

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ИНТЕГРИРУЮЩИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Рассмотрены динамические свойства системы автоматического регулирования подачи унитарного топлива в однокомпонентный газогенератор жидкостного ракетного двигателя. Получены дифференциальные уравнения, описывающие работу элемента сравнения, дроссельного крана, гидравлического усилителя, а также процессы в газогенераторе. Предложено итоговое уравнение математической модели работы данной системы, позволяющее выявить основные закономерности влияния на статическую ошибку и статическую точность внешнего воздействия и командной величины. Представленные в работе результаты дают возможность получить статические и динамические свойства элементов системы автоматического регулирования на основе регулятора с интегрирующими свойствами.

**Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, унитарное топливо, жидкостной газогенератор, система регулирования.

В настоящее время основными энергетическими комплексами ракетно-космической техники, выполняющей задачу по освоению околоземного и межпланетного космического пространства, являются жидкостные ракетные двигательные установки (ЖРДУ). В ближайшей перспективе этим двигательным установкам нет альтернативы [1–3]. Заказчики пусковых услуг предъявляют к разработчикам маршевых ЖРДУ ряд требований, связанных прежде всего с минимизацией затрат топлива для выведения космического аппарата на заданную траекторию (в заданную точку) либо с увеличением массы выводимой полезной нагрузки. Выполнение данных требований обуславливает ожидание получения максимальной прибыли от выполнения полетной задачи. Одним из путей выполнения указанных требований является повышение точности автоматических систем управления ЖРДУ, основным элементом которых являются управляющие устройства (регуляторы) [4–6].

К основным видам регуляторов, используемых в ЖРДУ, относятся регуляторы тяги (или давления в камере сгорания) и регуляторы массового соотношения расходов компонентов в камеру или жидкостной газогенератор. Регулятор тяги задает необходимый уровень тяги двигательной установки или его программное изменение, а регулятор соотношения компонентов — необходимый режим работы камеры или газогенератора, прежде всего по максимально допустимой тем-

пературе газа. В жидкостных двигательных установках ракет применяются регуляторы прямого действия и регуляторы с усилителем, использующие в качестве рабочего тела усилителя, например, газ или жидкость (компонент топлива). Регуляторы с усилителем могут иметь различные свойства в зависимости от вида усилителя (интегрирующий, инерционный, изодромный).

Для создания регуляторов, имеющих определенные динамические характеристики, обладающих высоким качеством процесса управления (точность, устойчивость, быстродействие) требуется изучить протекающие в них физические процессы, статические и динамические свойства. Для изучения свойств регуляторов как сложной системы может быть применен системный подход, который подразумевает вначале проведение процедуры анализа, т.е. разбиения системы на элементы (звенья) и изучение свойств каждого звена в отдельности. После процедуры анализа выполняется этап синтеза — рассмотрения свойств системы как определенного соединения звеньев с учетом их взаимодействия [2, 7–8]. Заключительным этапом проектируемой конструкции является создание ее математической модели, которая позволяет выявить характерные особенности системы, выбрать рациональные характеристики узлов и агрегатов [9].

В связи с этим целью данной работы было создание математической модели и изучение

динамических свойств системы автоматического управления с интегрирующим регулятором для жидкостной ракетной двигательной установки, а основными задачами:

- 1) проведение поэлементного анализа выбранного регулятора;
- 2) определение статических и динамических свойств составляющих регулятор звеньев;
- 3) получение уравнения, описывающего характеристику всего регулятора;
- 4) исследование возможностей повышения точности регулятора.

Система автоматического регулирования с интегрирующим регулятором (рис. 1) содержит в своем составе объект регулирования — жидкостной однокомпонентный газогенератор 10 и управляющее устройство, состоящее из элемента сравнения 9, дроссельного крана 4 и усилителя, рабочим телом которого является жидкий компонент топлива. Усилитель состоит из гидравлического цилиндра 1 и поршня 2, соединенного штоком 3 с исполнительным органом (дроссельным краном 4). Два пояска 6 цилиндрического золотникового узла 8 по ширине ( $l$ ) равны высоте окон 7 распределителя рабочего тела в верхнюю и нижнюю полости цилиндра 1. Мембрана 5 элемента сравнения 9 связана штоком с золотниковым узлом 8 и управляет положением поясков 6 относительно окон 7.

