УДК 539.3

КОЛИВАННЯ ГНУЧКОГО ТРУБОПРОВОДУ НА ПРУЖНІЙ ОСНОВІ З РУХОМОЮ РІДИНОЮ

Кикоть С.В., кандидат фізико-математичних наук

Вступ. У машинобудуванні та інших галузях техніки багато конструкцій, які в експлуатаційному режимі знаходяться в постійному контакті з іншими елементами Йдеться передусім про гнучкі робочі елементи систем; трубопроводи силових агрегатів, якими забезпечується функціонування систем автоматики та систем живлення двигунів; трубопроводи, які певним чином закріплені та взаємодіють із навколишнім середовищем, плаваючі трубопроводи.

Література щодо досліджень прикладних задач динаміки трубопроводів нараховує сотні найменувань [6]. Проте спроби багатьох авторів застосувати прямі методи для наближеного аналізу без урахування двохвильової форми руху в ряді випадків приводять до помилкових, а інколи і суперечливих результатів.

У науковій монографії [2] та статтях [3,4,5] розглянуто задачі динаміки систем з рухомим інерційним навантаженням. Запропонований метод виділення та наближеного дослідження одночастотних двохвильових коливних процесів в механічних системах з рухомим навантаженням, який побудовано у науковій праці [3], використаємо до розв'язання задачі про коливання гнучкого трубопроводу з потоком рідини, який розташований на пружній основі.

Метою даної роботи є вивчення впливу швидкості руху потоку рідини на власні частоти коливань та стійкість гнучкого трубопроводу на пружній основі.

Постановка задачі та методика розв'язання. Розрахунок гнучкого трубопроводу на пружній основі зводиться до розв'язку контактної задачі між конструкцією і основою. Для розв'язку таких задач використовується гіпотеза про пропорціональну залежність між реакцією і осадкою поверхні основи – гіпотеза Вінкеровської основи.

Диференціальне рівняння поперечних коливань гнучкого трубопроводу з рухомою рідиною, при повному врахуванні сил інерції рухомого навантаження в даному випадку набуває вигляду

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+2\rho_2 v\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial t}-\left(T-\rho_2 v^2\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+ku=0\,, \qquad (1)$$

де $u(x,t)$ – поперечні відхилення труби; T – початковий натяг; $\rho=\rho_1+\rho_2$ – сума розподілених мас труби і рухомої рідини; v – швидкість руху потоку рідини; k – коефіцієнт жорсткості пружної основи.

Для однозначної характеристики коливного процесу до рівняння (1) додаємо граничні умови, які не залежать від того, контактує трубопровід з пружною основою чи ні, вони визначаються способами закріплення і навантаження кінців. Наприклад, розглянемо випадок шарнірно закріпленого трубопроводу:

$$u\left(0,t\right)=0\,,\quad u\left(l,t\right)=0\,. \qquad (2)$$

Наявність гіроскопічних сил представлених членами зі змішаними похідними в рівняннях динаміки трубопроводів з рухомою рідиною не дають змоги застосувати методи розділення змінних та прямі методи математичної фізики в класичній формі до дослідження коливного руху.

У роботі [1] побудовано точний розв'язок задачі про коливання гнучкого трубопроводу (шланга) з рухомим рівномірно розподіленим інерційним навантаженням (потоком рідини), отриманий без переходу до канонічної форми рівнянь, яким представлено двохвильву форму руху пружного об'єкта з рухомим навантаженням. Поперечні коливання на кожній частоті представляються у вигляді суми двох груп стоячих хвиль власних і супровідних коливань, які мають різні форми і зсунуті за фазою на прямий кут .

$$u_n\left(x,t\right)=a_n\sin\lambda_n x\left(\cos\gamma_n x\cos\left(\omega_n t+\varphi_n\right)-\sin\gamma_n x\sin\left(\omega_n t+\varphi_n\right)\right),$$

© Кикоть С.В., 2012

або

$$u_n(x,t) = a_n \sin\lambda_n \cos\psi_n(x,t), \tag{3}$$

де $\psi_n(x,t) = \gamma_n x + \omega_n t + \varphi_n$ - фазова функція, $\lambda_n = \dfrac{n\pi}{l}$, $n = 1,2,3,...\infty$.

