристики, а чрезмерное уменьшение может полностью аннулировать их основное назначение, так как такой порошок еще в стадии изготовления покрытия может окислиться за счет реакции с жидким стеклом. Присутствие Al₂O₃ и Fe₂O₃, входящих в состав гранита, отрицательного влияния на технологичность не оказывает. Наличие оксидов магния, натрия и калия увеличивает стабильность дуги.

Результаты термогравиметрических исследований экспериментального покрытия показали (см. рис. 1), что эффекты взаимодействия компонентов в интервале температур от 600 до 1000 °С имеют практически идентичный характер с таковыми в покрытиях стандартных качественных электродов УОНИИ 13/55К.

Изготовление покрытий и электродов в целом проводилось по стандартной технологии. Опытные наплавки осуществлялись электродами диаметром 3 мм на образцах из стали ВСт3 в семь слоев в нижнем положении постоянным током обратной полярности, силой тока 100 А. В качестве источника питания использовался выпрямитель марки ВД 309.

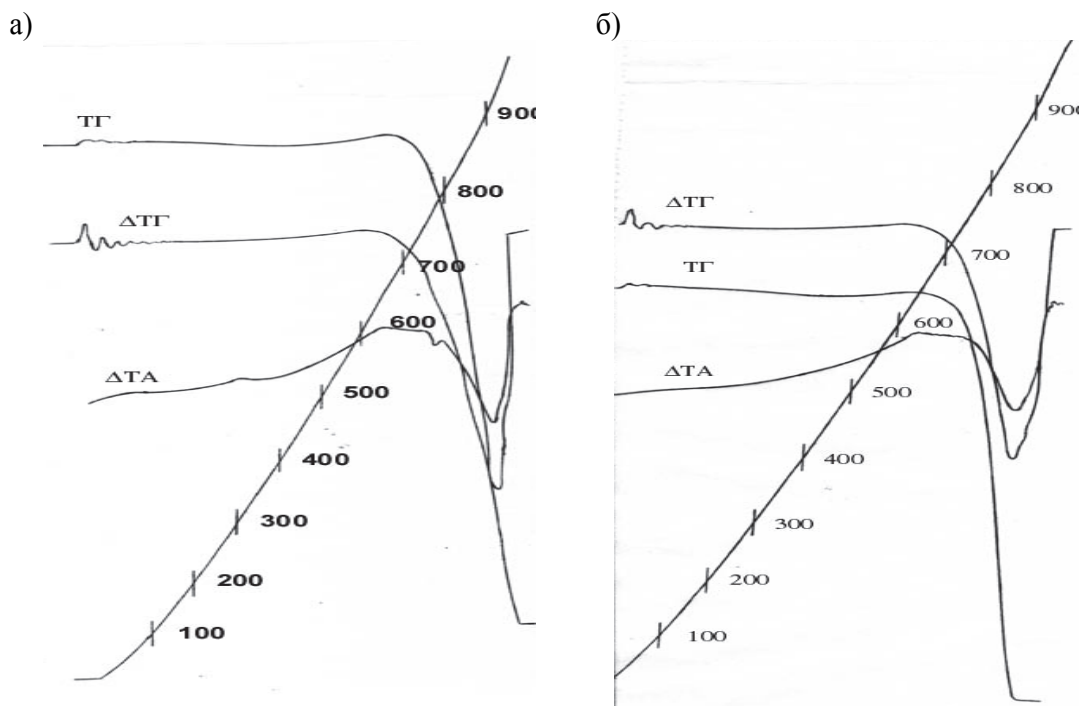


Рис. 1. Термограммы шихты покрытий электродов:
а – опытного; б – стандартного качественного УОНИИ 13/55К

Установлено, что у опытных электродов дуга горит устойчиво, разбрызгивание незначительное, формирование шва хорошее, чешуйчатость малая, отделение шлаковой корки легкое, горячие и холодные трещины на поверхности наплавленных валиков отсутствуют. В целом технологические свойства (см. табл. 4) практически совпадают со свойствами электродов УОНИИ 13/55К.

Таблица 4

Технологические свойства опытных электродов

Электрод	Свойства						
	Коэффициент расплавления α_p , г/Ач	Коэффициент наплавки α_n , г/Ач	Коэффициент потерь ϕ	Длина обрыва дуги $Z_{обр}$, мм	Ширина шва b , мм	Высота усиления a , мм	Коэффициент формы шва K
Опытный	10,87	8,47	0,21	14,0	7,93	1,28	6,20
УОНИИ 13/55К	10,64	8,53	0,19	12,0	8,45	1,32	6,42

Наплавленный металл соответствует доэвтектоидной углеродистой стали с содержанием, мас.% : углерода 0,11...0,12; марганца 0,7...0,9; кремния 0,25...0,27; серы 0,025...0,03; фосфора 0,02...0,025 и низкоуглеродистой литой стали, характерной для сплавов и покрытий, наплавленных стандартными качественными электродами общего назначения.

Механические свойства наплавленного металла (см. табл. 5) проверялись на стыковых сварных соединениях двух пластин из стали ВСт3 длиной 300 мм, шириной 100 мм и толщиной 16 мм каждая, с подваркой корня шва и на стандартных образцах при испытаниях на ударную вязкость.

Таблица 5

Механические свойства металла, наплавленного опытными электродами

Электроды	Наплавленный металл					Сварное соединение	
	σ_b , кгс/мм ²	δ , %	α_n , кгс/см ²	α_{n45} , кгс/см ² $T = -40\text{ }^\circ\text{C}$	α_{n45} , кгс/см ² $T = -60\text{ }^\circ\text{C}$	σ_b , кгс/мм ²	Угол загиба, градусы
Опытные	46,1	32,2	16,5	8,3	3,7	46,2	180
УНИИ13/55К	46,8	33,4	17,2	8,6	3,9	46,5	180

Сравнительный анализ полученных параметров показывает, что они совпадают с параметрами, полученными при сварке и наплавке стандартными электродами УОНИИ 13/55К (отличие не превышает 5 %).

Проведенный технико-экономический анализ показал, что стоимость разработанных качественных электродов общего назначения с основным покрытием за счет использования в шихте местного минерального сырья на 25 % меньше закупаемых, а срок окупаемости участка производительностью три тонны в сутки составляет полтора года.

Заключение

1. Разработана методика синтеза шихты покрытий сварочных электродов общего назначения на основе комплексного использования минерального сырья Дальневосточного региона, учитывающая отклонения компонентов шлаковых систем от систем, предусмотренных нормативной документацией.

2. Созданы и экспериментально апробированы сварочные электроды с основной обмазкой из местного минерального сырья, обладающие технологичностью на уровне стандартных типа Э46А. Состав и механические свойства металла, наплавленного полученными электродами, соответствуют свойствам электродов УОНИИ 13/55К и могут быть использованы для получения покрытий при наплавке углеродистых и низколегированных сталей.

3. Технология изготовления созданных сварочно-наплавочных материалов проста, мало отличается от стандартной и может быть реализована на одном из предприятий железных дорог. Стоимость электродов общего назначения с основной обмазкой, в случае их производства на одном из ремонтных предприятий ДВЖД г. Хабаровска, на 25 % меньше стандартных, а расчетный срок окупаемости при производстве электродов три тонны в сутки составляет полтора года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление деталей машин: технология и оборудование / В. Е. Конарчук, А. Д. Чигринцев, О. Л. Голяк [и др.]. – М.: Транспорт, 1995. – 303 с.
2. Петров, Г. Л. Сварочные материалы / Г. Л. Петров. – М.: Машиностроение, 1992. – 280 с.
3. Цветков, Н. И. Природно-ресурсный потенциал Дальнего Востока / Н. И. Цветков // Экономическая жизнь Дальнего Востока. – 1993. – № 1(2). – С. 70-83.
4. Верхотуров, А. Д. Основы материаловедения. Т. 1 / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилев, А. И. Евстигнеев. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 654 с.

5. Верхотуров, А. Д. Основы материаловедения. Т. 2 / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилев, А. И. Евстигнеев. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 270 с.
6. Минакир, П. А. Региональная экономическая динамика / П. А. Минакир, О. М. Прокопенко. – Хабаровск: ДВО РАН, 2010. – 304 с.
7. Пегов, С. А. Устойчивое развитие в условиях глобальных изменений природной среды / С. А. Пегов // Вестник РАН. – 2004. – Т. 84. – № 12. – С. 1082-1089.
8. Сварочные материалы для дуговой сварки: справ. пособие: в 2 т. / Б. П. Конищев, С. А. Курланов, Н. Н. Потапов [и др.]; под общ. ред. Н. Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.: ил.