Командное давление  $p_{KB}$  управляющего воздуха задает необходимую величину давления перед турбиной. Вследствие малости потерь в газопроводе от газогенератора до соплового аппарата турбины (короткий участок, малая вязкость газа) будем считать, что давление в газогенераторе будет равно давлению перед турбиной  $p_T$ . В случае изменения давления в баке  $p_{BT}$  (возмущающее воздействие) изменяется и давление в газогенераторе  $p_T$  (регулируемая величина). Мембрана 5, регистрируя это отклонение, сдвигает золотник 8 и открывает подачу рабочего тела ( $p_{нод}$ ) в одну из полостей цилиндра, а другую полость сообщает со сливной магистралью ( $p_{сл}$ ). Дроссель 4 начинает перемещаться и изменением подачи топлива компенсирует влияние возмущающего воздействия, стабилизируя регулируемую величину. В переходном процессе при  $\Delta p = p_{KB} - p_T \rightarrow 0$  мембранный узел подтягивает золотник к исходному положению. Движение элементов подвижных частей регулятора прекратится лишь в тот момент, когда окна золотникового распределителя 7 окажутся полностью перекрытыми поясками 6 золотника. Так как дроссельный кран не имеет жесткой обратной связи с мембраной, такой регулятор будет астатическим.

Рассмотрим теперь свойства каждого элемента системы.

Мембранный узел выступает в роли элемента сравнения. Его статические свойства можно описать [10] уравнением баланса сил в номинальном положении:

$$p_{T,ном} F_M \pm c_M z_{M,ном} = p_{KB} F_M, \quad (1)$$

где  $F_M$  — площадь поверхности мембраны;  $c_M$  — жесткость мембраны, например, определяемая по методике [11];  $z_M$  — перемещение (прогиб) мембраны;  $ном$  — значения параметров

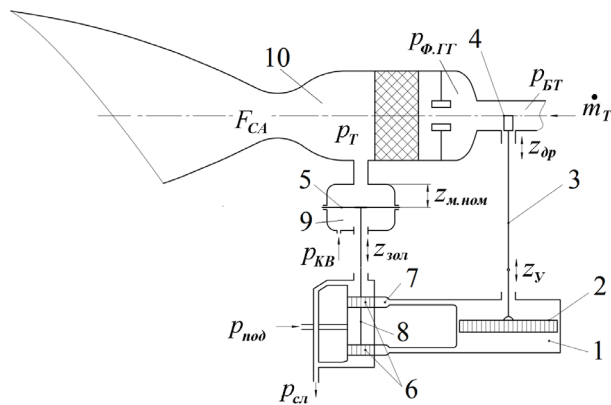


Рис. 1. Система автоматического регулирования с интегрирующим регулятором:

- 1 — гидравлический цилиндр; 2 — поршень;
- 3 — шток дроссельного крана;
- 4 — дроссельный кран;
- 5 — мембрана; 6 — пояски золотника;
- 7 — окна золотникового распределителя;
- 8 — золотниковый узел;
- 9 — элемент сравнения;
- 10 — однокомпонентный газогенератор

в номинальном положении (на номинальном режиме).

В переходном процессе дополнительно со статическими нагрузками необходимо учесть инерционную силу, действующую на подвижные элементы, и гидродинамическую силу, зависящую от перепада давления и расхода жидкости [12].

Безразмерное уравнение, описывающее динамические свойства мембранного узла, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{m_{per}}{c_M} \frac{d^2 \bar{z}_M}{dt^2} + \frac{k_{ж.тр}}{c_M} \frac{d \bar{z}_M}{dt} + \Delta \bar{z}_M = \\ & = \frac{p_{T,ном} F_M}{c_M z_{M,max}} \Delta \bar{p}_T - \frac{p_{KB,ном} F_M}{c_M z_{M,max}} \Delta \bar{p}_{KB}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $m_{per}$  — масса подвижных частей регулятора;  $k_{ж.тр}$  — коэффициент сил, вызываемых жидкостным трением в элементах регулятора. Здесь и далее обезразмеривание отклонений параметров производилось путем их отнесения к номинальным (для давлений и расходов) или максимальным (для геометрических параметров — перемещений и площадей) величинам.