Для розв'язання крайової задачі (1), (2) підставляємо в рівняння руху (1) прогин $u_n(x,t)$ представлений в формі (3), отримуємо

$$a_n\left[-\rho\omega_n^2 - 2\rho_2 v\omega_n\gamma_n + \left(T-\rho_2 v^2\right)(\lambda_n^2+\gamma_n^2) + k\right]\sin\lambda_n x\cos\psi_n + a_n\left[-2\rho_2 v\omega_n\lambda_n + 2\lambda_n\gamma_n\left(T-\rho_2 v^2\right)\right]\cos\lambda_n x\sin\psi_n = 0. \tag{4}$$

Множники $\sin\lambda_n x\cos\psi_n$ та $\cos\lambda_n x\sin\psi_n$ при жодних значеннях фазового кута одночасно не набувають нульових значень. Виконання умови (4) можливе лише за умов:

$$\begin{gathered} -\rho\omega_n^2 - 2\rho_2 v\omega_n\gamma_n + \left(T-\rho_2 v^2\right)(\lambda_n^2+\gamma_n^2) + k = 0, \\ -\rho_2 v\omega_n + \gamma_n\left(T-\rho_2 v^2\right) = 0; \end{gathered} \tag{5}$$

накладених на фазову функцію $\psi_n(x,t)$.

Із другого рівняння (5) знаходимо значення параметра γ_n за формулою

$$\gamma_n = \frac{\rho_2 v\omega_n}{T-\rho_2 v^2}. \tag{6}$$

Виключаючи з першого рівняння (5) параметр γ_n та враховуючи співвідношення (6), отримаємо формули для визначення частот і ексцесів основного і вищих тонів коливань

$$\begin{gathered} \omega_n = \lambda_n\sqrt{\frac{\left(T-\rho_2 v^2\right)\left(T+\dfrac{k}{\lambda_n^2}-\rho_2 v^2\right)}{T\left(\rho_1+\rho_2\right)-\rho_1\rho_2 v^2}}, \\ \gamma_n = \rho_2 v\lambda_n\sqrt{\frac{T+\dfrac{k}{\lambda_n^2}-\rho_2 v^2}{\left(T-\rho_2 v^2\right)\left(T\left(\rho_1+\rho_2\right)-\rho_1\rho_2 v^2\right)}}, \quad n = 1,2,3,...\infty. \end{gathered} \tag{7}$$

Формули (7) встановлюють залежність частоти власних коливань ω_n та параметра γ_n від швидкості руху інерційного навантаження v. З аналізу отриманих співвідношень визначаємо значення трьох критичних швидкостей руху рідини:

$$v_{kp1} = \sqrt{\frac{T}{\rho_2}}, \qquad v_{kp2} = \sqrt{\frac{T}{\rho_2}+\frac{k}{\rho_2\lambda_n^2}}, \qquad v_{kp3} = \sqrt{\frac{T\left(\rho_1+\rho_2\right)}{\rho_1\rho_2}}. \tag{8}$$

Для побудови графічних залежностей, як приклад, приймались такі параметри системи: $\rho_1 = \rho_2 = \rho/2$, $l = 5$ м, $T/\rho = \Omega^2\left(l/\pi\right)^2$, $\Omega = 2\pi$ с$^{-1}$.

На рисунках 1 та 2 показано залежності частоти власних коливань ω_n та параметра γ_n від швидкості руху потоку рідини v, що визначаються формулами (7).

