

magnetic field / A.D. Razmyshljaev, M.V. Mironova // Avtomaticheskaya svarka. – 2008. – № 8. – P. 24-28.

Рецензент: В.А. Роянов  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.11.2012

УДК 669.018:620.178.167.001.5

©Малинов В.Л.\*

### ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА С МЕТАСТАБИЛЬНЫМ АУСТЕНИТОМ ПРИ АБРАЗИВНОМ И УДАРНО-АБРАЗИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Представлены результаты исследований износостойкости при абразивном и ударно-абразивном изнашивании и технологической прочности наплавленного металла, содержащего в качестве одной из основных структурных составляющих метастабильный аустенит. Полученные данные позволяют оптимизировать химический состав наплавленного металла.*

**Ключевые слова:** наплавленный металл, аустенит, мартенсит, карбиды, абразивная и ударно-абразивная износостойкость, коэффициент динамичности.

**Малинов В.Л.** *Зносостійкість наплавленого металу з метастабільним аустенітом при абразивному та ударно-абразивному впливі.* Наведені результати досліджень зносостійкості при абразивному і ударно-абразивному зношуванні та технологічної міцності металу, що містить у якості однієї із основної структурної складової метастабільний аустеніт. Отримані дані дозволяють оптимізувати хімічний склад наплавленого металу.

**Ключові слова:** наплавлений метал, аустеніт, мартенсит, карбіди, абразивна і ударно-абразивна зносостійкість, коефіцієнт динамічності.

**V.L. Malinov.** *Wear resistance of deposited metal with metastable austenite under abrasive and impact-abrasive action.* The research results of abrasive and impact-abrasive wear resistance and technological strength of deposited metal containing metastable austenite as major structural component are given. The obtained data make possible optimize deposited metal chemical composition.

**Keywords:** deposited metal, austenite, martensite, carbide, abrasive and impact-abrasive wear resistance, dynamic coefficient.

**Постановка проблемы.** Большое количество различных деталей машин и механизмов работает в условиях абразивного и ударно-абразивного воздействия, в результате чего они интенсивно изнашиваются. Это требует значительных затрат на их восстановление или замену. Одной из наиболее эффективных технологий упрочнения и восстановления деталей является электродуговая наплавка порошковыми электродами. Материалы, применяемые для наплавки, существенно отличаются по типу и степени легирования, а дорогие легирующие элементы зачастую используются неэффективно. Для предупреждения трещин в наплавленном металле применяется предварительный и сопутствующий подогрев, что требует затрат энергоносителей и затрудняет технологический процесс.

Наиболее эффективно задача ресурсосбережения решается за счет повышения долговечности при экономном легировании, путем получения для конкретных условий эксплуатации наиболее рационального структурно-фазового состояния наплавленного металла. Кроме того,

\* канд. техн. наук, доцент ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

сбережение энергоресурсов может быть достигнуто при повышении технологической прочности и снижении за счет этого температуры подогрева деталей.

Это делает необходимым использование системного подхода в изучении зависимостей износостойкости наплавленного металла в различных условиях абразивного и ударно-абразивного воздействия от химического состава и структурного состояния.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для наплавки деталей, работающих в сходных условиях изнашивания, применяются материалы, обеспечивающие получение в наплавленном слое сплавов, кардинально отличающихся по своему химическому составу и свойствам. Например, ПЛ-АН 101 (ПЛ-Нп-300Х25С4Н2Г2), ПП-АН 105 (90Г13Н4), ВСН-6 (110Х14В13Ф2), ЦНИИН-4 (65Х25Г13Н3) [1].

Износостойкость наплавленного металла существенно зависит от типа и количества карбидной фазы. Увеличение доли карбидов до оптимального количества повышает износостойкость, но сверх этого приводит к ее снижению из-за выкрашивания [2].

Метаустабильный аустенит, являясь вязкой составляющей металлической матрицы, обеспечивает лучшее по сравнению с мартенситом и ферритом удержание карбидов, и повышает стойкость к образованию и развитию трещин. Под воздействием абразива аустенит превращается в мартенсит деформации, резко увеличивая твердость поверхностного слоя. При этом значительная часть энергии внешнего воздействия расходуется на реализацию полиморфного превращения, а не на разрушение металла [3]. По мере увеличения интенсивности ударного воздействия для достижения наибольшей износостойкости необходимо повышать в структуре количество аустенита и его стабильность, соответственно они должны регулироваться применительно к конкретным условиям эксплуатации [4].

При наплавке износостойких сплавов существует риск образования горячих (кристаллизационных) трещин и холодных трещин, возникающих в твердом состоянии [1]. При сильных ударах трещины могут являться причиной отколов, поэтому существенным фактором при выборе наплавочных материалов является технологическая прочность – их способность выдерживать без разрушения воздействия технологического процесса.

В работе [5] для повышения износостойкости предлагается, применять комплексно легированные сплавы, армированные дисперсными карбидами высокой твердости (NbC, VC, TiC), и имеющие в составе металлической матрицы метастабильный аустенит. При этом отмечается позитивное влияние повышенной твердости карбидов, а также близости их кристаллического строения и аустенита, что обеспечивает лучшее их удерживание металлической матрицей. Получение дисперсных карбидов также обеспечивает измельчение первичной структуры наплавленного металла (модифицирование), что повышает стойкость против образования кристаллизационных трещин [1].

Данных об абразивной, ударно-абразивной износостойкости и технологической прочности наплавленного металла со структурой метастабильного аустенита, упрочненного карбидами, в литературе мало.

**Цель статьи** - исследовать абразивную и ударно-абразивную износостойкость, технологическую прочность наплавленного металла с метастабильным аустенитом для выбора рационального химического состава. Определить возможность повышения износостойкости наплавленного металла за счет высокого отпуска.

**Изложение основного материала.** Объектом исследований был наплавленный металл, полученный способом дуговой наплавки порошковыми лентами. Для опытных работ изготовляли однозамковые порошковые ленты сечением 3x10 мм с оболочкой из стали 08кп, имеющей толщину 0,3 мм. Сердечник состоял из смеси порошковых компонентов.

В состав шихты вводили в различных количествах марганец металлический, хром металлический, феррованадий, феррониобий, ферротитан и железный порошок. Во всех случаях в состав шихты вводилось небольшое количество ферротитана для измельчения зерна и упрочнения наплавленного металла за счет образования дисперсных карбидов и нитридов титана. Расчет состава шихты опытных порошковых лент выполнялся согласно методике, приведенной в работе [6]. Наплавку опытных образцов для испытания свойств и определения фазового состава выполняли в 3 слоя на пластины толщиной 30 мм из стали ВСтЗсп под флюсом АН-26 на режиме: сила тока 450-500 А, напряжение 30-32 В, скорость наплавки 25 м/ч.

