

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ТОКА НА СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКЕ

Исследованы структура и износостойкость металла, наплавленного индукционным способом при частотах 66 и 440 кГц. В качестве образцов использовали тонкие диски, изготовленные со стали Ст3 толщиной 3 мм, и шихту из флюса, смешанного с порошком сплава ПГ-С1. Микроструктура, металла наплавленного при частоте 66 кГц, представляет собой твердый раствор, в котором карбиды (Fe, Cr)7C3 расположены преимущественно веерообразно. Микроструктура металла, наплавленного при частоте 440 кГц, состоит из основы, представляющей собой твердый раствор и включения первичных карбидов типа (Fe, Cr)7C3, в основном, «карандашного» типа. В результате исследований установлено, что использование для индукционной наплавки промышленных генераторов ЛЗ-107 с частотой 66 кГц практически не изменяет микроструктуру, твердость и износостойкость наплавленного металла типа сормайт 1, что позволяет рекомендовать эти генераторы для промышленного применения при восстановлении и упрочнении различных деталей.

Ключевые слова: индукционная наплавка; высокочастотные ламповые генераторы; двухвитковый кольцевой индуктор; микроструктура; микротвердость; частота тока; износостойкость.

Введение

При индукционной наплавке с использованием шихты, состоящей из смеси флюса и порошков сплавов типа ПГ-С1 (сормайт 1), в основном, применяют ламповые генераторы частотой 440 кГц. В этом случае в массе металла детали индуцируются вторичные токи этой же частоты, распределяющиеся в поверхностном слое металла и нагревающие этот слой. При этом, чем выше частота тока, тем тоньше слой нагреваемого наплавленного металла. В присадочной шихте металлические гранулы изолированы друг от друга частицами флюса, вследствие чего электропроводность порошкового слоя и выделение в нем энергии малы. По этой причине нагрев и расплавление порошковой шихты идет, в основном, за счет теплопередачи от нагреваемого ТВЧ основного металла [1–5]. При этом температура плавления присадочного порошка должна быть меньше температуры плавления основного металла. Кроме того, использование высокочастотных генераторов для наплавки требует применения специальных мер санитарно-гигиенической защиты.

С другой стороны, известно [3], что для индукционной закалки в промышленности широко используют ламповые генераторы частотой 66 кГц, которые менее вредны с санитарно-гигиенической точки зрения.

Постановка задачи

Представляет интерес исследовать возможность использования генераторов частотой 66 кГц для индукционной наплавки. И целью данной работы является исследование структуры и свойств металла, наплавленного индукционным способом с использованием ламповых генераторов с этой частотой, и сравнение их с результатами индукционной наплавки с использованием генераторов с частотой 440 кГц.

Материалы и оборудование

Для проведения исследований были использованы фасонные диски толщиной 3 мм из стали Ст3, порошкообразный твердый сплав ПГ-С1, ламповые генераторы ВЧГ6-60/0,44 частотой 440 кГц и ЛЗ-107 частотой 66 кГц и двухвитковый кольцевой индуктор, витки которого имели прямоугольное поперечное сечение и обеспечивали одновременную наплавку дисков зубчатой формы по всей их рабочей поверхности (рис. 1, а, б) [6, 7]. Наплавку производили при постоянной удельной мощности W за время t . Параметры режимов наплавки для двух указанных генераторов представлены в табл. 1.

Параметры режимов индукционной наплавки

Марка генератора	Частота, кГц	Мощность, кВт	Напряжение на контуре, кВ	Анодное напряжение, кВ	Ток сетки лампы, А	Ток анода лампы, А	Время наплавки, с
ВЧГ6-60/0,44	440	60	5,4	8	1,2	6	32
ЛЗ-107	66	100	5,7	9	4	7	50