Так как установленный в системе усилитель не только усиливает величину и мощность сигнала, но и компенсирует инерционные силы и силы вязкостного гидравлического сопротивления в уравнении (2), можно не учитывать первое и второе слагаемые в правой части. Тогда динамическое уравнение мембранного узла с учетом вводимых коэффициентов будет:

$$\Delta \bar{z}_M = \Delta \bar{z}_{зол} = K_{per1} \Delta \bar{p}_T - K_{per2} \Delta \bar{p}_{KB}, \quad (3)$$

$$K_{per1} = \frac{p_{T,ном} F_M}{c_M z_{M,max}}; \quad K_{per2} = \frac{p_{KB,ном} F_M}{c_M z_{M,max}}$$

где  $z_{зол}$  — перемещение золотника гидроусилителя, равное перемещению мембраны.

Уравнение (3) характеризует мембранный узел с учетом компенсации инерционных и вязкостных сил усилителем как безынерционное звено.

Вторым звеном в рассматриваемой системе будет гидравлический усилитель. При получении уравнения усилителя использовано уравнение равенства массовых расходов рабочего тела усилителя (компонент топлива) через золотниковое устройство и рабочего тела в полость цилиндра:

$$\dot{m}_{\text{зол}} = \dot{m}_{\text{цил}}.$$

Тогда безразмерное уравнение, описывающее динамические свойства гидравлического усилителя, выглядит следующим образом:

$$\frac{\rho_{p,m} F_{\text{цил}} z_{y,\text{max}}}{\mu_{\text{зол}} z_{\text{зол,max}} l \sqrt{2\rho_{p,m}(p_{\text{ног}} - p_{\text{св}})}} \frac{d\bar{z}_y}{dt} = \Delta\bar{z}_{\text{зол}}, \quad (4)$$

где  $\mu_{\text{зол}}$  — коэффициент расхода перепускного окна золотникового распределителя;  $l$  — ширина перепускного окна золотникового распределителя;  $\rho_{p,m}$  — плотность рабочего тела (компонента топлива) усилителя;  $F_{\text{цил}}$  — площадь поршня гидроцилиндра усилителя;  $z_y$  — ход штока поршня гидроцилиндра усилителя.

Постоянный коэффициент в левой части уравнения (4) является постоянной времени усилителя:

$$T_y = \frac{\rho_{p,m} F_{\text{цил}} z_{y,\text{max}}}{\mu_{\text{зол}} z_{\text{зол,max}} l \sqrt{2\rho_{p,m}(p_{\text{ног}} - p_{\text{св}})}}.$$

Для выявления динамических свойств гидравлического усилителя запишем уравнение (4) в символической форме с использованием оператора Лапласа при нулевых начальных условиях:

$$T_y p \Delta\bar{z}_y = \Delta\bar{z}_{\text{зол}} \quad \text{или} \quad \Delta\bar{z}_y = \frac{1}{T_y p} \Delta\bar{z}_{\text{зол}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) характеризует усилитель как интегрирующее звено.

Третьим элементом автоматической системы является дроссельный кран, перемещение которого за счет жесткой связи со штоком поршня усилителя  $z_{gp} = z_y$ . Уравнение, описывающее его свойства, будет:

$$\Delta\bar{\mu}F_{gp} = K_{\text{ИО}} \Delta\bar{z}_{gp} = K_{\text{ИО}} \Delta\bar{z}_y, \quad (6)$$

где  $K_{\text{ИО}} = \frac{z_{gp,\text{max}}}{\mu F_{gp,\text{max}}} \frac{g\mu F_{gp}}{gz_{gp}}$  — коэффициент усиления исполнительного элемента (дросселя);  $\mu F_{gp,\text{max}}$  — максимальная эффективная проходная площадь дроссельного крана, соответствующая максимальному перемещению дросселя  $z_{gp,\text{max}}$ ;  $\frac{g\mu F_{gp}}{gz_{gp}}$  — тангенс угла наклона касательной к статической характеристике дросселя, т.е. связи его площади открытия с перемещением  $\mu F_{gp} = f(z_{gp})$ . Значение тангенса в случае нелинейной статической характеристики определя-

ется для каждого установившегося положения дросселя [13].

Уравнение (6) описывает свойства дроссельного крана как безынерционного звена без учета действия инерционных сил от массы самого дросселя и присоединенной к нему массы жидкости, а также вязкостных сил сопротивления, действующих на дроссель в потоке компонента топлива. Перечисленные нагрузки компенсируются усилителем.