Свойства наплавленного металла исследовали на образцах в исходном состоянии, а также

поле отпуска при 650 °С с выдержкой 1 час и последующим охлаждением на воздухе. Проводили дюрOMETрические, металлографические исследования. Количество упрочняющей фазы (карбидов или эвтектики) определялось в третьем наплавленном слое точечным методом при помощи окулярной сетки. Для оценки принималось среднее значение 5 измерений.

Химический анализ наплавленного металла выполнялся оптико-эмиссионным искровым спектрометром «Spectromax».

Фазовые составы наплавленного металла определяли методом рентгенофазового анализа с помощью дифрактометра ДРОН-4.

Для оценки условий ударно-абразивного воздействия применялся критерий, предложенный И.В. Петровым, "коэффициент динамичности" (Кд), определяемый, как отношение твердости образца из стали 110Г13Л после износа к его исходной твердости. Этот критерий основан на способности этой стали интенсивно наклепываться, накапливая энергию ударного воздействия [7].

Исследования износостойкости наплавленного металла проводили по двум различным схемам. При испытаниях по схеме 1 в соответствии с методикой стандарта ASTM G-65 определяли относительную износостойкость  $\epsilon_a$ . При этом между поверхностью резинового диска, вращающегося со скоростью 200 об/мин, и прижимаемого к нему с нагрузкой испытательного образца, подавался кварцевый песок, частицы которого захватывались диском и изнашивали образец. Относительную износостойкость  $\epsilon_a$  оценивали отношением весовых потерь образца и эталона - стали 45 в отожженном состоянии с твердостью ~200 НВ. Износ происходил вследствие процессов царапания, микрорезания, многократной местной пластической деформации [8]. Изнашивание происходит без ударных нагрузок, и, соответственно, характеризуется  $K_d \approx 1,0$ .

При испытаниях по схеме 2 испытания осуществляли по методике работы [9]. Испытательные образцы наплавки закрепляли на внутренней поверхности полого барабана диаметром 0,3 м. Перед испытанием емкость барабана на 25 % объема загружалась кусками абразивных корундовых кругов и стальными шарами диаметром 30-40 мм, составлявших 15 % в объеме загрузки. Скорость вращения барабана 46 об/мин. Время испытания 6 часов. Абразив заменялся через каждые 2 часа. В процессе испытаний происходит интенсивное деформирование поверхностного слоя в результате ударного воздействия, приводящее к его усталостному разрушению и выкрашиванию. Рабочая поверхность испытывает значительные ударные нагрузки, что характеризуется  $K_d = 2,2$ . Эталонами сравнения служили образцы из литой стали 110Г13Л. Относительную износостойкость  $\epsilon_{y-a}$  оценивали по формуле:

$$\epsilon_{y-a} = \frac{\Delta P_{эм} / S_{эм}}{\Delta P_{обр} / S_{обр}}, \quad (3)$$

где  $\Delta P_{эт}$ ,  $\Delta P_{обр}$  - потери веса эталона и образца, г;

$S_{эт}$ ,  $S_{обр}$  - площади изношенной поверхности эталона и образца, мм<sup>2</sup>.

Для сравнительной оценки технологической прочности наплавленного металла на пластины 250x70x20 мм осуществлялась опытная наплавка в три слоя с перекрытием валиков на 30 % их ширины по схеме 3-2-1. Наплавку последующего слоя выполняли после остывания предыдущего слоя до температуры  $\leq 250$  °С. После наплавки опытные образцы остывали на спокойном воздухе до комнатной температуры. Через 24 часа определялось количество трещин, образовавшихся на длине наплавки  $L = 200$  мм. В качестве показателя принималось среднее целое значение по результатам трех опытов (N).

**Анализ полученных результатов.** Химический состав металла, наплавленного опытными порошковыми лентами, а также содержание в нем аустенита, определенное методом рентгенофазового анализа, приведены в табл. 1.

Методом металлографического анализа в третьем наплавленном слое наплавленного металла ОП1 - ОП20 определены следующие типы структурного состояния:

- ОП1 - ОП5 – аустенитные стали, отличающиеся содержанием и типом карбидов (Fe, Me)<sub>3</sub>C, VC, TiC вследствие разного содержания карбидообразующих элементов, введенных для упрочнения и измельчения зерна, рис. 1, а.

- ОП8 – аустенитно-мартенситная сталь с содержанием мартенсита ~25 %;

- ОП6, ОП7, ОП9, ОП10 – ледебуритные стали с преимущественно аустенитной матрицей, в которых содержание эвтектики (Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> +  $\gamma$ ) варьируется от 10 до 50 %;

- ОП11 – доэвтектический хромомарганцевый чугун с аустенитной матрицей и содержанием эвтектики ( $Cr_7C_3 + \gamma$ ) ~70 %;
- ОП12 - ОП13 – эвтектические хромистые чугуны;
- ОП14 – заэвтектический высокохромистый никельсодержащий чугун, наплавленный лентой ПЛ-АН 101 для сравнения свойств;
- ОП15, ОП17, ОП18 – доэвтектические хромистые чугуны с дисперсными карбидами NbC и аустенитной матрицей. Содержание эвтектики - 40-80 %, рис. 1, б);
- ОП16 – доэвтектический хромованадиевый чугун с тройной эвтектикой ( $Cr_7C_3 + VC + \gamma$ ) и аустенитной матрицей. Содержание эвтектики ~35 %, рис. 1, в);
- ОП19, ОП20 – заэвтектические хромистые чугуны с карбидами NbC, рис. 1, г).

Таблица 1

Химический состав металла, наплавленного опытными порошковыми лентами

Наплавочный материал	Содержание химических элементов*, %					Количество аустенита, %
	C	Cr	Mn	Si	Другие	
ПЛ-Нп ОП1	1,14	-	13,33	0,47	0,14 % Ti	~100
ПЛ-Нп ОП2	1,12	-	10,26	0,51	0,12 % Ti	80-85
ПЛ-Нп ОП3	1,08	2,75	10,15	0,46	0,15 % Ti	90-95
ПЛ-Нп ОП4	1,05	2,86	10,22	0,49	0,75 % Ti	85-90
ПЛ-Нп ОП5	1,15	3,03	10,38	0,53	0,87% V; 0,13 % Ti	85-90
ПЛ-Нп ОП6	0,88	10,41	10,21	0,47	0,84 % V; 0,15 % Ti	70-75
ПЛ-Нп ОП7	1,13	10,24	10,33	0,58	0,92 % V; 0,16 % Ti	75-80
ПЛ-Нп ОП8	0,62	2,93	10,25	0,45	0,14 % Ti	65-70
ПЛ-Нп ОП9	1,67	12,83	6,38	0,71	0,14 % Ti	95-100
ПЛ-Нп ОП10	1,68	12,64	8,12	0,73	0,17 % Ti	~100
ПЛ-Нп ОП11	2,14	12,92	6,21	0,75	0,16 % Ti	95-100
ПЛ-Нп ОП12	2,75	12,77	6,46	0,78	0,13 % Ti	95-100
ПЛ-Нп ОП13	3,33	13,12	5,86	0,79	0,14 % Ti	95-100
ПЛ-Нп ОП14	2,89	24,63	1,83	3,45	1,64% Ni	~100
ПЛ-Нп ОП15	1,63	12,68	7,86	0,76	0,83 % Nb; 0,14 % Ti	90-95
ПЛ-Нп ОП16	1,65	12,89	8,05	0,79	0,95 % V; 0,13 % Ti	95-100
ПЛ-Нп ОП17	2,08	12,71	7,96	0,74	1,88 % Nb; 0,15 % Ti	90-95
ПЛ-Нп ОП18	2,71	12,83	8,15	0,77	1,82 % Nb; 0,17 % Ti	90-95
ПЛ-Нп ОП19	2,73	19,73	7,58	0,76	1,86 % Nb; 0,15 % Ti	95-100
ПЛ-Нп ОП20	3,36	20,12	7,67	0,72	1,95 % Nb; 0,16 % Ti	95-100