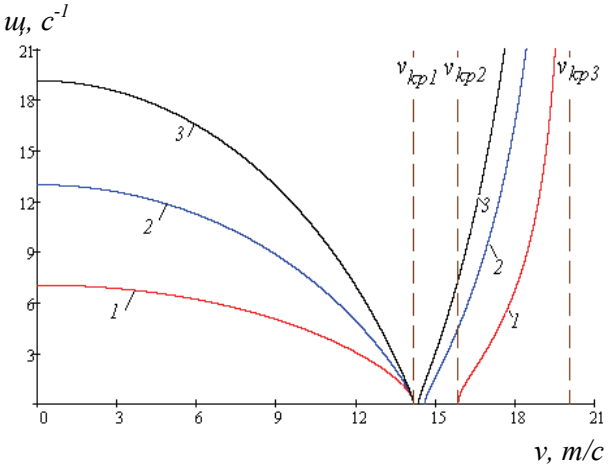

Рисунок 1. Залежність частоти від швидкості руху рідини

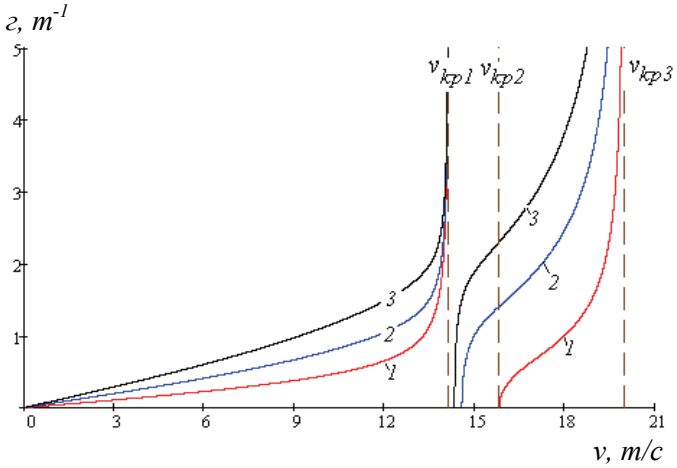

Рисунок 2. Залежність ексцесу від швидкості руху рідини

Достовірність залежностей (7) підтверджується хоча б тим, що із них при $k=0$ отримуються відомі залежності частоти власних коливань ω_n та параметра γ_n від швидкості руху потоку рідини v у випадку коливання гнучкого трубопроводу з початковим натягом. Як показано у [1,3], вони мають вигляд:

$$\omega_n = \lambda_n \sqrt{\frac{\left(T-\rho_2 v^2\right)^2}{T\left(\rho_1+\rho_2\right)-\rho_1\rho_2 v^2}},$$

$$\gamma_n = \frac{\rho_2 v \lambda_n}{\sqrt{T\left(\rho_1+\rho_2\right)-\rho_1\rho_2 v^2}}, \quad n=1,2,3,...\infty. \tag{9}$$

Для коливання гнучкого трубопроводу з рухомим навантаженням встановлено дві критичні швидкості руху рідини [1,3]:

$$v_{kp1}=\sqrt{\frac{T}{\rho_2}}, \qquad v_{kp2}=\sqrt{\frac{T\left(\rho_1+\rho_2\right)}{\rho_1\rho_2}}. \tag{10}$$

На рисунках 3 та 4 показано залежності частоти власних коливань ω_n та параметра γ_n від швидкості руху потоку рідини v гнучкого трубопроводу з початковим натягом.