Уравнение, отражающее динамические характеристики жидкостного однокомпонентного газогенератора совместно с управляющим дросселем имеет вид [14]:

$$(T_{\text{об}} p + 1) \Delta\bar{p}_T = K_{\text{об1}} \Delta\bar{p}_{\text{БТ}} + K_{\text{об2}} \Delta\bar{\mu}F_{gp}. \quad (7)$$

Введенные коэффициенты усиления и постоянная времени объекта управления (газогенератора) определяются следующим образом:

$$K_{\text{об1}} = \frac{K_{\Gamma1} K_{gp,1}}{1 + K_{\Gamma1} K_{gp,2} + K_{\Gamma2}};$$

$$K_{\text{об2}} = \frac{K_{\Gamma1} K_{gp,3}}{1 + K_{\Gamma1} K_{gp,2} + K_{\Gamma2}}; \quad T_{\text{об}} = \frac{T_{\Gamma} (1 + K_{\Gamma1} K_{gp,2})}{1 + K_{\Gamma1} K_{gp,2} + K_{\Gamma2}}.$$

Промежуточные коэффициенты элементов газогенератора будут:

$$T_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma} \beta_{\Gamma}}{F_{\text{св}} R_{\Gamma} T_{\Gamma}} = \frac{V_{\Gamma}}{F_{\text{св}} R_{\Gamma} T_{\Gamma}} \varphi_{\Gamma} \sqrt{\frac{R_{\Gamma} T_{\Gamma}}{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k-1}}};$$

$$K_{\Gamma1} = \frac{p_{\text{ф.}\Gamma,\text{ном}}}{\dot{m}_{\Gamma,\text{ном}}} \frac{g\dot{m}_{\Gamma}}{g p_{\text{ф.}\Gamma}}; \quad K_{\Gamma2} = \frac{p_{\Gamma,\text{ном}}}{\dot{m}_{\Gamma,\text{ном}}} \frac{g\dot{m}_{\Gamma}}{g p_{\Gamma}};$$

$$K_{gp,1} = \frac{p_{\text{б.т.ном}}}{p_{\text{ф.}\Gamma,\text{ном}}}; \quad K_{gp,2} = \frac{\dot{m}_{\Gamma,\text{ном}}}{p_{\text{ф.}\Gamma,\text{ном}}} \frac{g p_{\text{ф.}\Gamma}}{g \dot{m}_{\Gamma}};$$

$$K_{gp,3} = \frac{\mu F_{gp,\text{max}}}{p_{\text{ф.}\Gamma,\text{ном}}} \frac{g p_{\text{ф.}\Gamma}}{g \mu F_{gp}},$$

где параметры однокомпонентного газогенератора:  $V_{\Gamma}$  — объем камеры разложения;  $\beta_{\Gamma}$  — расходный комплекс;  $F_{\text{св}}$  — проходная критического сечения в газовой трубе (принято, что таким сечением является сечение в сопловом аппарате турбины);  $R_{\Gamma}$  — удельная газовая постоянная продуктов разложения;  $T_{\Gamma}$  — температура газа в камере разложения;  $k$  — показатель адиабаты продуктов разложения;  $\varphi_{\Gamma}$  — коэффициент совершенства процессов (коэффициент потерь);  $p_{\text{ф.}\Gamma}$  — давление перед форсунками.

Уравнение (7) характеризует объект регулирования как инерционное звено. Регулируемой величиной однокомпонентного газогенератора выступает изменение давления на его выходе ( $\Delta\bar{p}_T$ ), а входными величинами — изменение давления в баке топлива  $\Delta\bar{p}_{\text{БТ}}$  (возмущающее воздействие) и изменение проходной площади дроссельного крана  $\Delta\bar{\mu}F_{gp}$  (командное воздействие). Инерционные свойства объекта регулирования (накопление или расходование газа в объеме газогенератора) характеризуются постоянной времени  $T_{\text{об}}$ . Кроме того, отрицательная местная обрат-

ная связь по расходу  $\dot{m}_T$  в этом звене скрыта, но определяет свойство самостабилизации газогенератора. Благодаря данному свойству возможно поддержание устойчивого процесса подачи унитарного топлива через форсунки в камеру разложения газогенератора с одновременным выходом продуктов разложения через газовад на вход в турбину.