\* Содержание S ≤ 0,035 %, P ≤ 0,035 %.

В работе исследовали свойства наплавленного металла типа аустенитных и ледебуритных сталей с содержанием углерода до 1,2 % (ОП1-ОП8) Твердость HRC, количество трещин N и износостойкость при абразивном  $\epsilon_a$  и ударно-абразивном изнашивании  $\epsilon_{y-a}$  наплавленного металла ОП1-ОП8 приведены на рис. 2.

Наплавка металла ОП1, аналогичного по химическому составу широко применяемой в промышленности стали 110Г13Л, выявила его склонность образованию кристаллизационных «горячих» трещин (количество трещин составило N = 14) и низкую абразивную износостойкость  $\epsilon_a$ .

Уменьшение содержания марганца до 10 % в наплавленном металле ОП2, обеспечило повышение твердости и износостойкости при абразивном  $\epsilon_a$  и ударно-абразивном  $\epsilon_{y-a}$  изнашивании за счет уменьшения стабильности аустенита и реализации в поверхностном слое динамического деформационного мартенситного превращения (ДДМП) [10]. При этом количество трещин в наплавленном металле уменьшилось, но осталось большим (N = 10). Легирование

хромом в количестве  $\sim 3\%$ , наплавленного металла ОПЗ, позволило исключить образование горячих трещин и обеспечило увеличение износостойкости, при этом прирост абразивной износостойкости  $\epsilon_a$  больше, чем для ударно-абразивной  $\epsilon_{y-a}$ .

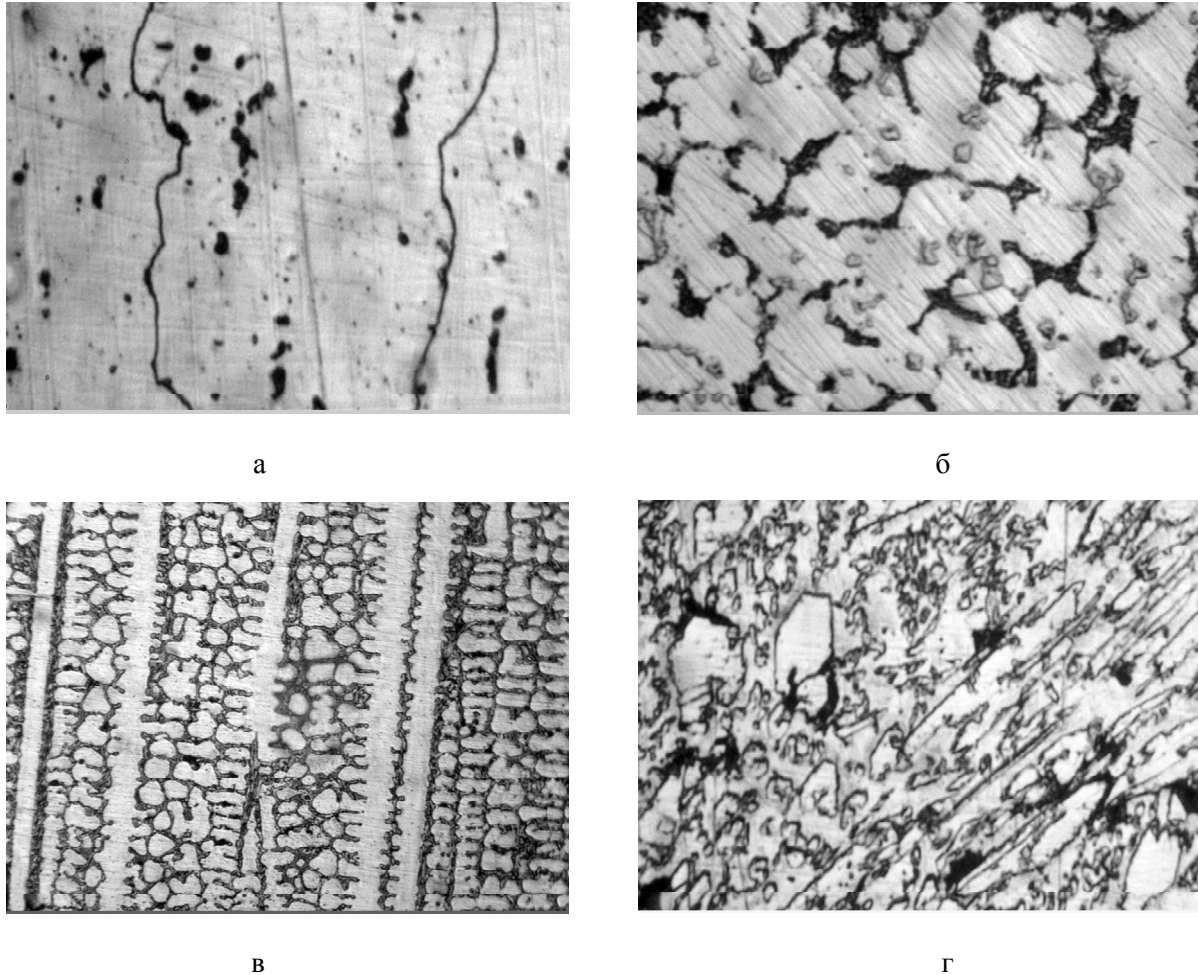


Рис. 1 - Микроструктура наплавленного металла, различного химического состава,  $\times 550$ : а – ОПЗ; б – ОП15; в – ОП16; г – ОП19

Сравнение свойств ОПЗ со свойствами наплавленного металла аналогичного состава, содержащего  $\sim 1\%$  Ti (ОП4) и  $\sim 1\%$  V (ОП5), показало, что дополнительное легирование сильными карбидообразующими элементами повышает твердость, абразивную  $\epsilon_a$  и ударно-абразивную износостойкость  $\epsilon_{y-a}$ . при этом легирование ванадием в сравнении с титаном обеспечило большее повышение износостойкости  $\epsilon_a$  и  $\epsilon_{y-a}$ .