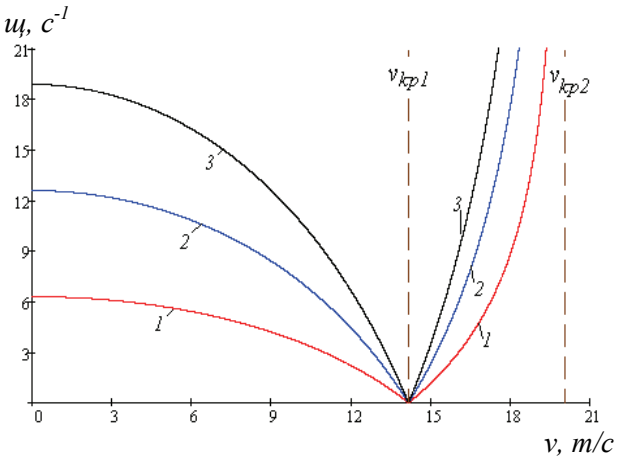

Рисунок 3. Залежність частоти від швидкості руху рідини

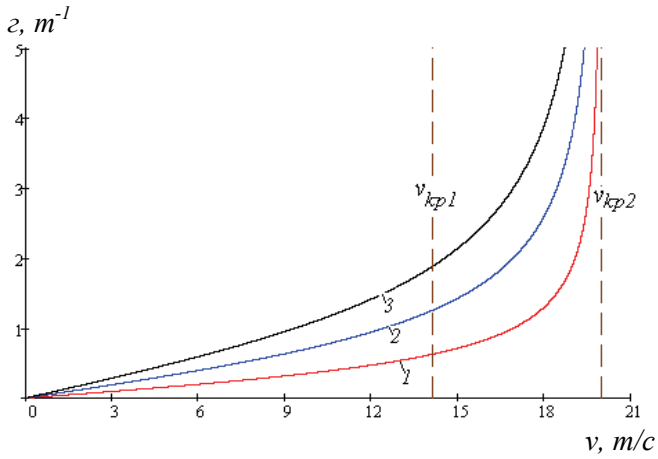

Рисунок 4. Залежність ексцесу від швидкості руху рідини

Висновки. Отримані розрахункові формули та графічні залежності дають змогу зробити певні висновки, щодо впливу швидкості руху потоку рідини на коливний процес.

Коливний процес трубопроводу з рухомою рідиною суттєво залежить від швидкості руху рідини (натягу $\rho_2 v^2$), характеризується значеннями частот $\omega_n(v)$ та параметрами $\gamma_n(v)$, які спричиняють перекіс форм коливань.

На відміну від коливань гнучкого трубопроводу з початковим натягом, для якого встановлено дві критичні швидкості руху рідини (10), коливання гнучкого трубопроводу на пружній основі характеризується трьома значеннями критичних швидкостей руху рідини (8), за яких коливний рух має специфічні особливості.

При першій критичній швидкості $v_{kp1} = \sqrt{\frac{T}{\rho_2}}$ всі частоти власних коливань однозначно набувають нульових значень, трубопровід втрачає прямолінійну форму і набуває статичного прогину під дією центробіжних сил рухомої рідини.

При швидкості руху рідини в межах $v_{kp1} < v < v_{kp2}$ коливний рух описується гіперболічними функціями.

При досягненні другої критичної швидкості $v_{kp2} = \sqrt{\frac{T}{\rho_2} + \frac{k}{\rho_2 \lambda_n^{\,2}}}$, яка залежить від жорсткості основи та довжини хвилі, коливний рух стабілізується. Відновлення коливного руху на вищих тонах коливань наступає раніше основного тону коливань.

З наближенням до третьої критичної швидкості руху рідини $v_{kp3} = \sqrt{\frac{T(\rho_1 + \rho_2)}{\rho_1 \rho_2}}$ відбувається різке зростання значень власних частот за рахунок стабілізації руху гіроскопічними силами.

Одержані результати можуть слугувати основою для подальшого розвитку прямих методів при побудові наближених розв'язків ускладнених динамічних систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Горошко О. А. Собственные и сопровождающие колебания в системах с подвижными инерционными нагрузками / О. А. Горошко // Тр. 5-й Междунар. конф. по нелинейным колебаниям. – К : Ин-т математики АН УССР, 1970. – Т. 3. – С. 215–220.

2. Горошко О. О. Двохвильові процеси в механічних системах / Горошко О.О., Дем'яненко А.Г., Киба С.П. – К.: Либідь, 1991. – 188 с.

3. Горошко О. О. Дослідження одночастотних режимів в двохвильових системах (в системах з рухомим навантаженням) / О. О. Горошко // Вісник Київського університету. Серія : фіз.-мат. науки. – 2002. – № 2. – С. 93–98.

4. Кикоть С. В. Оцінка додаткового натягу силами тертя в системах з рухомим навантаженням / С. В. Кикоть // Вісник Київського університету. Серія : фіз.-мат. науки. – 2002. – № 4. – С. 59–62.

5. Горошко О. О. Одночастотні динамічні процеси в системах з рухомим інерційним навантаженням /О. О. Горошко, С. В. Кикоть // Комплексний аналіз і течії з вільними границями. К.: Ін-т математики, 2010. – Т. 7, № 2. – С. 347–356. – (Праці / Ін-т математики НАН України).

6. Якушев Н. З. Динамика, деформируемых систем под воздействием движущихся нагрузок. Ч. 3, гл. 1. Динамика балок, стержней и арок под действием подвижных нагрузок / Н. З. Якушев // Исследования по теории пластин и оболочек. – Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1985 – Вып. 18. Ч. 1. – С. 3–56. – Режим доступу до журн.: http://www.mathnet.ru.

РЕФЕРАТ

Кикоть С. В. Коливання гнучкого трубопроводу на пружній основі з рухомою рідиною. / Сергій В'ячеславович Кикоть // Вісник НТУ: В 2-х частинах. – К.: НТУ. – 2012. – Вип. 26.

У статті розглянуто коливання гнучкого трубопроводу з потоком рідини, який розташований на пружній основі, з шарнірним закріпленням кінців, При побудові математичної моделі руху в повному складі враховані сили інерції рухомого навантаження.

Об'єкт дослідження – гнучкий трубопровід з потоком рідини, який розташований на пружній основі.

Мета роботи – вивчення впливу швидкості руху потоку рідини на власні частоти коливань та з'ясувати умови втрати стійкості трубопроводу на пружній основі.

Метод дослідження – виділення та наближеного дослідження одночастотних двохвильових коливних процесів в механічних системах з рухомим навантаженням.

На основі двохвильового представлення розв'язку, побудовані рівняння для визначення власних частот та ексцесів, якими визначаються деформації форм коливань в залежності від швидкості руху потоку рідини. Визначені три критичні швидкості рухомого навантаження, при яких система втрачає стійкість. Встановлено характер втрати стійкості для основного тону та відновлення коливного руху на вищих тонах коливань.

Результати статті можуть бути основою для подальшого розвитку прямих методів при побудові наближених розв'язків ускладнених динамічних систем.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – повне врахування сил інерції рухомого навантаження дає можливість якісно виявити основні характеристики динаміки конструкції з рухомим навантаженням.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГНУЧКИЙ ТРУБОПРОВІД, РУХОМЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ДВОХВИЛЬОВИЙ КОЛИВНИЙ ПРОЦЕС, ЧАСТОТА КОЛИВАНЬ, ЕКСЦЕС, КРИТИЧНА ШВИДКІСТЬ.

ABSTRACT

Kykot' S.V. Oscillations of a flexible conduit on an elastic foundation with moving fluid / Serhiy Kykot' // Visnyk NTU – K.: NTU . – 2012. – Vol. 26.

The paper considers oscillations of a flexible conduit with fluid flow, which is located on elastic foundation with pin jointed ends. The inertia forces in full of the moving load are taken into consideration in the mathematical model construction.

Object of study – a flexible conduit with fluid flow, which is located on an elastic foundation.

Purpose – investigation of influence of the fluid flow velocity on the natural-vibration frequencies and determination the conditions of loss of stability of the conduit on an elastic foundation.

Method of study is based on extraction and approximate investigation of one-frequency two-wave oscillation processes in mechanical structures with moving loads.

Based on two-wave representation of the solution, equations for determining the natural frequencies and excesses which define deformation of the oscillations forms depending on the velocity of the fluid flow are constructed. Three critical velocities of the fluid flow which lead to loss of the structure stability are obtained. The character of loss of stability for the basic tone and restore the oscillating motion at the higher tones of the oscillations is determined.

The results of the paper may be used for further developments of direct methods for constructing approximate solutions of complicated dynamic systems.

Forecast assumptions about the object of study – taking into consideration of the inertia forces of moving load in full gives an opportunity qualitatively reveal the basic characteristics of dynamics of a structure with a moving load.

KEY WORDS: FLEXIBLE CONDUIT, MOVING LOADING, DOUBLE WAVE OSCILLATION PROCESS, OSCILLATION FREQUENCY, EXCESSES, CRITICAL VELOCITY.

РЕФЕРАТ

Кикоть С. В. Колебания гибкого трубопровода на упругом основании с подвижной жидкостью. / Сергей Вячеславович Кикоть // Вестник НТУ. – НТУ. – 2012. – Вып. 26.

В статье рассмотрены колебания гибкого трубопровода с потоком жидкости, который расположен на упругом основании, с шарнирным закреплением концов. При построении математической модели движения в полном составе учтены силы инерции подвижной нагрузки.

Объект исследования – гибкий трубопровод с потоком жидкости, который расположен на упругом основании.

Цель работы – изучения влияния скорости движения потока жидкости на собственные частоты колебаний и выяснить условия потери устойчивости трубопровода на упругом основании.

Метод исследования – выделение и приближенного исследования одночастотных двухволновых колебательных процессов в механических системах с подвижной нагрузкой.

На основе двухволнового представления решения, построенные уравнения для определения собственных частот и эксцессов, которыми определяются деформации форм колебаний в зависимости от скорости движения потока жидкости. Определены три критические скорости подвижной нагрузки,

при которых система теряет устойчивость. Установлен характер потери устойчивости для основного тона и восстановления колебательного движения на высших тонах колебаний.

Результаты статьи могут быть основой для дальнейшего развития прямых методов при построении приближенных решений усложненных динамических систем.

Прогнозные предположения о развитии объекта исследования – полный учет сил инерции подвижной нагрузки позволяет качественно выяснить основные характеристики динамики конструкции с подвижной нагрузкой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИБКИЙ ТРУБОПРОВОД, ДВИЖУЩАЯСЬ НАГРУЗКА, ДВУХВОЛНОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС, ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ, ЭКСЦЕСС, КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ.

УДК 629 113.004.67

РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПОДАЧІ ФЛЮСУ ЗУСТРІЧНИМИ ПОТОКАМИ ПРИ БАГАТОЕЛЕКТРОДНОМУ БАГАТОДУГОВОМУ АВТОМАТИЧНОМУ НАПЛАВЛЕННІ

Ковальов М.Ф., кандидат технічних наук
Лодяков С.І., кандидат технічних наук

Широко відомий класичний метод зварювання і наплавлення під шаром флюсу має обмежене використання в виробництві при застосуванні багато - електродного та багато - дугового процесу, через наявність збирально-сепаруючої дії електромагнітних полів в зоні дугових розрядів. Це явище найбільш активне при збитковій масі флюсу, особливо в передній частині рідкої ванни, але завдяки дії електромагнітних сил, утворених на самому початку виникнення багато дугового розряду, в загальному плавильному просторі рідкий (розплавлений) шлак збирається до центру ванни, який досить швидко збільшується в об’ємі і шунтує не тільки електроди, а також і пристрої, які підводять струм. Шлак швидко спливає на поверхню створеної ванни, забираючи з собою розплавлені частинки електродної речовини.

Швидке перероджения електродугового процесу в електрошлаковий призводить до негативних явищ наслідком, яких є утворення потворних форм валиків, а також відсутня стабільність процесу наплавлення.

Не слід забувати також що, миттєве перероджения дугового процесу в електрошлаковий змушує уповільнювати швидкість зварювання (наплавлення), застосовувати спеціальні пристрої примусового формування наплавленого шару. Згадане явище обмежує використання методу зварювання (наплавлення) під шаром флюсу в машинобудуванні та ремонтному виробництві при виготовленні та відновленні працездатності деталей порівняно малих товщини і діаметрів.

Задача полягає в тому, щоб усунути негативний вплив ефекту перероджения електродугового процесу в електрошлаковий і тим самим забезпечити можливість вільного формування тонкого широкошарового валика за один прохід зварювальної головки вздовж вісі валика в процесі багато електродного багато дугового автоматичного наплавлення деталей відносно малої товщини і діаметра з використання флюсу, підвищити якість наплавлення і продуктивність праці.

На рис.1 представлена схема методу багато електродного багато дугового процесу наплавлення з подачею флюсу зустрічними потоками. Процес ведуть напіввідкритою дугою. Захист металу здійснюється тільки певною кількістю флюсу, що подається до електродних торців у безпосередній близькості до приелектродних активних плям дугових розрядів. Частинки флюсу під час зустрічі потоків 2, 3, 4, 5, взаємно гальмуються і прилипають до розігрітих ділянок електродів. Оплавлений флюс засмоктуючись дуговими розрядами у вигляді рідких крапель 8, які охоплюють краплі електродної речовини 7, рухається у напрямку рідкої ванни 11. У цій ванні (11) рідкі краплі металу (7) і краплі флюсу (8) змішуються з розплавленим основним металом і прореагувавши у вигляді рідкого металу (10) впливає на поверхню і застигає, утворюючи тонку шлакову корку (14), що покриває наплавлений шар (13). При цьому, флюсові потоки 2, 3, 4, 5 виконують функцію теплового екрану, який захищає механізм струмовідводу від перегріву і від розбризкування рідкого металу.

© Ковальов М.Ф., Лодяков С.І., 2012