Динамические свойства системы автоматического регулирования с интегрирующим регулятором в целом характеризуются системой дифференциальных уравнений (3), (5) – (7). Совместное решение этой системы дает дифференциальное уравнение системы автоматического регулирования в следующем виде (операторная форма записи при нулевых начальных условиях):

$$\left( \frac{T_y T_{об}}{K_{об2} K_{пер1} K_{ИО}} p^2 + \frac{T_y}{K_{об2} K_{пер1} K_{ИО}} p + 1 \right) \Delta \bar{p}_T = \frac{K_{об1} T_y}{K_{об2} K_{пер1} K_{ИО}} p \Delta \bar{p}_{BT} + \frac{K_{пер2}}{K_{пер1}} \Delta \bar{p}_{KB}. \quad (8)$$

Уравнение (8) соответствует свойствам колебательного или апериодического звена второго порядка, дифференцирующего по отношению к возмущающему воздействию и усилительного по отношению к командному воздействию. Частные решения дифференциального уравнения (8), полученные по принципу суперпозиции отдельно для каждого из входных воздействий, позволяют определить статические ошибки системы автоматического регулирования.

Частное решение уравнения (8) по отношению к возмущению (изменение давления в баке унитарного топлива  $\Delta p_{BT}$ ) на установившемся режиме приводит к условию:

$$(\Delta \bar{p}_T)_{t \rightarrow \infty, p \rightarrow 0} = \Delta \bar{p}_{T,CO} = 0,$$

что говорит об астатических свойствах системы автоматического регулирования по отношению к возмущению, т.е. выходная величина системы не зависит от уровня данного входного воздействия.

Частное решение уравнения (8) по отношению к командному воздействию (давлению командного воздуха)  $\Delta p_{KB}$  приводит к условию:

$$(\Delta \bar{p}_T)_{\tau \rightarrow \infty} = \frac{K_{пер2}}{K_{пер1}} \Delta \bar{p}_{KB}.$$

Для достижения точности воспроизведения командного воздействия на установившемся режиме требуется выполнение условия  $(\Delta \bar{p}_T)_{\tau \rightarrow \infty} = \Delta \bar{p}_{KB}$ , которое реализуется в пределе при  $K_{пер2} \approx K_{пер1}$  или  $p_{T,ном} \approx p_{KB,ном}$ .

Анализируя выражения (1) и (3), можно сделать вывод о том, что заданный уровень точности воспроизведения команды может быть достигнут путем уменьшения жесткости  $c_M$  мембраны и/или увеличения площади поверхности мембраны  $F_M$ .

Однако при выборе материала и размеров мембраны следует помнить об ограничениях по ее прочностным и массово-габаритным характеристикам.

## Библиографический список

1. Васютин Ю. И., Смирнов И. А., Ягодников Д. А. [и др.]. Агрегаты регулирования жидкостных ракетных двигательных установок / под ред. Д. А. Ягодникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 223 с. ISBN 978-5-7038-4120-4.
2. Бабкин А. И., Белов С. И., Рутовский Н. Б. [и др.]. Основы теории автоматического управления ракетных двигательных установок. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1986. 458 с.
3. Вачнадзе В. Д., Овечко-Филиппов Э. В., Смоленцев А. А. [и др.]. Разработка, этапы модернизации и итоги пятидесятилетней эксплуатации первого отечественного жидкостного ракетного двигателя замкнутой схемы // Космическая техника и технологии. 2015. № 2 (9). С. 82–90.
4. Завадский В. К., Иванов В. П., Каблова Е. Б. [и др.]. Терминальные системы управления расходом топлива жидкостных ракет-носителей (История развития от Р-7 до современных РН «Союз», РН «Ангара») // Датчики и системы. 2018. № 4 (224). С. 3–16.
5. Волков Е. Б., Сырицын Т. А., Мазинг Г. Ю. Статика и динамика ракетных двигательных установок. В 2 кн. Кн. I. Статика. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.
6. Аверьянов Г. С., Куденцов В. Ю., Яковлев А. Б. Теория автоматического управления и регулирования. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. 168 с.
7. Волков Е. Б., Сырицын Т. А., Мазинг Г. Ю. Статика и динамика ракетных двигательных установок. В 2 кн. Кн. II. Динамика. М.: Машиностроение, 1978. 320 с.
8. Яковлев А. Б. Определение уравнения динамики жидкостной ракетной двигательной установки // Омский научный вестник. 2010. № 1 (87). С. 71–74.
9. Лебединский Е. В., Калмыков Г. Л., Мосолов С. В. [и др.]. Компьютерные модели жидкостных ракетных двигателей / под ред. А. С. Коротева. М.: Машиностроение, 2009. 375 с. ISBN 978-5-217-03449-9.
10. Шевяков А. А., Калинин В. М., Науменкова Н. В. [и др.]. Теория автоматического управления ракетными двигателями / под ред. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1978. 288 с.
11. Пономарев С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.
12. Беляев Е. Н., Чванов В. К., Черваков В. В. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей / под ред. В. К. Чванова. М.: Изд-во МАИ, 1999. 228 с. ISBN 5-7035-2221-8.
13. Горячкин А. А., Жуковский А. Е., Игначков С. М. [и др.]. Регуляторы расхода для топливных систем двигателей летательных аппаратов / под ред. В. П. Шорина. М.: Машиностроение, 2000. 208 с. ISBN 978-5-217-03058-3.
14. Yakovlev A. V., Kalachevsky V. A. Mathematical model of one-component gas generator with the control element // 2014 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, 2014. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005701.