Существенным фактором при выборе наплавочных материалов является их стоимость, определяемая себестоимостью компонентов, используемых для их изготовления. В порядке уменьшения стоимости ферросплавы элементов располагаются в следующем порядке: FeNb, FeV, FeTi. Ферротитан более чем в 3 раза дешевле, чем феррованадий, но при дуговом способе наплавки титан интенсивно окисляется и переходит в шлак. В зависимости от способа и режимов наплавки коэффициент усвоения титана составляет 0,25 - 0,36. При этом экономический эффект его применения сопоставим с использованием более дорогих феррованадия и феррониобия так, как коэффициенты усвоения, определенные при разработке опытных порошковых лент, составляют 0,8 - 0,95 для ванадия и 0,9 - 0,97 для ниобия.

Увеличение в наплавленном металле ОП6 количества хрома до  $\sim 10\%$ , в сравнении с ОП5, содержащем хрома  $\sim 3\%$ , обеспечивает увеличение твердости, абразивной  $\epsilon_a$  и ударно-абразивной износостойкости  $\epsilon_{y-a}$ . При этом в наплавленном слое опытного образца выявлено

наличие одной поперечной трещины, что обусловлено появлением по границам зерен хрупкой эвтектики, образовавшейся вследствие уменьшения максимальной растворимости углерода в аустените.

Уменьшение содержания углерода от ~1,1 % (ОП6) до ~0,9 % (ОП7) в составе наплавленного металла, содержащего ~10 % Cr, обеспечило отсутствие трещин. При этом твердость, абразивная  $\epsilon_a$  и ударно-абразивная  $\epsilon_{y-a}$  износостойкость уменьшаются, но превышают значения этих свойств в ОП5, содержащем ~1,1 % C и ~3 % Cr.

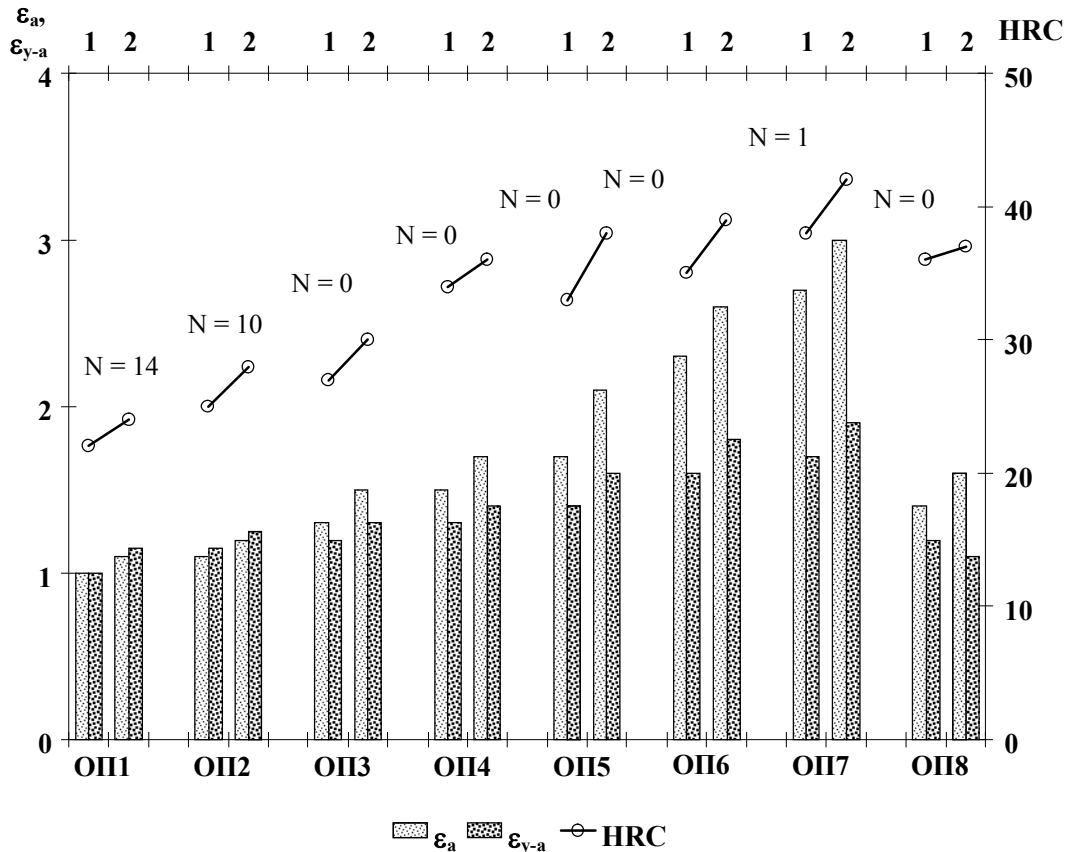


Рис. 2 - Количество трещин N и износостойкость при абразивном  $\epsilon_a$  и ударно-абразивном изнашивании  $\epsilon_{y-a}$  металла, наплавленного металла ОП1-ОП8: 1 – без отпуска; 2 – после отпуска при 650 °С (1 ч)

Твердость аустенитного наплавленного металла (например, ОП1) составляет 220-260 НВ, что в ряде случаев не достаточно так, как возможно изменение размеров деталей из-за смятия. По мере увеличения доли мартенсита в структуре наплавленного металла его твердость повышается, что можно обеспечить за счет уменьшения содержание углерода, являющегося наиболее сильным аустенитообразующим элементом. При этом в структуре также снижается количество карбидной фазы, что способствует повышению трещиностойкости.

В сравнении с наплавленным металлом ОП3, содержащем ~1,1 % углерода, уменьшение содержания углерода до ~0,6 % в ОП8 обеспечило наличие в структуре наряду с аустенитом ~25 % мартенсита и повышение твердости от 27 до 36 HRC. Наплавленный металл ОП8 превосходит по абразивной износостойкости  $\epsilon_a$  наплавки ОП1 - ОП3, что обусловлено активизацией ДДМП [10]. Уровень ударно-абразивной износостойкости  $\epsilon_{y-a}$  ОП8 близок к достигаемому стали 110Г13Л. Трещин в наплавленном металле ОП8 не обнаружено (N = 0).

Влияние отпуска при 650 °С (1 ч) на свойства наплавленного металла ОП1-ОП8 показано на рис. 2. Отпуск вызвал выделение карбидов из аустенита, что привело к его дестабилизации и активизации ДДМП [11]. Это обеспечило повышение твердости и абразивной износостойкости  $\epsilon_a$  в наплавленном металле ОП1 - ОП8. Ударно-абразивная износостойкость  $\epsilon_{y-a}$  возросла в тех случаях, когда в исходном состоянии после наплавки стабильность аустенита повышена

(ОП1 - ОП7), и снизилась, когда она мала (ОП8).