Кузьмичев Е. Н., Верхотуров А. Д., Евстигнеев А. И., Дроздов Е. А.
E. N. Kuzmichev, A. D. Verhoturov, A. I. Evstigneev, E. A. Drozdov

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЗАМЕНЫ БУКСОВЫХ НАЛИЧНИКОВ С КОМБИНИРОВАННЫМ ПОКРЫТИЕМ, ФОРМИРУЕМЫМ НА УГЛЕРОДИСТОЙ ОСНОВЕ НАПЛАВКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО ФЛЮСА

INNOVATIVE PLATES REPLACEMENT TECHNOLOGY WITH THE COMBINED COVERING CREATED ON THE CARBON BASIS USING SPECIAL FLUX WELDING

Кузьмичев Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, г. Хабаровск), тел 8 (4212) 407-076. E-mail : accord@festu.khv.ru.

Mr. Kuzmichev Evgenii N. – PhD of Engineering, Associate Professor, Locomotive Department Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: e_kuzmichev@mail.ru.

Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, г. Хабаровск). E-mail: Verhoturov36@mail.ru.

Anatoly D. Verkhoturov – Doctor of Engineering, Professor, senior researcher at the Institute of Water and Environmental Problems, the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: Verhoturov36@mail.ru.

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, проректор по научной работе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: offise@knastu.ru.

Mr. Alexey I. Evstigneev – Doctor of Engineering, Professor, Provost for Research at Komsomolsk-on-Amur State Technical University, bearer of the little «Honoured Worker of Science and Engineering of Russia» (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Дроздов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, кафедры «Подвижной состав железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, г. Хабаровск), тел 8 (4212) 407-656. E-mail: vag6@festu.khv.ru.

Mr. Drozdov Evgenii A. – PhD of Engineering, Associate Professor, Rolling Stock Department Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: vag6@festu.khv.ru.

Аннотация. Представлены результаты исследований по разработке технологии изготовления биметаллических наличников, представляющих из себя двухслойную пластину с основанием из углеродистой стали. Использование разработанного биметаллического наличника при ремонте буксовых проемов рамы тележки позволяет упростить технологию замены наличника и повысить качество приварки наличника к раме за счет отсутствия дополнительных технологических операций по предварительному подогреву и соблюдения режимов охлаждения, как в случае приварки наличника из стали 60Г.

Summary. The authors present development of bimetallic plates manufacturing techniques. The plates are two-layer plates with the carbon steel. The use of the developed bimetallic plates when repairing jaw opening of a cart frame allows simplifying plate replacement technology and increasing quality of welding the plate to a frame due to lack of additional technological operations of preliminary heating and observance of the cooling modes, as in case of welding of a steel 60G plate.

Ключевые слова: биметаллические наличники, буксы, технология замены наличника, приварка, предварительный подогрев, режимы охлаждения, износостойкость.

Key words: bimetallic plates, bearing box, plate replacement technology, welding, preliminary heating, cooling modes, durability.

УДК 621.791.75

Введение

На сегодняшний день железнодорожный транспорт является одним из основных видов транспорта промышленных предприятий. Его доля в себестоимости товарной продукции варьируется от 6 – 10 % на металлургических заводах до 30 – 70 % на открытых горных разработках.

В калькуляции себестоимости внутренних железнодорожных перевозок одной из наибольших статей расходов остается «ремонт и содержание подвижного состава». В частности, на эту статью приходится: по тепловозному парку – до 35 %, по электровозному – до 28 %, по вагонному – до 45 % общих затрат на эксплуатацию.

В последнее время особую остроту приобретает проблема нарастающего износа деталей локомотивов и вагонов, особенно экипажной части. Высокая стоимость запасных частей и материалов для ремонта приводит к снижению технической готовности деталей подвижного состава.

В то же время до 80 % деталей, выбраковываемых при ремонте, после восстановления пригодны к дальнейшей эксплуатации. Как правило, потери массы таких деталей не превышают 2 % исходной массы, при этом прочность металла изделий остается на прежнем уровне. По целому ряду наименований наиболее металлоемких и дорогостоящих изделий вторичное их использование значительно больше, чем потребление новых запасных частей. При этом себестоимость восстановления на 65 – 70 % ниже стоимости новых деталей, а расход материалов в 15 – 20 раз меньше, чем на изготовление.

При ремонте актуальными остаются вопросы повышения ресурса восстановленных деталей за счет формирования качественных характеристик сварочных швов и покрытий посредством их легирования.

Наибольшее применение при ремонте подвижного состава имеют электротермические технологии (сварка и наплавка) – до 46 % объема сварочно-наплавочных работ при ремонте приходится на электродуговые способы. Из них 63 % составляет ручная дуговая сварка покрытыми электродами, которая, несмотря на свои недостатки, находит широкое применение при заварке трещин малой протяженности и глубины, устранение которых другими способами или невозможно, или нецелесообразно. При наплавочных работах более прогрессивным способом является автоматическая наплавка под флюсом, доля которой составляет 28 %.

В связи с отмеченным, в статье приведены результаты исследований по разработке технологии изготовления биметаллических наличников, представляющих из себя двухслойную пластину с основанием из углеродистой стали и сформированным на её поверхности износостойким рабочим слоем. Формирование покрытий с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами производится электротермической наплавкой с применением керамических наплавочных флюсов на основе комплексного использования минерального сырья ДВ региона [1; 2].

Методика и материалы

Проверка работоспособности предлагаемого способа восстановления буксовых наличников рамы тележки железнодорожного подвижного состава осуществлялась в лаборатории сварки ДВГУПС. Наплавку осуществляли аппаратом для автоматической наплавки ТС-17М-1 с источником питания ТДФ-1001, силой тока 200 А проволокой Св-10Г2 диаметром 1,6 мм.

Анализ химического состава полученных сплавов проводили на рентгеновском спектрометре МАКС-GV.

Исследование полученных покрытий буксового наличника на износостойкость осуществлялось в соответствии с ГОСТ 17367-71 «Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы» на машине трения ИИ-5018 в условиях трения без смазки при нагрузке 200 Н. Материалом эталонного образца служила сталь 40ХН, закаленная в масле (HRC 50-52).

Исследование твердости проводилось в соответствии с ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю». Испытания на ударную вязкость проводились в соответствии

с ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенных температурах». Испытания на прочность при разрыве проводились в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

Внутренние дефекты сварных швов определялись ультразвуковым дефектоскопом УД-12П с призматическими и раздельно-совмещенными преобразователями по ГОСТ 14782-86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые».

Результаты и обсуждение

Рама тележек тепловозов ТЭМ2, М62 представляет собой сварно-литую конструкцию, буксы колесных пар в которой размещаются в специальных вырезах (буксовых челюстях). Буксовые челюсти представляют собой стальные отливки, сваренные в раму. К поверхностям трения челюстей электрозаклепками прикреплены сменные наличники из износостойкой стали 60Г, 65Г [3]. Продольные силы передаются буксами через наличники на внутренние поверхности челюстей. Букса и буксовые наличники рамы тележки выполнены с зазором, обеспечивающим лучшее прохождение тележкой кривых участков пути. При движении локомотива за счет этого зазора букса перемещается относительно буксовых наличников. Силы трения, возникающие при взаимном перемещении буксы и буксовых наличников, приводят к износу взаимодействующих поверхностей.

В процессе эксплуатации наличники буксовых вырезов изнашиваются неравномерно как по высоте, так и по ширине. Неравномерный износ буксовых наличников приводит к нарушению ориентации колесных пар в раме тележки и является причиной перекоса колесных пар, возникновения износа поверхности катания бандажей, подреза гребней. Износ наличника определяют путем сравнения толщины изношенной и неизношенной частей. Наличники толщиной мене 4 мм заменяют.

Однако закрепление новых буксовых наличников на буксовом проеме рамы тележки с помощью ручной дуговой сварки не обеспечивает необходимой прочности их соединения, которая является одним из факторов, обеспечивающих безопасность движения поездов.

В тепловозах буксовые наличники рамы тележки выполнены из высокоуглеродистой марганцовистой стали марок 60Г или 65Г и закреплены на рабочих поверхностях буксового проема рамы тележки из низкоуглеродистой стали с помощью электрозаклепок.

Согласно инструкции ЦТ-336 способ восстановления зазора между буксовым узлом и рамой тележки заключается в снятии изношенного буксового наличника механическим путем и замене его на новый буксовый наличник.

После снятия изношенного буксового наличника рабочую поверхность буксового проема рамы тележки подготавливают (зачищают) для установки на нее буксового наличника нормативной толщины. Стали марок 60Г и 65Г являются плохо свариваемыми (эквивалент углерода $S_{\text{э}} = 0,77$) и относятся к IV группе свариваемости. Приварка нового наличника должна сопровождаться предварительным и сопутствующим его нагревом для обеспечения высокого качества сварного шва и предотвращения образования закалочных структур, холодных трещин и деформации наличника.