**КУЗЬМЕНКО Ирина Анатольевна**, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение». SPIN-код: 9128-3421  
Адрес для переписки: kia55@inbox.ru

**ЯКОВЛЕВ Алексей Борисович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Авиа- и ракетостроение».  
SPIN-код: 8194-5800  
AuthorID (РИНЦ): 488687  
ORCID: 0000-0002-1987-2138  
AuthorID (SCOPUS): 56503089200  
ResearcherID: E-7451-2014

Адрес для переписки: yakovlev@omgtu.ru

УДК 621.791.14

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-21-25

Для цитирования

Кузьменко И. А., Яковлев А. Б. Исследование свойств системы автоматического регулирования жидкостной ракетной двигательной установки с интегрирующим регулятором // Омский научный вестник. 2019. № 1 (163). С. 17–21. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-17-21.

Статья поступила в редакцию 21.12.2018 г.

© И. А. Кузьменко, А. Б. Яковлев

**И. К. ЧЕРНЫХ  
Е. В. ВАСИЛЬЕВ  
Р. В. ДЫЛЬЧЕНКО  
Ю. Е. ЖДАНОВА  
Б. К. ИГИСЕНОВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

В статье представлены некоторые особенности образования сварных соединений различных систем металлов для стыковых и нахлесточных соединений. Рассмотрена схема образования стыкового соединения алюминиевых сплавов со сталью со смещением инструмента. Проведен анализ качества и структуры швов, полученных согласно данной схеме. Исследован микрошлиф полученного образца сварного шва алюминиевого сплава АМГ6 с нержавеющей сталью 12Х18Н10Т толщиной 2 мм при частоте вращения инструмента 500 об/мин и подаче 50 мм/мин со смещением инструмента на 0,2 мм в стальную заготовку. В ядре шва наблюдается взаимное проникновение металлов на глубину до 3,2 мм и стальные включения в алюминиевом сплаве размером до 0,3 мм.

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, фрикционная сварка, сварка разнородных металлов, алюминиевые сплавы, нержавеющая сталь, структура сварного шва.

Сварка разнородных металлов позволяет создавать цельные конструкции, в которых отдельные поверхности будут обладать различными физико-механическими свойствами и, соответственно, выполнять различные функции. Биметаллические соединения широко используются в тех случаях, когда невыгодно изготавливать из дорогого материала изделие целиком — вместо этого предусматривается отдельный участок из отличающегося материала, который испытывает воздействие определенных нагрузок. При этом существует ряд сложностей в изготовлении данных сварных соединений, а номенклатура свариваемых металлов охватывает всевозможные сплавы и чистые металлы. Из сложностей

соединения разнородных металлов можно выделить следующие: различие температур плавления свариваемых металлов, различие в коэффициентах линейного расширения, различие свойств теплопроводности, образование интерметаллидов. Примеры биметаллических соединений различных конструкций представлены на рис. 1 [1–3].

Целью данного исследования является оценка возможности сваривания разнородных металлов методом сварки трением с перемешиванием и анализ структуры стыкового соединения алюминиевого сплава с нержавеющей сталью.

Сварка разнородных металлов, таких как сталь и титан, имеет свои особенности. Титан с легирующими компонентами стали образует