В работе исследовали свойства наплавленного металла типа чугунов на Fe-Cr-Mn-C основе с содержанием углерода 1,6-3,2 % (ОП9 - ОП13). Для сравнения свойств испытания проводили также на металле, наплавленном широко применяемой в промышленности порошковой лентой ПЛ-АН 101, - ОП14. Твердость HRC, количество трещин N, износостойкость при абразивном  $\epsilon_a$  и ударно-абразивном изнашивании  $\epsilon_{y-a}$  наплавленного металла ОП9 - ОП14 приведены на рис. 3.

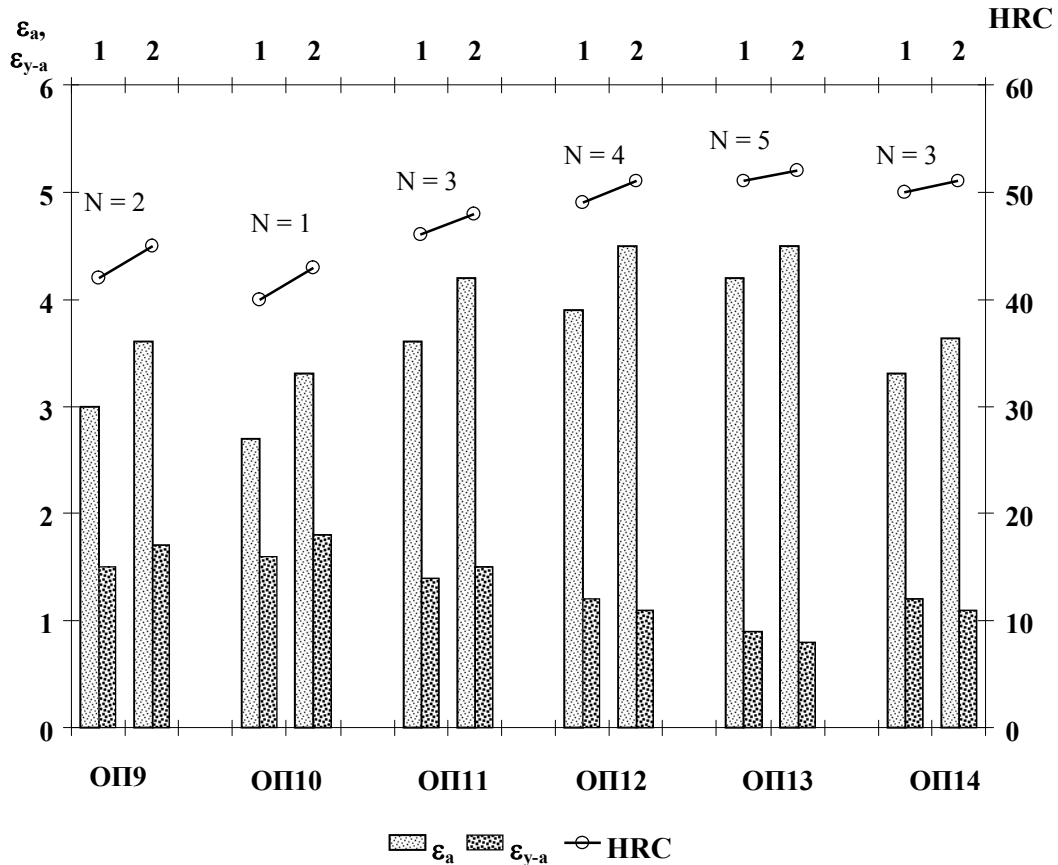


Рис. 3 - Количество трещин N и износостойкость при абразивном  $\epsilon_a$  и ударно-абразивном изнашивании  $\epsilon_{y-a}$  металла, наплавленного металла ОП9-ОП14: 1 – без отпуска; 2 – после отпуска при 650 °С (1 ч)

По мере увеличения количества углерода в наплавленном металле, содержащем ~13 % Cr и 6 % Mn (ОП9, ОП11, ОП12, ОП13), твердость HRC и абразивная износостойкость  $\epsilon_a$  возрастают, вследствие увеличения в структуре количества твердых фазы (эвтектики, первичных карбидов). Ударно-абразивная износостойкость при этом снижается, из-за охрупчивания наплавленного металла и выкрашивания.

Увеличение в наплавленном металле содержания марганца от 6 % (ОП9) до 8 % (ОП10), снижает абразивную  $\epsilon_a$  и повышает ударно-абразивную  $\epsilon_{y-a}$  износостойкость вследствие повышения стабильности аустенита [10].

Среди наплавленного металла ОП9-ОП14 наибольшей абразивной износостойкостью  $\epsilon_a$  обладает ОП13, а наибольшей ударно-абразивной износостойкостью  $\epsilon_{y-a}$  – ОП10. В сравнении с наплавкой ПЛ-АН 101 (ОП14) более высокой абразивной износостойкостью  $\epsilon_a$  обладают наплавленный металл ОП9, ОП11 - ОП13, а по ударно-абразивной износостойкости  $\epsilon_{y-a}$  его превосходят ОП9 - ОП12.

Испытания технологической прочности показали, что трещины имелись во всех образцах наплавленного металла ОП9 - ОП14. По мере увеличения содержания углерода в наплавленном металле ОП9 - ОП13 количество трещин N увеличивается от 2 до 5. Увеличение содержания

марганца от 6 % (ОП9) до 8 % (ОП10) уменьшило количество трещин от 2 до 1.

По технологической прочности наплавленный металл ОП9, ОП10 превосходят, а ОП12 не уступает металлу, наплавленному ПЛ-АН 101.

Влияние отпуска при 650 °С (1 ч) на свойства наплавленного металла ОП9 - ОП14 показано на рис. 3. После отпуска твердость и абразивная износостойкость  $\epsilon_a$  повысились во всех рассматриваемых составах наплавленного металла ОП9 - ОП14. Влияние отпуска на ударно-абразивную износостойкость  $\epsilon_{y-a}$  зависит от содержания в наплавленном металле углерода. В наплавленном металле ОП9-ОП11, содержащем углерода 1,6-2,1 %, ударно-абразивная износостойкость  $\epsilon_{y-a}$  после отпуска возрастает, а в ОП12-ОП14, содержащем более 2,7 % углерода, - снижается. В первом случае повышение износостойкости  $\epsilon_{y-a}$  обусловлено упрочнением и активизацией ДДМП. Во втором - снижение износостойкости происходит из-за чрезмерного охрупчивания наплавленного металла и выкрашивания.