Закрепление буксового наличника на рабочей поверхности буксового проема рамы тележки осуществляют следующим образом. Вначале буксовый наличник нагревают по кромкам до температуры, при которой происходит небольшое их оплавление. Затем каждый буксовый наличник точно закрепляют струбцинами по всей рабочей поверхности буксового проема рамы тележки для предотвращения его перекоса при дальнейших этапах закрепления. Далее нагретый буксовый наличник приваривают дуговой сваркой по всем кромкам к рабочей поверхности буксового проема рамы тележки, соблюдая порядок наложения швов, согласно рис. 1 [4].

При сварке высокоуглеродистой стали буксового наличника и низкоуглеродистой стали рамы тележки в процессе охлаждения в сварном шве и околошовной зоне происходит образование цементитной фазы и появление значительных собственных внутренних напряжений, вызывающих появление микротрещин. Образование цементита и появление микротрещин в сварном шве делают его хрупким за счет большого содержания углерода в высокоуглеродистой стали [5].

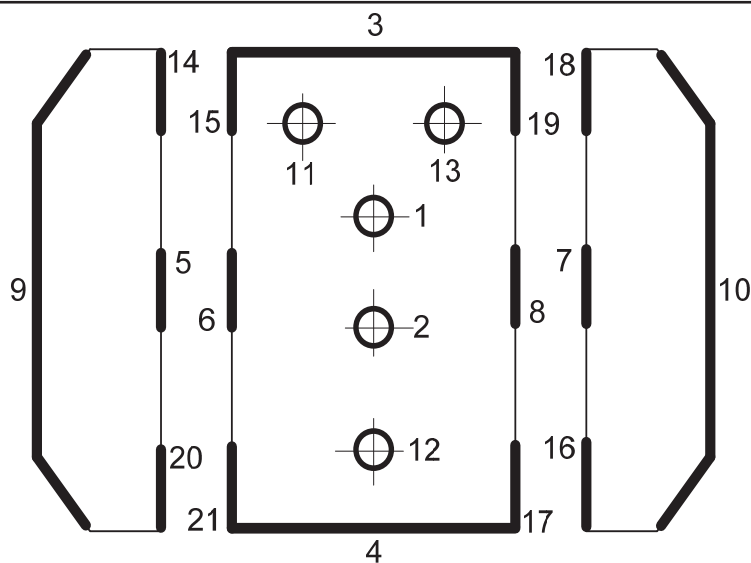


Рис. 1. Последовательность наложения сварных швов при приварке наличников

В процессе эксплуатации тележки действие на буксовый наличник знакопеременных сил трения и вибраций приводит к развитию микротрещин и макротрещин в сварных швах и околошовной зоне. По мере развития трещин появляются разрывы в соединении, которые уменьшают прочность соединения буксового наличника с рамой тележки. Ослабление сварного соединения приводит к смещению буксового наличника относительно рабочей поверхности буксового проема рамы тележки. Это вызывает повышение интенсивности износа и буксового наличника и в крайнем случае приводит к выпадению его из буксового проема.

Недостаток известного способа заключается в низкой прочности соединения замещающего буксового наличника с рабочей поверхностью буксового проема рамы тележки, что обусловлено недостаточным для работы качеством сварного шва за счет плохой свариваемости образующих его высокоуглеродистой и низкоуглеродистой сталей.

Авторами предлагается запатентованный способ восстановления буксовых направляющих рамы тележки тепловоза [6], который повышает работоспособность буксового узла.

Предлагается изготавливать буксовый наличник в виде двухслойной пластины нормативной толщины, один слой которой выполнен из низкоуглеродистой стали, а другой – из высокоуглеродистой стали.

Новый буксовый наличник изготавливают следующим образом. На пластину из низкоуглеродистой стали, содержащей 0,14 – 0,22 % углерода, обладающей хорошей свариваемостью, например марки СтЗсп, наносят электродуговой наплавкой слой из высокоуглеродистой марганцовистой стали, аналогичной стали марки 60Г или 65Г, содержащей 0,57 – 0,65 % углерода и 0,9 – 1,1 % марганца.

Для этого пластину из низкоуглеродистой стали выбирают с предельно минимально допустимой толщиной и с габаритами стандартного буксового наличника. Например, для тележки тепловоза ТЭМ2 минимальная толщина пластины принимается 3 мм.

Наплавку слоя из высокоуглеродистой марганцовистой стали на пластину из низкоуглеродистой стали осуществляют под слоем флюса, например, на сварочном автомате низкоуглеродистой сварочной проволокой, содержащей 0,10 – 0,12 % углерода и 1,8 – 2,1 % марганца, например Св-10Г2. Для повышения содержания углерода в наплавленном металле до 0,6 – 0,65 % используют флюс с высоким содержанием углерода, например флюс, состоящий из 93,0 – 95,0 % типового флюса АН-348В с добавлением в него 5,0 – 7,0 % графитовой крупки [1].

При наплавке флюс взаимодействует с расплавленным металлом проволоки и пластины, при этом ионы углерода из флюса насыщают расплавленный металл, который после охлаждения содержит 0,57 – 0,65 % углерода и 0,7 – 1,0 % марганца. Наплавленный на низкоуглеродистую

пластину слой является высокоуглеродистым и по химическому составу, а также физическим свойствам идентичным сталям 60Г и 65Г.

После наплавки пластину очищают от шлака и механически обрабатывают наплавленный слой до получения пластины толщиной, равной нормативной толщине стандартного буксового наличника. Например, для тележки тепловоза ТЭМ2 толщина готового буксового наличника составляет 6,0 – 7,0 мм.

Таким образом, получают новый двухслойный буксовый наличник, один слой которого выполнен из низкоуглеродистой стали, а другой – из высокоуглеродистой износостойкой стали.

Для закрепления каждого замещающего буксового наличника его вначале располагают слоем из низкоуглеродистой стали на рабочей поверхности буксового проема рамы тележки. Таким образом, поверхность буксового проема рамы тележки из низкоуглеродистой стали контактирует с поверхностью замещающего буксового наличника также из низкоуглеродистой стали.

Затем буксовый наличник точно соединяют струбцинами с рабочей поверхностью буксового проема рамы тележки для предотвращения его перекоса при дальнейших этапах закрепления.

Далее буксовый наличник приваривают дуговой сваркой по всем кромкам к рабочей поверхности буксового проема рамы тележки согласно схеме рис. 1. В результате буксовый проем рамы тележки восстанавливают до нормативных размеров. В связи с тем, что стали буксового проема и изготовленного буксового наличника относятся к I группе свариваемости (эквивалент углерода $C_{\text{э}} < 0,25$), создание термического цикла сварки не требуется.

При сварке низкоуглеродистых сталей в процессе охлаждения происходит образование плотного и однородного сварного шва без внутренних напряжений и микротрещин, что обусловлено малым содержанием углерода в свариваемых металлах [6].

Таким образом, достигается повышение прочности соединения буксового наличника с поверхностью буксового проема рамы тележки за счет улучшения качества сварного шва благодаря хорошей свариваемости образующих его низкоуглеродистых сталей.

В результате получают буксовый наличник, хорошо соединенный с рамой тележки и имеющий рабочую поверхность, взаимодействующую с буксой, из высокоуглеродистой износостойкой стали, что соответствует нормативным требованиям.

Получение сварного шва без микротрещин позволяет эксплуатировать буксовый наличник до его предельно допустимого износа. Процесс восстановления может повторяться в течение всего срока службы рамы тележки.

Результаты исследования химического состава и механических свойств наплавленного высокоуглеродистого слоя металла по заявляемому способу и стали марки 60Г приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав и механические свойства буксовых наличников

Состав и свойства высокоуглеродистой стали рабочей поверхности буксового наличника	Химический состав, %			Механические свойства	
	Углерод С	Кремний Si	Марганец Mn	Твердость НВ	Износостойкость относительно стали 40ХН
Разработанный буксовый наличник	0,57 – 0,64	0,23 – 0,35	0,76 – 0,94	244 – 261	1,08
Буксовый наличник из стали марки 60Г	0,57 – 0,60	0,17 – 0,35	0,7 – 1,0	235 – 275	1,08

Результаты испытания сварных швов, полученных при сварке двух пластин, приведены в табл. 2. В первом примере сварные швы получали при сварке пластин, выполненных из однородного металла – стали марки Ст3 (по заявляемому способу), одна из которых имитирует раму те-

лежки, другая – привариваемую сторону буксового наличника. Во втором примере сварные швы получали при сварке пластин, выполненных из разных сталей, одна из которых, выполненная из стали марки Ст3, имитирует раму тележки, другая, выполненная из стали марки 60Г, – буксовый наличник.

Таблица 2

Результаты механических испытаний сварных швов

Механические свойства металла шва в месте приварки буксового наличника	Механические свойства сварного соединения		
	Предел прочности на растяжение σ_b , МПа	Угол загиба α	Ударная вязкость α_n , КДж/см ²
Предлагаемый способ восстановления	430 – 443	180°, трещин нет	17 – 18
Существующий способ восстановления	360 – 375	170°, трещины 15 % от длины шва	14,6 – 15,5

Механические испытания сварных швов показали, что прочность швов, полученных с использованием заявляемого способа, по сравнению со сварными швами, полученными с использованием способа прототипа, увеличилась на 13,0 – 17,0 %.