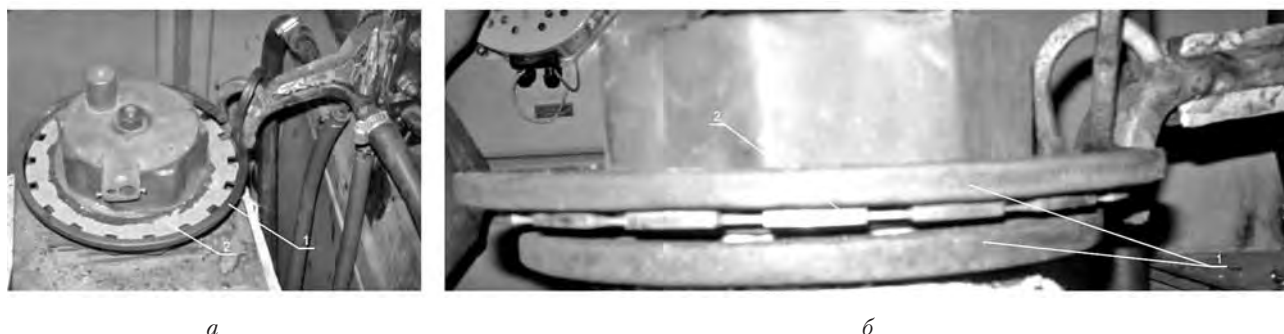


Рис. 1. Устройство для индукционной наплавки с двухвитковым кольцевым индуктором прямоугольного поперечного сечения: *a* – вид сверху; *б* – вид с боку; 1 – индуктор; 2 – наплавляемый диск.

Методика исследование

Изнаплавленных дисков вырезали образцы для исследования микроструктуры, распределения легирующих элементов и износостойкости наплавленного металла. Исследованиям подвергались образцы, наплавленные индукционным способом сплавом ПГ-С1 на основу из стали Ст3 с частотой 440 кГц (образец № 1) и с частотой 66 кГц (образец № 2).

Травление образцов производили поэтапно: электролитическим способом в 20 %-м растворе хромовой кислоты (напряжение 20 В и время выдержки 10 с) для выявления структуры наплавленного металла, а затем в 4 %-м растворе азотной кислоты осуществляли химическое травление металла основы.

Микроструктура наплавленного металла (образец № 1) состоит из основы, представляющей собой твердый раствор хрома, марганца, никеля и кремния в железе. В твердом растворе наблюдаются включения первичных карбидов типа $(Fe, Cr)_7C_3$ в виде крупных пластин «карандашного» типа, достигающие 100–135 мкм в длину, а также карбиды, имеющие гексагональную огранку, с размером грани 7–15 мкм с четкой границей сопряжения с матрицей (рис. 2, *a, б, в*).

Избыточные карбиды, как правило, располагаются в виде отдельных пластинчатых выделений в центральной части по ширине и толщине наплавленного металла. Прямоугольные и шестигранные выделения это карбиды различной дисперсности, часть из них избыточные пластинчатые карбиды,

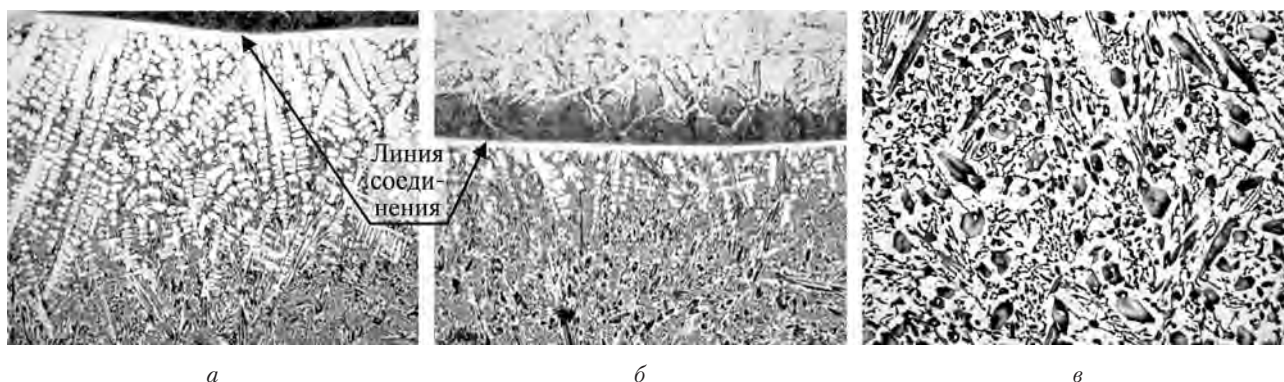


Рис. 2. Микроструктуры наплавленного металла образца № 1: *a* – центральная зона, $\times 200$; *б* – периферийная зона, $\times 150$; *в* – верхний слой наплавленного металла.