В работе исследовалась влияние дополнительного легирования ванадием и ниобием на свойства наплавленного металла типа чугунов на Fe-Cr-Mn-C основе (ОП15-ОП20). Твердость HRC, количество трещин N на длине 200 мм, износостойкость при абразивном  $\epsilon_a$  и ударно-абразивном изнашивании  $\epsilon_{y-a}$  наплавленного металла ОП15-ОП20 приведены на рис. 4.

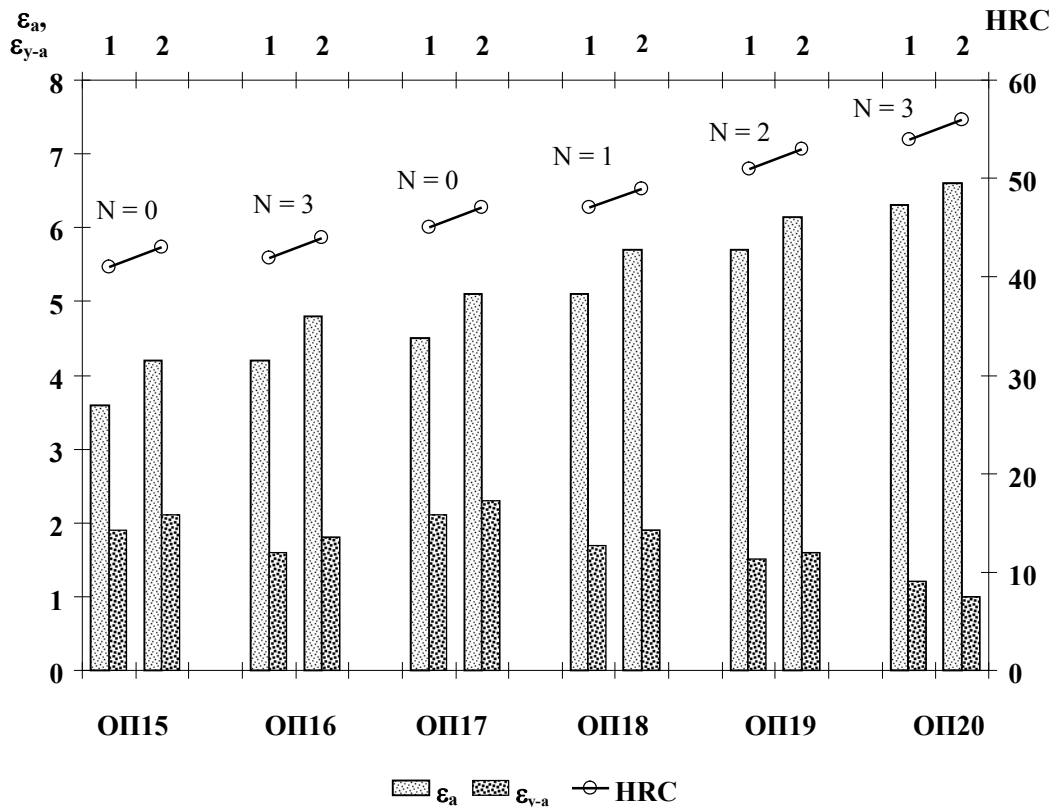


Рис. 4 - Количество трещин N и износостойкость при абразивном  $\epsilon_a$  и ударно-абразивном изнашивании  $\epsilon_{y-a}$  металла, наплавленного металла ОП15-ОП20: 1 – без отпуска; 2 – после отпуска при 650 °С (1 ч)

Дополнительное легирование ниобием или ванадием повышает твердость, абразивную  $\epsilon_a$  и ударно-абразивную  $\epsilon_{y-a}$  износостойкость наплавленного металла. Значения показателей этих свойств наплавленного металла ОП15, ОП16, дополнительно легированного, соответственно, ~1 % Nb и ~1 % V, выше, чем достигается в ОП10, имеющем аналогичный химический состав, но не содержащем этих элементов.

При легировании ниобием и ванадием в количествах ~1 % наблюдается различие в морфологии карбидной фазы. Карбиды ванадия входят в состав тройной эвтектики Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>+VC+ $\gamma$ , увеличивая ее количество в структуре наплавленного металла ОП16 (рис. 1, б), а ниобий формирует дисперсные карбиды в структуре ОП15 (рис. 1, в), армирующие матрицу и обеспечи-



вающие эффект модифицирования. Вследствие этого при легировании ~1 % Nb технологическая прочность повысилась, а при введении ~1 % V этого не было отмечено.

Сравнение свойств наплавленного металла ОП17 и ОП18, а также ОП19 и ОП20, отличающегося содержанием углерода, показало, что он повышает твердость HRC, абразивную  $\epsilon_a$ , и снижает ударно-абразивная износостойкость  $\epsilon_{y-a}$ , а также технологическую прочность, аналогично закономерности, установленной для наплавленного металла типа чугунов на Fe-Cr-Mn-C основе (рис. 3).

В наплавленном металле, содержащем ~2,7 % C, ~8 % Mn, и 2 % Nb, увеличение содержания от 13 % (ОП18) до 20 % Cr (ОП19) привело к переходу от доэвтектической к заэвтектической структуре, что обусловлено смещением влево точки предельной растворимости углерода в аустените. Это обеспечило повышение твердости HRC и абразивной износостойкости  $\epsilon_a$ , и снижение ударно-абразивная износостойкость  $\epsilon_{y-a}$ . По сравнению с наплавленным металлом ОП18, содержащем 13 % Cr, в ОП19, содержащим 20 % Cr, количество трещин увеличилось от N = 1 до N = 2.

Влияние отпуска при 650 °C (1 ч) на свойства наплавленного металла ОП15-ОП20 показано на рис. 4. После отпуска твердость и абразивная износостойкость  $\epsilon_a$  повысились во всех рассматриваемых ставах наплавленного металла ОП15-ОП20. Ударно-абразивная износостойкость  $\epsilon_{y-a}$  возросла в наплавленном металле ОП15-ОП19, содержащем углерода 1,8-2,7 %, и снизилась в ОП20, содержащем ~3,3 % C. Такая зависимость влияния отпуска на ударно-абразивную износостойкость  $\epsilon_{y-a}$  от содержания в наплавленном металле углерода аналогична, закономерности установленной для наплавленного металла типа чугунов на Fe-Cr-Mn-C основе, не содержащих ниобий.

Существенное значение при выборе наплавочного материала имеет его стоимость. На основании выбранного химического состава наплавленного металла необходимое количество компонентов в шихте соответствующей порошковой ленты, может быть рассчитано на основании методики работы [8]. Это позволяет определить стоимость компонентов, необходимых для изготовления порошковых лент, и оценить экономическую эффективность рассматриваемых вариантов.

В случае умеренной интенсивности ударов наличие трещин может быть допустимо, а при сильных ударах они являются причиной отколов. В табл. 2 приведены сравнительные данные об абразивной  $\epsilon_a$  и ударно-абразивной  $\epsilon_{y-a}$  износостойкости, а также стоимости компонентов тех порошковых лент, при наплавке которыми трещин в наплавленном металле отсутствовали.