Увеличение прочности сварного шва, закрепляющего буксовый наличник на раме тележки, повышает уровень безопасности движения поездов.

Выводы

Разработана технология изготовления биметаллических наличников, представляющих из себя двухслойную пластину с основанием из углеродистой стали марки Ст3 и износостойкого наплавленного слоя, аналогичного стали 60Г.

Использование типовой низкоуглеродистой проволоки марки Св08Г2С позволяет повысить технологичность процесса наплавки. Повышение содержания углерода в наплавленном металле достигается добавлением графитовой крупки в типовой флюс марки АН348В.

Применение разработанного биметаллического наличника при ремонте буксовых проемов рамы тележки позволяет упростить технологию замены наличника и повысить качество приварки наличника к раме. Наличник приваривается к раме основанием из низкоуглеродистой стали, имеющей хорошую свариваемость, что не требует дополнительных технологических операций по предварительному подогреву и соблюдения режимов охлаждения, как в случае приварки наличника из стали 60Г.

Проведенные механические испытания предлагаемых биметаллических наличников показали, что наплавленный слой обладает высокими прочностными свойствами и имеет износостойкость не ниже, чем у типовых наличников из стали 60Г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабенко, Э. Г. К вопросу применения керамических флюсов на основе минеральных концентратов для восстановления деталей подвижного состава / Э. Г. Бабенко, Е. Н. Кузьмичев, Я. А. Новачук // Известия Транссиба. – 2012. – № 3(11).
2. Верхотуров, А. Д. Перспективные высоколегированные вольфрамом сплавы, полученные с использованием вольфрамсодержащего минерального сырья / А. Д. Верхотуров, Е. Н. Кузьмичев, Л. А. Коневцов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2015. – № III-1 (23). – С. 74-80.
3. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов / под ред. В. А. Четвергова, В. И. Киселева. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 558 с.
4. ЦТ-336. Инструкция по сварочным и наплавочным работам при ремонте тепловозов, электровозов и дизель-поездов. – М.: Транспорт, 1996. – 457 с.



5. Сварочные материалы для дуговой сварки: в 2 т. Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы / Б. П. Конищев [и др.]; под общ. ред. Н. Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – С. 268-269.
6. Пат. 2554049. Способ восстановления буксовых наличников рамы тележки железнодорожного подвижного состава / Е. А. Дроздов, Е. Н. Кузьмичев; опубл. 20.06.2015. Бюл. № 17.
7. Справочник сварщика / под общ. ред. В. В. Степанова. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 560.

САВУЩИК А. И., САРИЛОВ М. Ю.
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОДГОТОВКИ ВЫСОКОВЯЗКИХ БИТУМИНОЗНЫХ НЕФТЕЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПО СУЩЕСТВУЮЩИМ НЕФТЕПРОВОДАМ

Савущик А. И., Сариллов М. Ю.
A. I. Savushchik, M. Yu. Sarilov

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОДГОТОВКИ ВЫСОКОВЯЗКИХ БИТУМИНОЗНЫХ НЕФТЕЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПО СУЩЕСТВУЮЩИМ НЕФТЕПРОВОДАМ

DEVELOPMENT OF HIGH VISCOSITY OIL PREPARATION METHOD FOR TRANSPORTATION THROUGH EXISTING OIL PIPELINE

Савущик Александр Иванович – магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sashacolmar@mail.ru.

Mr. Aleksandre I. Savushchik – Master's degree student, Department of Chemical Industry Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sashacolmar@mail.ru.

Сариллов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – D.Sc. in Engineering, Head of the Department of Chemical Industry Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментов по обработке нефти СВЧ излучением и выбран наиболее оптимальный режим воздействия излучения.

Summary. In the article, the results of the experiment of microwave radiation processing of oil are presented. The best mode of the radiation exposure is chosen.

Ключевые слова: вискозиметр, излучение, вязкость.

Key words: viscometer, radiation, viscosity.

УДК 665.63(07)

Введение

Пропускная способность и экономическая эффективность нефтепровода зависят от свойств перекачиваемой по нему нефти. Основным препятствием для обеспечения необходимой скорости перекачивания является вязкость. Снижение вязкости перекачиваемой нефти уменьшает гидравлическое сопротивление трубопроводной сети, что уменьшает энергозатраты на перекачку. В районах добычи нефти с низкой температурой окружающей среды вязкость перекачиваемой жидкости достигает таких значений, что энергозатраты на перекачку значительно повышают стоимость добываемой нефти, а в некоторых случаях делают ее перекачку практически невозможной. Для увеличения эффективности процесса транспортировки вязкие и высоковязкие нефти подвергаются предварительной обработке. Известно множество способов обработки нефти с целью уменьшения ее вязкости: термический нагрев, создание эмульсии нефти в воде при помощи веществ-эмульгаторов, воздействие на жидкость различными видами электромагнитного излучения и их комбинациями, обработка нефти с помощью ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Мы решили остановиться на обработке сверхвысокочастотным (СВЧ) излучением. Нефть была предоставлена лабораторией Астраханского нефтеперерабатывающего завода для подготовки к научной конференции молодых специалистов на Комсомольском нефтеперерабатывающем заводе. Она обладает высокой вязкостью. Ее характеристики представлены в табл. 1 – 2.



Таблица 1

Характеристики исходного материала

Параметры	Значения
Плотность сепарированной нефти при 20 °С, кг/м ³	917 – 933
Вязкость нефти кинематическая, сСт при 50 °С при 80 °С	413,51 – 458,65 101,39 – 204,54
Вязкость нефти динамическая, мПа*с при 50 °С при 80 °С	371,22 – 420,24 88,87 – 172,79

Таблица 2

Физико-химические характеристики исходного материала

Содержание в нефти, масс. %	
- парафина	6,01 – 6,97
- смол силикагельных	21,44 – 29,18
- асфальтенов	0,76 – 1,16
- серы	1,19 – 1,32
- воды	0,21 – 0,23
- мех. примесей	0,04
Температура застывания, °С	+25-28
Температура плавления парафина, °С	+59-63
Фракционный состав нефти по ГОСТ РЕНИСО 3405-2007	
Начало кипения, °С	86 – 95
Температурные пределы выкипания фракций, °С	Выход, об. %
до 100	1 – 5
до 150	5 – 12
до 200	10 – 17
до 250	16 – 22
до 300	21 – 29

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что нефть относится к классу тяжелых (933 кг/м³), высоковязких (458 сСт при +50 °С), с содержанием смол и асфальтенов более 30 % и температурой застывания +25 °С. Вязкость – одно из явлений переноса, свойство текучих тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. В результате работа, затрачиваемая на это перемещение, рассеивается в виде тепла. Механизм внутреннего трения в жидкостях и газах заключается в том, что хаотически движущиеся молекулы переносят импульс из одного слоя в другой, что приводит к выравниванию скоростей – это описывается введением силы трения. Очевидно, что у пользователей недр, ведущих разработку залежей нефти с высокой вязкостью, а также и залежей нефти с высоким содержанием парафинов, возникают определенные технологические трудности и связанные с ними значительные финансовые затраты как на этапе подготовки товарной нефти на промысле, так и при дальнейшей её транспортировке к потребителю.

Методика исследований

Для проведения эксперимента была разработана модель установки, в которую входили следующие приборы: термометр; вискозиметр; магнетрон с возможностью регулирования мощности; ареометр; секундомер; колба.

Исходная нефть помещалась в колбу, после этого производился отбор нулевой пробы. Затем выставляли необходимую мощность СВЧ воздействия и включали источник электромагнитного поля СВЧ (см. рис. 1).

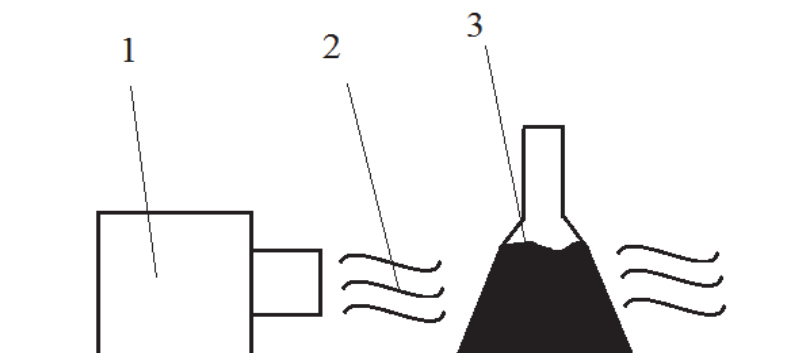


Рис. 1. Экспериментальная модель лабораторной установки:
1 – магнетрон; 2 – СВЧ излучение; 3 – колба с нефтью

Максимальное время СВЧ обработки составляло 20 мин. Контроль температуры производился с помощью термометра. Значения фиксировались и заносились в табл. 3.

Таблица 3

Температура при разных мощностях СВЧ воздействия

Мощность СВЧ излучения, Вт	Температура, °С
100	101
200	108
500	118
750	120*
900	121**
* время СВЧ обработки составляло 15 мин;	
** время СВЧ обработки составляло 10 мин	

Плотность полученных проб нефти определялась с помощью ареометра. За температуру застывания была принята та температура, при которой уровень в колбе не изменялся в течение 1 мин, пока колба была наклонена на 45 градусов. Результаты анализов заносились в табл. 4.

Таблица 4

Результаты сравнительных анализов определения плотности и температуры застывания

Плотность, кг/м ³		Температура застывания, °С	
Нулевая проба	После СВЧ воздействия	Нулевая проба	После СВЧ воздействия
890	890	более 18	менее 6
895	895	более 18	менее 6
895	900	более 18	менее 6
890	890	более 18	не более 0
895	895	более 18	не более 0

Результаты исследований

Результаты анализа плотности нефти показывают, что 30-минутное воздействие СВЧ излучения при мощностях от 100 до 900 Вт не оказывает заметного влияния на изменение плотности, в связи с этим было принято решение в дальнейших экспериментах не производить анализы плотности нефти.

Сравнительный анализ результатов измерения температуры застывания образцов обработанной и исходной нефти показывает, что 30-минутная СВЧ обработка при мощностях от 100 до 900 Вт приводит к снижению температуры застывания, что косвенно указывает на уменьшение вязкости нефти. Показатели значений температуры застывания снижаются с увеличением мощности СВЧ воздействия и достигают минимального значения при мощности более 500 Вт.

Во избежание роста давления при обработке с мощностями СВЧ воздействия 700 и 900 Вт время обработки сокращали до 15 и 10 мин соответственно, при этом значения показателей температуры застывания обработанных образцов не ухудшались.

У всех обработанных образцов нефти было обнаружено временное до 2 – 4 дней сохранение текучего состояния с достигнутой температурой застывания, которое через 5 – 7 дней пропало, при этом нефть возвращалась в исходное состояние с температурой застывания более 18 °С.

Таким образом, приняв во внимание снижение температуры застывания при СВЧ обработке с большими мощностями при меньшей длительности воздействия, было принято решение исследовать влияние длительности СВЧ обработки на 900 Вт мощности.

Определение влияния длительности СВЧ обработки на показатели температуры застывания нефти. Исходная нефть помещалась в колбу, после этого производился отбор нулевой пробы. Затем выставляли мощность СВЧ воздействия 900 Вт и включали источник электромагнитного поля СВЧ на время, определенное в табл. 5. Контроль температуры производился с помощью термометра.

Таблица 5

Температура при мощности 900 Вт СВЧ облучения
при различной длительности СВЧ обработки

Время, мин	Температура, °С
0	21
0,5	81
1	82
1,5	83
2	84

По завершении СВЧ обработки производился отбор проб. Результаты анализов полученных образцов нефти заносили в табл. 6.

Таблица 6

Результаты сравнительных анализов определения температуры застывания

Температура застывания, °С	
Нулевая проба	После СВЧ обработки
более 18	менее 6
более 18	менее 6
более 18	не более 0
более 18	не более 0

Кратковременная СВЧ обработка нефти при мощности 900 Вт не приводит к существенному росту показателей температуры.

Сравнительный анализ результатов измерения температуры застывания образцов обработанной и исходной нефти показывает наличие влияния СВЧ обработки на сохранение текучести нефти при меньших температурах, значение которых зависит от длительности СВЧ обработки и достигает минимального значения через 1,5 минуты.

Подождав пока нефть остынет до 50 °С, мы с помощью вискозиметра ВПЖ определили вязкость. Она стала равна 84 сСт. Значит, вязкость уменьшилась в 5,5 раз.

Вывод

В итоге был получен устойчивый во времени эффект снижения кинематической вязкости и температуры застывания высокобитуминозной нефти, подтвержденный экспериментально. У всех обработанных образцов нефти было обнаружено временное до 10 дней сохранение текучего состояния с достигнутой температурой застывания, которое через 5 – 7 дней возвращалось к исходному значению и пропадало, при этом нефть возвращалась в исходное состояние с температурой застывания более 18 °С.

Таким образом, 1,5-минутная СВЧ обработка высокобитуминозной нефти с мощностью излучения 900 Вт приводит:

- а) к временному (до 3-х дней) понижению температуры застывания нефти не выше 0 °С;
- б) снижению вязкости в 5,5 раз.

В скором будущем, когда запасы маловязких подойдут к концу и огромное внимание будет уделено добычи высоковязких нефтей, то возможно именно этот метод снижения вязкости будет основополагающим при транспортировке и добычи нефти.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окресса, Э. Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности / Э. Окресса. – М.: Мир, 1971. – 272 с.
2. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов / Д. Л. Рахманкулов, И. Х. Бикбулатов, Н. С. Шулаев, С. Ю. Шавшукова. – М.: Химия, 2003. – 220 с.
3. Гетерогенно-каталитические промышленные процессы под действием электромагнитного излучения СВЧ диапазона / Р. Р. Даминев, И. Х. Бикбулатов, Н. С. Шулаев, Д. Л. Рахманкулов. – М.: Химия, 2006. – 134 с.



Сысоев О. Е., Добрышкин А. Ю., Нейн С. Н., Кахоров К. К.
O. Ye. Sysoyev, A. Yu. Dobryshkin, S. N. Nyain, K. K. Kahorov

СОВРЕМЕННЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗАМКНУТЫХ И РАЗОМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

MODERN TESTING BENCHES FOR CONTACTLESS INVESTIGATION OF FREE OSCILLATIONS IN CLOSED AND OPEN CYLINDRICAL SHELLS

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

Mr. Oleg Ye. Sysoyev – D.Sc. in Engineering, Professor, Dean of Cadastre and Civil Engineering Faculty; Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: fks@knastu.ru.

Добрышкин Артем Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Mr. Artem Yu. Dobryshkin – Senior Lecturer, Civil Engineering and Architecture Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Нейн Сит Ньянг – аспирант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Mr. Nyein Sit Naing – a post-graduate student, Civil Engineering and Architecture Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Кахоров Комилджон Кахорович – аспирант кафедры «Технология Машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: comil07@mail.ru; kkahorov07@gmail.com.

Mr. Komiljon K. Kahorov – a post-graduate student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: comil07@mail.ru; kkahorov07@gmail.com.

Аннотация. При проведении экспериментальных исследований тонкостенных оболочек контактные датчики измерения свободных колебаний, температуры, деформаций и других параметров вносят значительные искажения в фиксируемую информацию. Для исключения погрешностей измерения свободных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек, возникающих от контактных датчиков, в лаборатории строительных конструкций Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета создан испытательный стенд для бесконтактного исследования свободных колебаний замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек. Стенд позволяет экспериментально на небольших моделях тонкостенных замкнутых и разомкнутых оболочек с высокой достоверностью оценить воздействия температурных деформаций моделей оболочек на их свободные колебания, что позволит учитывать влияние температур на свободные колебания оболочек и точнее задавать запасы прочности при проектировании различных конструкций оболочного типа.

Summary. When conducting experimental studies of thin-walled shells using contact sensors measuring the free vibrations, temperature, strain, and other settings the scientists suffer significant distortion in the information. To eliminate measurement errors of thin cylindrical shell free vibrations arising from the contact sensors a testing bench for contactless investigation of free oscillations in closed and open cylindrical shells was created in Komsomolsk-on-Amur State Technical University laboratory of constructions. The bench allows assessing the impact of

thermal deformation of shell models on their free oscillations when experimenting using small models of thin-walled closed and open shells with high reliability. This process will take the effect of temperature on the free oscillations of the shells into account, and define safety margins in the design of various types of shell structures more precisely.

Ключевые слова: тонкостенная цилиндрическая оболочка, температурные деформации, свободные колебания.

Key words: thin-walled cylindrical shell, thermal deformation, free oscillations.

УДК 692.412

Различные тонкостенные элементы конструкций в форме замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек широко применяются при строительстве зданий, сооружений, трубопроводов, резервуаров и создании аэрокосмических объектов, которые работают при широком изменении градиента температур и других внешних воздействиях, вызывающих вынужденные колебания таких объектов. Вместе с тем в любой тонкостенной конструкции присутствуют собственные колебания. Наложения собственных и вынужденных колебаний конструкций приводят к свободным колебаниям и возможным резонансным явлениям. Искажение формы конструкции за счет температурных деформаций усложняет расчетную задачу. Часто проблема решается увеличением коэффициента запаса прочности при расчетах конструкции, что экономически нецелесообразно, приводит к значительному их удорожанию в процессе создания. Поэтому важно изучить процесс одновременного влияния деформаций формы оболочки, вызванных температурными изменениями, на свободные колебания как замкнутых, так и разомкнутых тонкостенных цилиндрических оболочек.