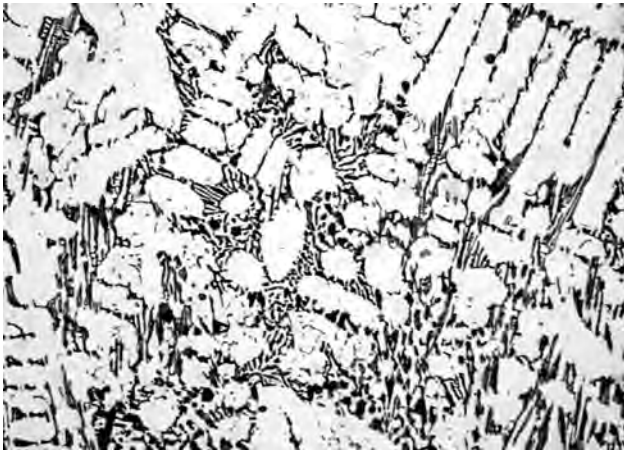


Рис. 3. Микроструктура наплавленного металла образца №1, у линии соединения (см. рис. 2, а), $\times 500$

достаточно равномерно распределенные в матрице. Микротвердость карбидов изменялась в пределах $HV_{0,5} = 11450 \dots 11710$ МПа.

Необходимо отметить наличие доэвтектической зоны вдоль линии сплавления, характеризующейся формированием дендритов твердого раствора с осями первого и второго порядка и карбидной эвтектики, кристаллизующейся в междендритном пространстве (рис. 3).

У линии сплавления с основным металлом в наплавленном металле образуется граничная белая полоска твердого раствора шириной $15 \dots 30$ мкм, с твердостью $HV_{0,5} = 2440 \dots 2570$ МПа.

Со стороны основного металла вдоль линии соединения имеется диффузионная зона шириной $60 \dots 80$ мкм, представляющая собой тонкопластинчатый перлит и феррит по границам зерен, иногда с

ориентацией по видманштетту (рис. 2, б). Эта зона имеет твердость $HV_3 = 2440 \dots 2690$ МПа. Микроструктура основного металла феррито-перлитная с преобладанием ферритной составляющей.

На рис. 4 приведена микроструктура образца № 2, наплавленного с использованием частоты тока 66 кГц. Микротвердость матрицы изменяется в пределах $HV_3 = 4540 \dots 5270$ МПа. В этом случае четко выраженной белой полоски вдоль линии сплавления не наблюдается (рис. 4, а), отсутствует также доэвтектическая зона и карбидная эвтектика (рис. 4, а, б).

Микротвердость структурных составляющих образцов № 1 и № 2 приведена в табл. 2.

По центру образца образуются зоны недостаточного перемешивания. На рис. 4, в видны скопления частиц, имеющих неправильную геометрическую форму сзакругленными краями. Средний размер таких частиц составляет $2,5 \dots 5,0$ мкм. По краям наплавки микроструктура представляет собой твердый раствор, в котором расположены карбиды $(Fe, Cr)_7C_3$ (преимущественно веерообразно) (рис. 4, б). Их твердость составляет $HV_{0,5} = 10950 \dots 11200$ МПа.

Были также проведены измерения твердости на твердомере «ЛЕСО» при нагрузке 3 Н от поверхности наплавленного металла через линию соединения в основной металл. В образце № 1 твердость наплавленного металла составляет $3080 \dots 3660$ МПа, основного металла у линии сплавления – 2690 МПа. В образце № 2 твердость наплавленного металла составляет $4540 \dots 5430$ МПа, основного металла у линии сплавления – 2230 МПа.

Разница в микроструктуре металла, наплавленного с использованием частоты 440 и 66 кГц, связа-

Таблица 2
Микротвердость структурных составляющих наплавленного металла типа ПГ-С1, МПа

№ образца	Карбиды хрома, $HV_{0,5}$	Матрица, HV_3	Белая полоска, $HV_{0,5}$
1	11450...11710	3080...3750	2440...2570
2	10950...11200	4540...5270	отсутствует

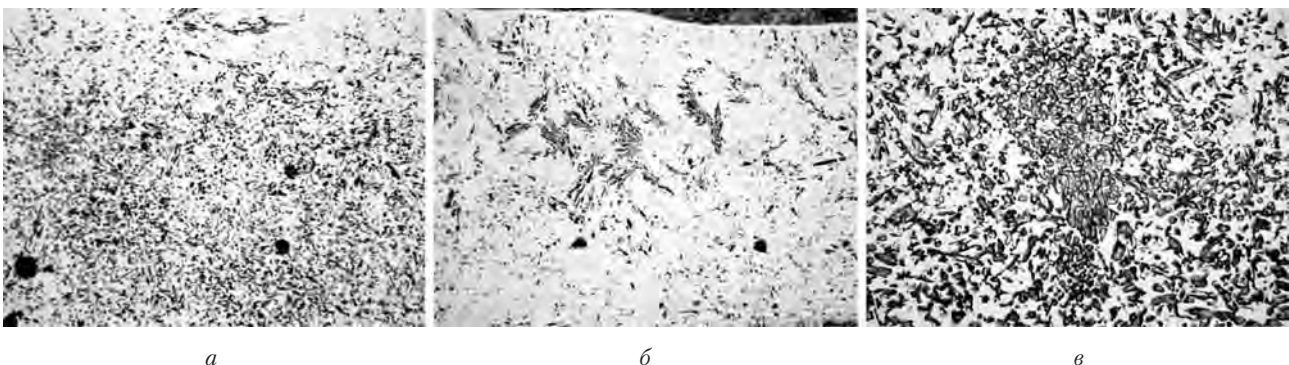


Рис. 4. Микроструктура наплавленного металла образца № 2 (66 кГц): а – центральная зона, $\times 150$; б – периферийная зона, $\times 150$; в – верхний слой наплавленного металла, $\times 500$.

ны, в основном, с глубиной прогрева основного металла, которая определяется по формуле [1]:

$$\delta_M = \frac{K}{\sqrt{f}} \text{ мм}, \quad (1)$$

где K – коэффициент, который зависит от состава основного металла; f – частота тока, Гц.

Так, при наплавке с частотой 440 кГц глубина прогрева составляет 0,86 мм, а при частоте 66 кГц – 2,4 мм. В последнем случае скорость охлаждения наплавленного металла при использовании специального приспособления для наплавки [6, 7] будет несколько выше, что препятствует росту карбидов в его структуре.

Было исследовано распределение углерода и хрома на границе соединения основного и наплавленного металла микроанализаторе САМЕВАХ модели SX-50 французской фирмы «Самеса» (рис. 5). Анализ проводили примерно в центре наплавленного слоя перпендикулярно линии сплавления на глубине 700 и 900 мкм от границы сплавления. Установлено, что в металле исследуемых образцов углерод связан в карбиды типа $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ и заметного

диффузионного перераспределения углерода и хрома у линии сплавления не наблюдалось.

Были проведены исследования износостойкости наплавленного металла образцов № 1 и № 2 при трении металла по металлу с прослойкой абразива на машине НК-М [8]. Условия испытаний были следующими: абразив – кварцевый песок с размером частиц 0,2...0,4 мм; путь трения 250 м; давление 0,466 МПа; эталон – отожженная сталь 45. Было установлено, что относительная износостойкость наплавленного металла образца № 1 составила 2,2, а образца № 2 – 2,5, т. е. она находится примерно на одном уровне.

Выводы

Таким образом, использование для индукционной наплавки промышленных генераторов ЛЗ-107 с частотой 66 кГц практически не изменяет микроструктуру, твердость и износостойкость наплавленного металла типа сормайт 1, что позволяет рекомендовать эти генераторы для промышленного применения при восстановлении и упрочнении различных деталей.