Таблица 2

Сравнительные свойства наплавленного металла и относительная стоимость компонентов для изготовления соответствующих порошковых лент

№ п/п	Наплавочный материал	Твердость, HRC	Относительная износостойкость				Относительная стоимость материалов, $S_i / S_{max}$
			$\epsilon_a$	$\frac{\epsilon_{ai}}{\epsilon_{a_{max}}}$	$\epsilon_{y-a}$	$\frac{\epsilon_{y-ai}}{\epsilon_{y-a_{max}}}$	
1	ПЛ-Нп ОП3	27	1,3	0,29	1,2	0,57	0,38
2	ПЛ-Нп ОП4	34	1,5	0,33	1,3	0,62	0,44
3	ПЛ-Нп ОП5	33	1,7	0,38	1,4	0,67	0,47
4	ПЛ-Нп ОП6	35	2,3	0,51	1,6	0,76	0,78
5	ПЛ-Нп ОП8	36	1,4	0,31	1,2	0,57	0,37
6	ПЛ-Нп ОП15	41	3,6	0,80	1,9	0,90	0,90
7	ПЛ-Нп ОП17	45	4,5	1,00	2,1	1,00	1,00

Наиболее износостойким, но и наиболее дорогим, является наплавленный металл ОП17, содержащий 2 % Nb. При абразивном изнашивании он превосходит в 1,3 раза, а при ударно-абразивном – в 1,7 раза, металл, наплавленный широко применяемой порошковой лентой ПЛ-АН 101 (ОП14).

Наплавленный металл ОП15, содержащий 1 % Nb, уступает по износостойкости ОП17, но она остается высокой. При этом снижение ударно-абразивной износостойкости для ОП15 относительно ОП17 соизмеримо со снижением стоимости компонентов, необходимых для изготовления соответствующих порошковых лент (табл. 4).

Наплавленной металл ОП15, ОП17 за счет легирования ниобием обладает большей технологической прочностью, чем аналогичные ледебуритные стали на Fe-Cr-Mn-C основе. Это позволяет осуществлять наплавку с предварительным подогревом до более низких температур 200-250 °С, в сравнении с теми, что рекомендуются для ледебуритных сталей - 400-500 °С.

При наплавке деталей, работающих в условиях ударно-абразивного износа, применение наплавленного металла с содержанием углерода  $\leq 1,1$  % (ОП3-ОП5, ОП8), обеспечивает меньшую износостойкость, чем ОП15 и ОП17 (превосходя сталь 110Г13Л в 1,2-1,4 раза), - эти составы могут быть рекомендованы из соображений экономичности. Наплавка соответствующими порошковыми лентами осуществляется без предварительного подогрева.

Для наплавки деталей, работающих в условиях, где возможно изменение размеров из-за смятия, рационально использовать наплавленный металл ОП6, содержащий ~0,9 % C, ~10 % Cr, ~10 % Mn,  $\leq 1$  % V, или ОП8, содержащий ~0,6 % C, ~3 % Cr, ~10 % Mn, что обеспечивает твердость  $\geq 35$  HRC. Повышение твердости в ОП6 достигается за счет получения в структуре 10 % эвтектики и дисперсионного твердения при отпуске, а в ОП8 - за счет образования 20-30 % мартенсита наряду с аустенитом. Первый из этих составов (ОП6) обеспечивает более высокую износостойкость, последний (ОП8) - дешевле за счет экономного легирования.

При наплавке на малоуглеродистую сталь из-за разбавления основным металлом происходит увеличение количества мартенсита в структуре первого слоя, что приводит к охрупчиванию и отколам. Для предупреждения отколов при наплавке ледебуритных сталей обычно применяют наплавку подслоя хромоникелевыми материалами (Св-08Х10Н10ГБ и др.). Исследования, выполненные применительно рассмотренным в данной работе составам наплавленного металла, показали эффективность нанесения подслоя экономичной порошковой проволокой ПП-Нп 14Х12Г12СТ [12]. Наплавка ею исключает образование отколов и повышает износостойкость в сравнении с хромоникелевыми материалами, что обусловлено большим упрочнением аустенита, не содержащего никель.

### Выводы

1. Перспективным направлением в ресурсосбережении является разработка наплавочных материалов на хромомарганцевой основе, обеспечивающих получение в структуре наплавленного металла метастабильного аустенита, армированного карбидами Nb, V, Ti.
2. Среди исследованных составов наплавленного металла наиболее высокая ударно-абразивная износостойкость достигнута в наплавленном металле, содержащем (1,6-2,1) % C, ~13 % Cr, 8 % Mn и (1-2) % Nb. При этом наплавленный металл обладает ударно-абразивной износостойкостью в ~2 раза большей, чем сталь 110Г13Л, а в условиях абразивного воздействия износостойкость в 1,1-1,3 выше чем, достигаемая при наплавке ПЛ-АН 101 (270Х25Н2Г2С3). Легирование ниобием повышает не только износостойкость, но и технологическую прочность, что позволяет осуществлять наплавку с предварительным подогревом до более низких температур, чем применяемые.
3. Наплавленный металл, содержащий 1,1 % C, 3 % Cr, ~10 % Mn, дополнительно легированный  $\leq 1$  % Ti и/или  $\leq 1$  % V по износостойкости в условиях ударно-абразивного воздействия в 1,3-1,6, а при абразивном воздействии в 1,5-2,3 раза, превосходит сталь 110Г13Л, и может быть рекомендован для применения из соображений экономичности. Легирование наплавленного металла хромом 3 % повышает также технологическую прочность. Наплавка металла указанного состава может осуществляться без предварительного подогрева.
4. Для повышения сопротивления смятию твердость наплавленного металла с преимущественно аустенитной структурой может быть повышена за счет получения 10-15 % эвтектики и дисперсионного твердения при отпуске, что обеспечивается содержанием ~0,9 % C, ~10 % Cr, ~10 % Mn,  $\leq 1$  % V. Аналогичное повышение твердости может быть достигнуто за счет получения в структуре наряду с аустенитом до 20-30 % мартенсита, что реализуется в наплавленном металле, содержащем ~0,6 % C, ~3 % Cr, ~10 % Mn. Этот наплавленный металл является более экономичным, чем предыдущий.