Проведенный сопоставительный анализ известных теоретических и экспериментальных данных показал их расхождение при различных геометрических параметрах конструкций. Процесс влияния температурных деформаций и колебаний оболочки изучен не в полном объеме. Существующие теории неточно описывают колебания оболочки при различных температурных режимах. Во многих работах известных авторов (В. З. Власов, А. С. Вольмир, А. Л. Гольденвейзер, Э. И. Григолюк, П. С. Ковальчук, В. Д. Кубенко, Х. М. Муштари, В. В. Новожилов, С. П. Тимошенко, М. Amabili, L. N. Donnell, D и др. [1 – 7]) данный вопрос не рассматривается – температура оболочки при свободных колебаниях принята $t = \text{const}$, либо вообще не учитывается. Влияние локальных температурных деформаций на колебания оболочки в настоящее время изучено в недостаточном объеме. Нет полной картины, описывающей влияние локальных деформаций, вызванных изменением свойств материала вследствие перепада температур.

Для исследования поведения собственных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек от воздействия разнообразных нагрузок при различных напряженно-деформированных состояниях на базе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета был создан испытательный стенд. Установка дает возможность проведения испытаний с использованием образцов тонких цилиндрических замкнутых и разомкнутых оболочек.

Стенд позволяет регулировать температуру воздействия на оболочку за счет блока управления температуры (БУТ) 2 (см. рис. 1 – 2), создавая локальные деформации. Сами деформации фиксируются фотоаппаратом с матрицей высокого разрешения за счет маркеров, находящихся на образце, и в дальнейшем обрабатываются методами фотограмметрии с использованием ПО [9]. Схема измерения работает следующим образом. В непосредственной близости к оболочке на специальном штативе расположены датчики регистрации колебаний 6. Они регистрируют собственные и вынужденные колебания оболочки, затем сигнал усиливается усилителем аналогового сигнала (УАС) 9 и попадает в аналого-цифровой преобразователь, встроенный в ПЭВМ 1. Вынужденные колебания (как одиночные, так и циклические) возможно создавать с помощью специального устройства вынужденных механических колебаний (УВМК) 3. Тепловизор регистрирует изменение температуры в различных областях оболочки 8. При нагревании оболочки с помощью инфракрасного излучения 7 происходят локальные деформации вследствие локального изменения

физико-механических свойств в различных областях оболочки. Датчики измерения колебаний 6 фиксируют колебания с локальными изменениями физико-механических свойств. Такие изменения образуют локальные искажения формы оболочки. Изменения деформаций фиксируются с помощью фотометок 5 и фотоаппарата 4 [8].

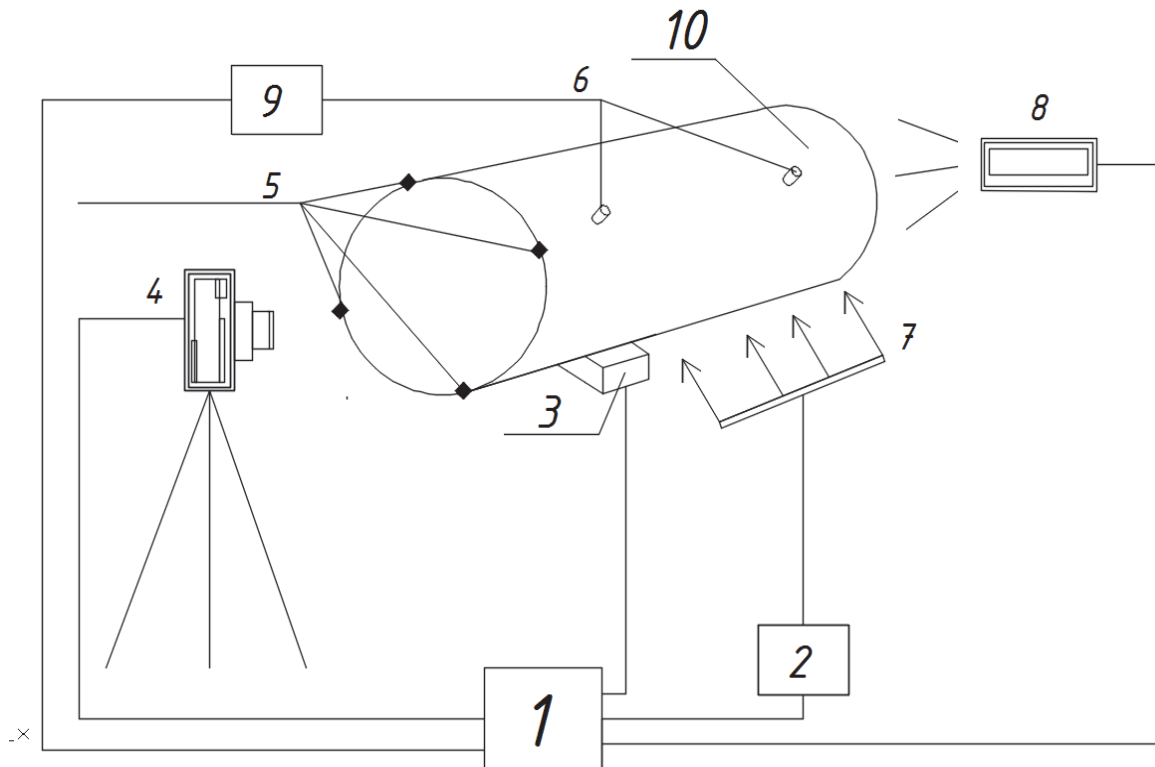


Рис. 1. Схема испытательного стенда для бесконтактного исследования свободных колебаний замкнутых тонкостенных цилиндрических оболочек: 1 – ПЭВМ; 2 – БУТ; 3 – УВМК; 4 – фотоаппарат; 5 – маркеры перемещений; 6 – бесконтактные датчики измерения колебаний; 7 – источник инфракрасного излучения; 8 – тепловизор; 9 – УАС; 10 – разомкнутая тонкостенная цилиндрическая оболочка

Для определения искажения формы оболочки применен современный способ фиксации деформаций в различный момент времени – бесконтактный метод оценки деформаций конструкций в любой момент времени. Перед началом испытаний в определённых местах оболочки размещаются специальные фиксаторы – метки, размеры которых зависят от размера исследуемого образца и необходимой точности измерения (см. рис. 3). Поле меток располагается в зависимости от необходимости мест измерения деформаций.

Установленная рядом с образцом масштабная линейка позволяет определить масштаб. Для проведения фотофиксаций перед исследуемой плоскостью опытного образца на штативе устанавливался цифровой фотоаппарат.

В процессе колебаний, а также деформаций, вызванных изменениями физико-механических свойств вследствие изменения температурного режима, расстояние между метками (количество пикселей) изменялось, что позволяло находить деформации оболочки. Данный метод измерения деформаций конструкций позволяет получать опытные данные в динамике вплоть до вхождения оболочки в резонанс. Наличие большого поля меток не требуется. Измерение деформаций с помощью фотограмметрии носит проверочный характер. О достоверности данной методики исследований можно судить исходя из достоверности полученных результатов при исследовании раз-

личных образцов. Специально разработанное ПО PhotoDim2D [9] позволяет очень точно обрабатывать результаты.

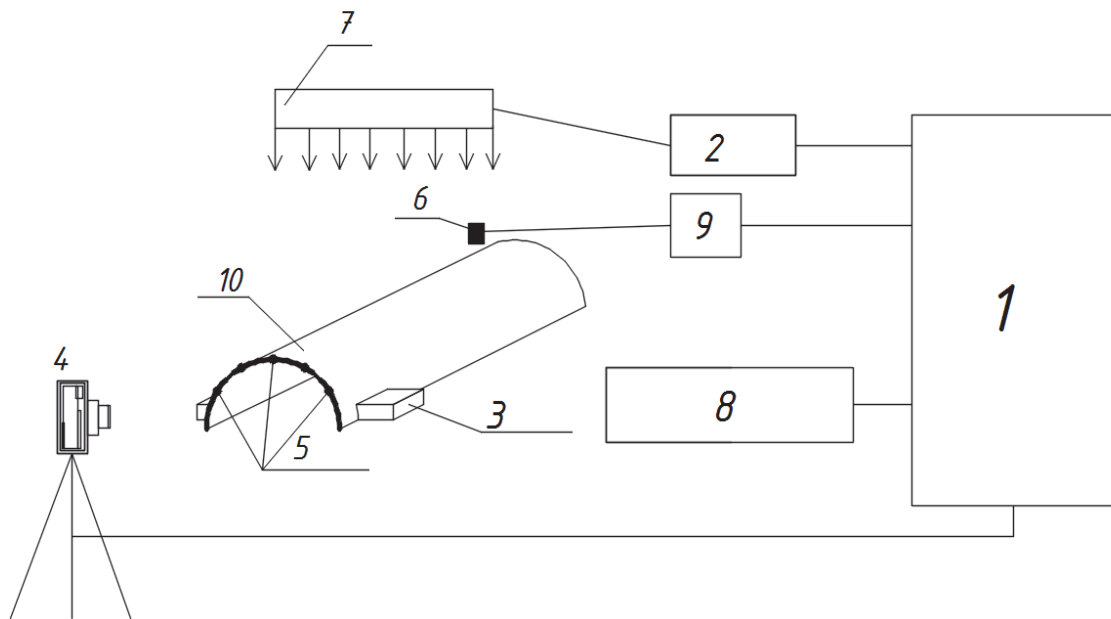


Рис. 2. Схема испытательного стенда для бесконтактного исследования свободных колебаний разомкнутых цилиндрических оболочек: 1 – ПЭВМ; 2 – БУТ; 3 – УВМК; 4 – фотоаппарат; 5 – маркеры перемещений; 6 – бесконтактные датчики измерения колебаний; 7 – источник инфракрасного излучения; 8 – тепловизор; 9 – УАС; 10 – разомкнутая тонкостенная цилиндрическая оболочка

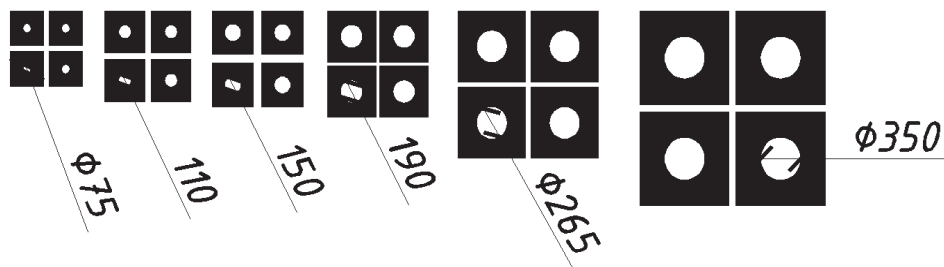


Рис. 3. Фотометки

Полученная экспериментальная информация будет высокоточной и достоверной, так как все измерения (температуры, свободных колебаний, деформационные искажения образца), полученные дистанционным образом, позволяют исключить влияние измерительных приборов на результаты измерения. В дальнейшем результаты экспериментов обрабатываются с использованием метода конечных элементов.

В процессе экспериментов возникают напряженно-деформированные состояния тонкостенной оболочки, которые можно описать с помощью тензора напряжений. Колебания оболочки существенно влияют на НДС любой точки оболочки.

При этом мы рассматриваем поведение бесконечно малого объема материального тела, на которые разбито все тело.

Внутренние напряжения в каждой точке будут равны

$$\sigma_{\text{общ}} = \sigma_{\text{кол}} + \sigma_{\text{темп}},$$

где $\sigma_{\text{кол}}$ – напряжения, возникающие от действия колебаний оболочки; $\sigma_{\text{темп}}$ – напряжения, возникшие в результате изменения температурного режима и как следствие физико-механических свойств.

Перейдем к рассмотрению внутренних усилий, возникающих в оболочке. Выделим из оболочки (см. рис. 4) элементарную призму, проведя два осевых сечения под углом $d\theta$, и две центральных цилиндрических поверхности радиусов r и $r + dr$. Выделенный элемент подвергается действию следующих сил: равно распределённая внешней нагрузки $pr d\theta dr$, перпендикулярная к срединной плоскости оболочки; в сечении поверхностью радиуса $r + dr$ поперечные силы, соответственно равные: $Qrd\theta$ и $Qrd\theta + d(Qrd\theta)$. Как известно, любая плоскость осевого сечения является плоскостью симметрии, поперечные силы в которых стремятся к нулю. Из этого следует, что на призму действует пространственная система сил и изгибающих моментов.

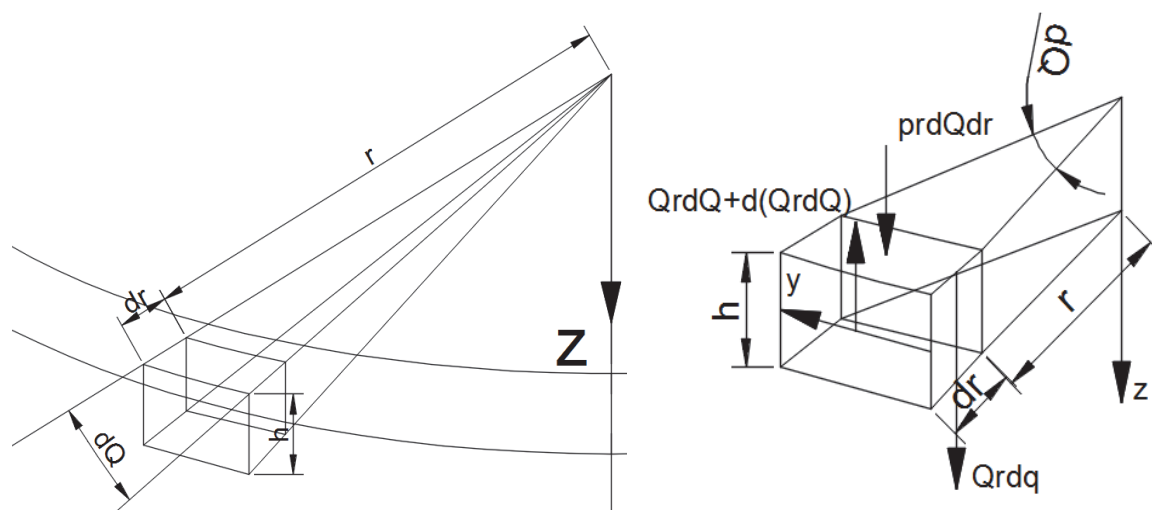


Рис. 4. Элемент оболочки

Если спроецировать все силы на ось симметрии Z , получаем

$$\sum Z = pr d\theta dr + Qrd\theta - [Qrd\theta + d(Qrd\theta)] = 0,$$

либо

$$d(Qrd\theta) = pr d\theta dr.$$

Постоянная величина $d\theta$ сокращается при дифференцировании. Тогда

$$\frac{d(Qr)}{dr} = pr.$$

$$d(Qrd\theta) = pr d\theta dr.$$

Повторно выносим постоянную величину $d\theta$ за знак дифференцирования, и она сокращается. Тогда

$$\frac{d(Qr)}{dr} = pr.$$

Из уравнения равновесия оболочки, находим поперечную силу Q .

А относительное удлинение примет вид

$$\varepsilon_r = \frac{d\varphi}{dr} z. \quad (1)$$

В точке K относительное удлинение волокна оболочки примет вид

$$\varepsilon_\theta = \frac{2\pi(r + z\varphi) - 2\pi r}{2\pi r},$$

или

$$\varepsilon_\theta = \frac{\varphi}{r} z. \quad (2)$$

Зависимость между углом поворота и прогибом сечения будет выражена формулой

$$\theta(x) = \frac{dw(x)}{dx},$$

где $w(x), \theta(x)$ – прогиб оси оболочки в точке с координатой x и угол поворота поперечного сечения соответственно.

Рассмотрим задачу физических напряжений оболочки. Из закона для плоского напряженного состояния в любой точке оболочки при $z = \text{const}$ (см. рис. 5) нормальные напряжения σ_r и σ_θ будут выражены следующим образом:

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta), \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_r). \quad (4)$$

Слияние. Подставив в (3) и (4) выражения относительных деформаций (1) и (2), получим

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right);$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\varphi}{r} + \mu \frac{d\varphi}{dr} \right).$$

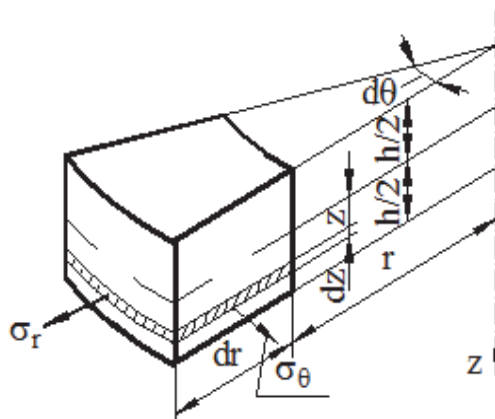


Рис. 5. Плоскость элемента оболочки

Из полученных выражений следует, что напряжения σ_r и σ_θ изменяются в оболочке линейно. Перейдем к рассмотрению изгибающих моментов, действующих в оболочке:

$$M_r = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz;$$

$$M_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta z dz.$$

Проинтегрировав, получим

$$M_r = D \left(\frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right);$$

$$M_\theta = D \left(\frac{\varphi}{r} + \mu \frac{d\varphi}{dr} \right).$$

Формулы для напряжений будут иметь вид

$$\sigma_r = \frac{M_r}{h^3/12} z \text{ и } \sigma_\theta = \frac{M_\theta}{h^3/12} z.$$

Максимальные напряжения возникают у поверхности оболочки при $z = \pm h/2$

$$(\sigma_r)_{\text{макс}} = \pm \frac{6M_r}{h^2}; (\sigma_\theta)_{\text{макс}} = \pm \frac{6M_\theta}{h^2}.$$

Далее перейдем к рассмотрению дифференциального уравнения второго порядка относительно функции φ

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} - \frac{\varphi}{r^2} = -\frac{Q}{D}.$$

Это уравнение так же будет иметь вид

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r\varphi) \right] = -\frac{Q}{D}.$$

Проинтегрировав, получим

$$\varphi = C_1 r + \frac{C_2}{r} - \frac{1}{Dr} \int [r \int Q dr] dr.$$

По причине сложности задачи нахождение постоянных C_1 и C_2 может быть осложнено. Но в данном случае нахождение переменных не составляет труда.

Интегрированием выражения функции угла поворота нормали получаем выражение функции прогиба

$$w = -\int \varphi dr + C_3.$$

Постоянная интегрирования C_3 определяется из граничных условий для прогиба.

Таким образом, созданный испытательный стенд для бесконтактного исследования свободных колебаний замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек позволяет экспериментально на небольших моделях тонкостенных замкнутых и разомкнутых оболочек с высокой достоверностью оценить воздействия температурных деформаций моделей на их свободные колебания, что позволит учитывать влияние температур на свободные колебания оболочек и точнее задавать запасы прочности при разработке проектов различных конструкций оболочечного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов, В. З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике / В. З. Власов. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.



2. Кубенко, В. Д. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек / В. Д. Кубенко, П. С. Ковальчук, Т. С. Краснопольская. – Киев: Наук. думка, 1984. – 220 с.
3. Сысоев, О. Е. Влияние присоединенной массы на вынужденные колебания разомкнутых оболочек / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. – 2016. – № III-1(27). – С. 110-117.
4. Yu, Jin. Экспериментальное исследование эффекта влияния присоединенной массы на собственные частоты колебаний разомкнутой оболочки / Jin Yu, O. E. Сысоев, А. Ю. Добрышкин // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 20-21 апреля 2016 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2016. – С. 241-246.
5. Добрышкин, А. Ю. Влияние отсоединенной массы на параболические строительные конструкции / А. Ю. Добрышкин, Ху Яфэнг, О. Е. Сысоев // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 26-27 ноября 2015 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – С. 91-96.
6. Серёгин, С. В. Свободные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, ослабленной отверстием / С. В. Серёгин, О. Е. Сысоев // Тезисы докладов 2-й Междунар. конф. «Живучесть и конструкционное материаловедение» (SSMS-2014, 21-23 октября 2014 г.) Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благодирова РАН. – М. – С. 66.
7. Антуфьев, Б. А. Колебания неоднородных тонкостенных конструкций: моногр. / Б. А. Антуфьев. – М.: Изд-во МАИ, 2011. – 176 с.
8. Патент на полезную модель (РОСПАТЕНТ). Устройство для возбуждения механических колебаний / Серёгин С. В., Сысоев О. Е. – № 2014130510; зарег. 26.02.2015; приоритет от 22.06.2014. – 7 с.
9. Программное обеспечение для дистанционного измерения перемещений «Photodim 2D v 1.0» / В. А. Дзюба, А. В. Меньков, А. Л. Ковалев, О. Е. Сысоев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2011.617204, 2011.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ
SCIENTIFIC LIFE

Амосов О. С., Баена С. Г., Иващенко Я. С.
O. S. Amosov, S. G. Baena, Ya. S. Ivashchenko

СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ВУЗА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: О НОВОМ ПРОЕКТЕ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

THE CREATION OF INTELLECTUAL INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEM OF THE NEW GENERATION HIGH SCHOOL SECURITY: ON THE NEW PROJECT OF KOMSOMOLSK-ON-AMUR STATE TECHNICAL UNIVERSITY

Амосов Олег Семенович – доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: osa18@yandex.ru.

Mr. Oleg S. Amosov – Doctor of Engineering, Professor, Head of Industrial Electronics Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: osa18@yandex.ru.

Баена Светлана Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: svetlana.baena@yandex.ru.

Ms. Svetlana G. Baena – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: svetlana.baena@yandex.ru.

Иващенко Яна Сергеевна – доктор культурологии, начальник управления научно-исследовательской деятельностью Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, тел. (4217) 24-11-57. E-mail: iva_ya@mail.ru.

Ms. Yana S. Ivashchenko – Doctor of Culture Studies, Head of research activity Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenina st., 27; tel.: (4217) 24-11-57. E-mail: iva_ya@mail.ru.

Современные вызовы человеческому обществу заставляют решать вопросы безопасности на новом уровне. Среди них важное место занимают надежная охрана объектов организации, контроль над перемещением антропогенных и технических объектов, выявление нестандартных ситуаций, информационная безопасность и др.

В Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете вопросам безопасности уделяется повышенное внимание. Для развития данного направления Министерством образования и науки Российской Федерации поддержан научный проект¹ ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». Его руководителем является доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» ФГБОУ ВО «КнАГТУ» Олег Семенович Амосов. Данный проект направлен на создание интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы комплексной безопасности вуза нового поколения. Он ориентирован на решение проблемы создания теоретической базы и на ее основе работоспособных алгоритмов и программ интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы комплексной безопасности вуза.

Собственно о проекте. Целями поддержанного исследования являются повышение показателей комплексной безопасности вуза за счет внедрения искусственного интеллекта; разработка теоретических положений математического, алгоритмического и программного обеспечений для

¹ Заявка № 2.1898.2017/ПЧ «Создание математического и алгоритмического обеспечения интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы безопасности вуза», руководитель проекта Амосов О. С.



интеллектуальной системы, решающей задачи надежной охраны объектов университета, контроля и управления доступом физических лиц и технических объектов, обеспечения информационной безопасности.

При построении интеллектуальной системы в основу будет положена теория проектирования экспертных систем. В качестве основных научных подходов и методов выбраны кибернетический подход и методы искусственного интеллекта. Распознавание образов будет осуществляться с использованием сенсорной системы, основу которой составляет система компьютерного зрения. Для распознавания объектов наблюдения, штатных и нештатных ситуаций, принятия решений предполагается использование нейросетевого и нечеткого подходов, роевого интеллекта, одновременной навигации и построение карты объектов наблюдения. Структурно-параметрическая идентификация процессов и объектов возможна при использовании современных методов цифровой обработки сигналов, фрактального и вейвлет-анализа.

В процессе реализации проекта предполагается получение следующих значимых результатов:

- 1) математическое, алгоритмическое и программное обеспечение интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы комплексной безопасности вуза;
- 2) автоматическое обнаружение и распознавание штатных и нештатных ситуаций, слежение за объектами наблюдения, принятие решений на основе методов искусственного интеллекта и цифровой обработки сигналов;
- 3) синтез информационной-телекоммуникационной системы комплексной безопасности нового поколения для организаций целевой группы.

Проект расширит существующие представления SLAM технологий (Simultaneous Localization and Mapping) – метода одновременной локализации и построения карты в вопросе интеллектуального сопровождения технических объектов наблюдений. Исследование будет проводиться усилиями созданной на базе ФГБОУ ВО «КнАГТУ» лаборатории интеллектуальных систем управления и моделирования, развитие которой определяется в качестве одного из приоритетных направлений в развитии вуза.

Сфера внедрения результатов проекта предполагает интеграцию разработанной интеллектуальной системы для развития комплексной системы безопасности университетов города Комсомольска-на-Амуре. Дальнейшее развитие проекта представляется в виде полномасштабного внедрения результатов в университетах и организациях Хабаровского края. Жизненный цикл комплексной системы безопасности вуза будет обеспечен возможностью ее адаптации за счет применения кибернетического подхода и технологий искусственного интеллекта к изменяющимся условиям окружающей среды во времени и пространстве. Разработанные методы, алгоритмы и программы могут использоваться при решении задач обнаружения, навигации и слежения за подвижными объектами.

Решение всех этих задач представляется актуальным в условиях постоянного роста требований к комплексной безопасности вуза. Кроме всего прочего вопрос адаптации и внедрения технологий искусственного интеллекта в практику комплексной безопасности вузов не получил на сегодняшний день должного решения. Не случайно вопросы, актуализируемые в проекте О.С. Амосова, отнесены сегодня, во-первых, к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, во-вторых, к приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России, в-третьих, они входят в перечень критических технологий.

Желаем научному коллективу проекта успехов в достижении поставленных целей!