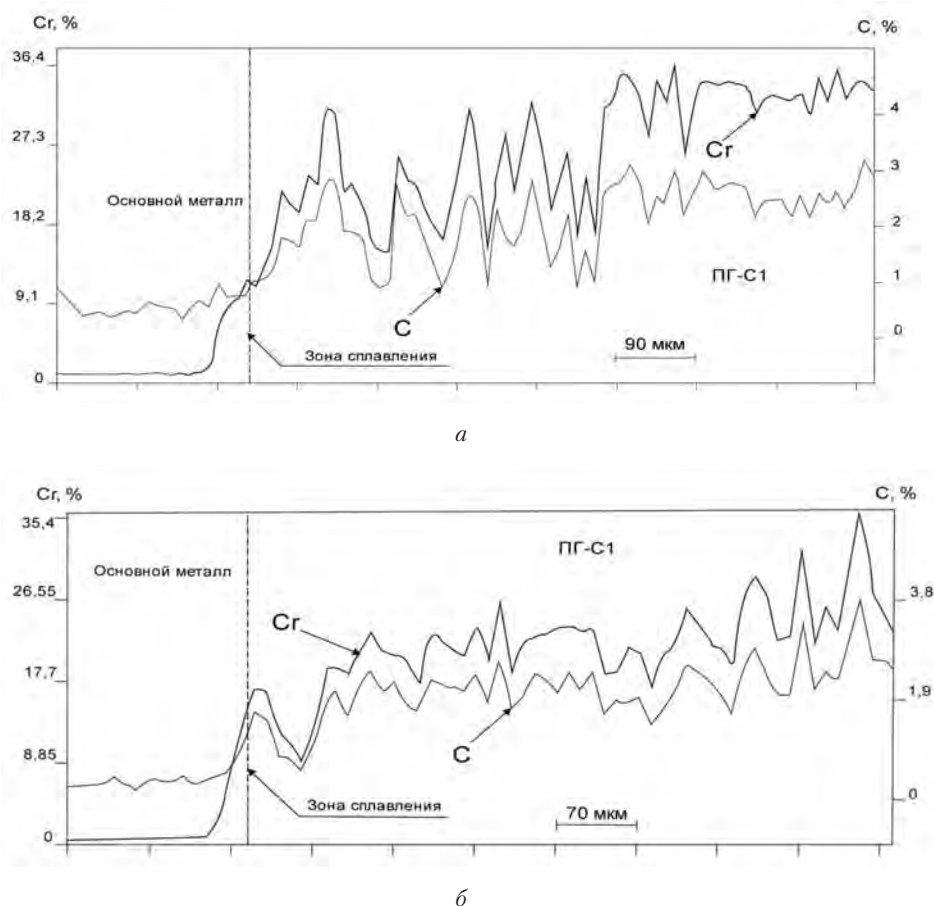


Рис. 5. Распределение легирующих элементов по толщине наплавленного металла в образцах № 1, № 2 при частотах: а – 440 кГц; б – 66 кГц.

Литература

- [1] Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин / В.Н. Ткачев. — М.: Машиностроение, 1971. — 264 с.
- [2] Рябцев И.А. Теория и практика наплавочных работ / И.А. Рябцев, И.К. Сенченков — К.: ЭкоТехнологія, 2013. — 400 с.
- [3] Слухоцкий А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е.Слухоцкий, С.Е. Рыскин. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
- [4] Иванайский В.В. Индукционная наплавка твердых сплавов на частоте 880 кГц / В.В. Иванайский, Н.Т. Кривочуров, М.Г. Желтунов, А.В. Коваль // Сварочное производство. — 2013. — № 5. — С. 41–43.
- [5] Зайченко Ю.А. Применение технологии индукционно-металлургической наплавки для повышения ресурса деталей подвижного состава / Ю.А. Зайченко, А.Ю. Мамыкина, А.Н. Ферапонтов // Сварочное производство. — 2013. — № 3. — С. 8–11.
- [6] Пулька Ч.В. Совершенствование оборудования и технологии индукционной наплавки / Ч.В. Пулька, В.Я. Гаврилюк, В.С. Сенчишин // Сварочное производство. — 2013. — № 4. — С. 27–30.
- [7] Розроблення енергоощадних нагрівальних систем для індукційного наплавлення деталей сільськогосподарських машин / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, В.С. Сенчишин, В.Я. Гаврилюк // Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя, № 4. — Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2011. — С. 107–120.
- [8] Юзвенко Ю. А. Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла / Ю.А. Юзвенко, В.А. Гавриш, В.А. Марьенко // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла — К.: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 23–27.

PulkaCh.V.¹, GavryliukV.Ya.¹, Senchyshyn V.S.¹, Gordan' G.N.²

¹ Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University. Ukraine, Ternopil

² The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Science of Ukraine. Ukraine, Kyiv

CURRENT FREQUENCY EFFECT ON THE PROPERTIES OF FUSED METAL UNDER INDUCTION SURFACING

The structure and wear resistance of metal fused by induction at frequency 66 and 440 kHz have been investigated. Thin disks, made of 3 mm thick Cm3 steel were used as specimens and flux charge mixed with the powder of ПГ-С1 alloy. The microstructure of metal fused at 66 kHz frequency is that of the solid solution, in which carbides (Fe,Cr)7C3 are mostly located fan-like. The microstructure of metal fused at 440 kHz consists of the base of the solid solution nature and inclusions of primary carbides of the (Fe,Cr)7C3 type, mainly of the "pencil-like" type. As the result of investigations it was found, that application of industrial generators of ЛЗ-107-type with the frequency 66 kHz for the induction surfacing does not affect the microstructure, hardness and wear resistance of the fused metal of the copmaim 1-type which makes possible to recommend these generators to be used in industry while recovering and strengthening of different parts.

Keywords: induction surfacing, high-frequency vacuum tube generators, two-wind ring inductor, microstructure, microhardness, current frequency, wear resistance.

References

- [1] Tkachev V.N. Iznos i povyshenie dolgovechnosti detalej selskoxozyajstvennyx mashin / V.N. Tkachev. — М.: Mashinostroenie, 1971. — 264 p. (In Russian).
- [2] Ryabcev I.A. Teoriya i praktika naplavochnyx rabot / I.A. Ryabcev, I.K. Senchenkov — К.: Ekotexnologiya, 2013. — 400 p. (In Russian).
- [3] Sluxockij A.E. Induktory dlya indukcionnogo nagreva / A.E. Sluxockij, S.E. Ryskin. — Л.: Energiya, 1974. — 264 p. (In Russian).
- [4] Ivanajskij V.V. Indukcionnaya naplavka tverdyx splavov na chastote 880 kHz / V.V. Ivanajskij, N.T. Krivochurov, M.G. Zheltunov, A.V. Koval // Svarochnoe proizvodstvo. — 2013. — № 5. — P. 41–43. (In Russian).



- [5] Zajchenko Yu.A. Primenenie tekhnologii indukcionno-metallurgicheskoy naplavki dlya povysheniya resursa detalej podvzhnogo sostava / Yu.A. Zajchenko, A.Yu. Mamykina, A.N. Ferapontov // Svarochnoeproduzvodstvo. — 2013. — № 3. — P. 8–11. (In Russian).
- [6] Pulka Ch.V. Sovershenstvovanie oborudovaniya i tekhnologii indukcionnoj naplavki / Ch.V. Pulka, V.Ya. Gavrilyuk, V.S. Senchishin // Svarochnoe produzvodstvo. — 2013. — № 4. — P. 27–30. (In Russian).
- [7] Rozroblennyya energooshhadnix nagrivalnix sistem dlya indukcionnogo naplavlennyya detalej silskogospodarskix mashin / O.M. Shabl'ij, Ch.V. Pulka, V.S. Senchishin, V.Ya. Gavrilyuk // Visnyk Ternopil'skogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu im. Ivana Pulyuyy, № 4. — Ternopil: TNTU im. Ivana Pulyuyy, 2011. — P. 107–120. (In Ukrainian).
- [8] Yuzvenko Yu. A. Laboratornyye ustanovki dlya ocenki iznosostojkosti naplavlennogo metalla / Yu.A. Yuzvenko, V.A. Gavrish, V.A. Marenko // Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy naplavki. Svoystva i ispytaniya naplavlennogo metalla — K.: IES im. E. O. Patona, 1979. — S. 23–27. (In Russian).

УДК 629.735.33.054.07:681.3.06

Prosvirin D.A.

ANTONOV, State-owned Enterprise. Ukraine, Kyiv

DEPLOYMENT OF MODEL-BASED DEVELOPMENT PROCESS OF SAFE APPLICATION SOFTWARE FOR SAFETY-CRITICAL AVIONICS SYSTEMS

This article deals with model based embedded software development of avionics systems within early field trial. Realization of air-borne equipment software requirements, regulated by functional safety standards is showed. This article explains how mentioned requirements can be obtained using SCADE. The possibility of mentioned approach practical application is showed. The possibility of documentation and qualified code generation from SCADE Display and SCADE Suite models is showed. Use of the mentioned approach allows to facilitate embedded software development and certification process for safety-critical avionics systems.

Keywords: model-based design, SCADE, code generation, software certification, executable specification, verification, documentation, DO-178B.

Introduction

The avionics industry requires that safety-critical software be assessed according to strict certification authority guidelines before it may be used on any commercial airliner. ARP 4754 and DO-178B/C are guidelines used both by the companies developing airborne equipment and by the certification authorities. Presently, numerous people play a role in defining and creating safety-critical systems for the avionics display industry. The function and architecture of a system are defined by system engineers using some informal notation for the graphics and the logic associated with the displays. The embedded production software is then specified textually and hand-coded by software engineers in the coding language augmented by a graphical library. In this context, search for new safety software development methods is important and actual task. These methods may help to reduce influence on the

final product of next factors: inexact understanding by executor of customer requirements; late mistakes detecting and as a result, expensive process of alteration; considerable cost of certification. Also mentioned methods shall include a technology of qualified code generation from formal models that may carry strong Return On Investment (ROI), while preserving the safety of the application.

Problem Formulation

Today aviation companies gradually come to model-based embedded software development process for avionics systems. So, search for new applications which support a model-based development paradigm is a relevant task. This article deals with the approach description through a software model, including the graphics and the associated logic, and to automatically generate the code from this model using a qualified code genera-