**Список использованных источников:**

1. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин. – Харьков : Металлургиздат, 1961. – 422 с.
2. Лившиц Л.С. Основы легирования наплавленного металла / Л.С. Лившиц, Н.А. Гринберг, Э.Г. Куркумелли. – М. : Машиностроение, 1969. – 188 с.
3. Попов В.С. Износостойкость сталей и сплавов / В.С. Попов, И.Н. Брыков. – Запорожье : ИПК Запорожье, 1996. – 180 с.
4. Малинов В.Л. Экономнолегированные электродные материалы, обеспечивающие в наплавленном металле деформационное упрочнение при эксплуатации / В.Л. Малинов // Автомат. Сварка. – 2006. - № 8. – С. 29-32.
5. Попов В.С. Износостойкость прессформ огнеупорного производства / В.С. Попов, Н.Н. Брыков, Н.С. Дитриченко. - М. : Металлургия, 1971. – 169 с.
6. Малинов В.Л. Методика автоматизированного расчета порошковой ленты / В.Л. Малинов, В.В. Чигарев // Вестник Приазовского государственного технического университета : Сб. науч. тр. - Вып. 3. – Мариуполь, 1997. – С. 164-166.
7. Петров И.В. Испытание износостойких наплавленных сплавов // Сварочное производство. – 1968. - № 11. – С. 21-24.
8. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев. - К. : Екотехнологія, 2004. – 160 с.
9. Ефременко В.Г. Влияние фазового и структурного состояния сплавов на основе железа на износостойкость в условиях помола высокоабразивного материала / В.Г. Ефременко, Ф.К. Ткаченко, Т.А. Еременко // Вестник Приазовского государственного технического университета : Сб. науч. тр. - Вып. 13. – Мариуполь, 2003. – С. 113-118.
10. Малинов Л.С. Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии / Л.С. Малинов, В.Л. Малинов. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2007. - 352 с.
11. Малинов Л.С. Влияние старения на развитие мартенситного превращения при деформации в метастабильных аустенитных сталях / Л.С. Малинов, В.И. Коноп-Ляшко // Изв. АН СССР. Металлы. - 1982. - № 3. - С. 130-133.
12. Пат. України № 93302, МПК В23К 35/368. Порошковий дріт / Л.С. Малинов, В.Л. Малинов, А.А. Голякєвич, Л.Н. Орлов; Приазовський державний технічний університет; Заявлено 17.07.2009; Опубл. 25. 01. 2011, Бюл. №2.

**Bibliography:**

1. Frumin I.I. Automatic arc deposition / I.I. Frumin, - Kharkov : Metallurgizdat, 1961. – 422 p. (Rus).
2. Livshits L.S. Basics of weld metal alloying / L.S. Livshits, N.A. Greenberg, E.G. Kurkumelli. – Moscow : Mashinostroenie, 1969. - 188 p. (Rus.)
3. Popov, V.S. The wear resistance of steels and alloys / V.S. Popov, I.N. Brykov. – Zaporozhye : PPC Zaporozhye, 1996. – 180 p. (Rus.)
4. Malinov V.L. Economically alloying filler materials to ensure the deposited metal work hardening during operation / V.L. Malinov // Automatic welding. - 2006. - № 8. - P. 29-32. (Rus.)
5. Popov, V.S. Wear resistance of the die mold for manufacturing hearthstone / V.S. Popov, I.N. Brykov, N.S. Ditrichenko. – Moscow : Metallurgiya, 1971. - 169 p. (Rus.)
6. Malinov V.L. The method of automated calculation of flux-cored stripes / V.L. Malinov, V.V. Chigarev // Vestnik of Priazovsky State Technical University : Collection of scientific work. – № 3. - Mariupol, 1997. – P. 164-166 (Rus.)
7. Petrov I.V. Test of wearproof deposited alloys // Welding. - 1968. - № 11. - P. 21-24. (Rus.)
8. Ryabtsev I.A. Surfacing of machine and mechanisms parts / I.A. Ryabtsev. – Kiev : Ekotehnlogiya, 2004. - 160 p. (Rus.)
9. Efremenko V.G. Influence of phase and structural state of iron-based alloys for wear resistance in condition grinding high-abrasive material / V.G. Efremenko, F.K. Tkachenko, T.A. Eremenko // Vestnik of Priazovsky State Technical University : Collection of scientific work. – № 13. - Mariupol, 2003. - P. 113-118. (Rus.)
10. Malinov L.S. Economically alloyed alloys with martensite transformations and strengthening technologies / L.S. Malinov, V.L. Malinov. – Kharkov : NNC KPTI, 2007. - 352 p. (Rus.)

11. Malinov L.S. Influence of aging on development martensite transformations at deformation in metastable austenite steels / L.S. Malinov, V.I. Konop-Ljashko // Proceedings of the Academy of Sciences USSR. Metals. - 1982. - № 3. - P. 130-133. (Rus.)
12. Pat. Ukraine № 93302, МПК В23К 35/368. Flux-cored wire / L.S. Malinov, V.L. Malinov, A.A. Golyakenvich, L.N. Orlov; Priazovsky State Technical University; Claim 17.07.2009, Publ. 25.01.2011, Bull. № 2. (Ukr.)

Рецензент: С.В. Гулаков  
д-р техн. наук, проф. каф. МиТСП ГУВЗ «ПГТУ»

Статья поступила 30.04.2012

УДК 621.791.927.5

©Ковалевский А.И.<sup>1</sup>, Носовский Б.И.<sup>2</sup>

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В МЕХАНИЧЕСКИЕ  
С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
МЕХАНИЧЕСКОГО КОНТУРА**

*Для сварки в среде углекислого газа без коротких замыканий и разбрызгивания необходимо организовать принудительный перенос электродного металла. Для его осуществления разработан преобразователь электрических колебаний в механические. Для уточнения геометрических параметров преобразователя, резонансной частоты и амплитуды верхней ветви преобразователя разработана математическая модель, учитывающая влияние вынужденных колебаний.*

**Ключевые слова:** принудительный перенос, автоматическая, полуавтоматическая сварка в среде углекислого газа, резонансная частота колебаний, амплитуда.

*Ковалевський О.І., Носовський Б.І. Розробка математичної моделі вимушених коливань перетворювача електричних коливань на механічні. Для зварювання в середовищі вуглекислого газу без коротких замикань та розбризкування необхідно організувати примусове перенесення електродного металу. Для його здійснення розроблений перетворювач електричних коливань на механічні. Для уточнення геометричних параметрів перетворювача, резонансної частоти і амплітуди верхньої гілки перетворювача розроблено математичну модель, що враховує вплив вимушених коливань.*

**Ключові слова:** примусове перенесення, автоматичне, напівавтоматичне зварювання в середовищі вуглекислого газу, резонансна частота коливань, амплітуда.

**O.I. Kovalevsky, B.I. Nosovskiy. Development of mathematical model of forced vibration transducer electrical oscillations into mechanical.** For welding in carbon dioxide without faults and spraying is necessary to organize the forced transfer of electrode metal. Designed and made by the inverter electrical oscillations into mechanical. To clarify the geometric parameters of the converter, the resonant frequency and the amplitude of the upper branch of the converter developed a mathematical model that takes into account the effect of the induced oscillations.

**Keywords:** compulsory transfer, automatic, semiautomatic welding in carbon dioxide, the resonant frequency, amplitude.

<sup>1</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь