

## СВОЙСТВА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ СПОСОБОМ ДВУМЯ ЛЕНТАМИ

А. А. БАБИНЕЦ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

При наплавке коррозионностойкого слоя на детали энергетического и химического оборудования часто возникает необходимость получения заданного химического состава и свойств наплавленного металла уже в первом слое. Исследовано влияние тока, напряжения и скорости наплавки, а также величины зазора между лентами на стабильность электрошлакового процесса, геометрические размеры наплавленных валиков и долю основного металла в наплавленном. Определена область режимов наплавки двумя нержавеющими лентами сечением 0,5×60 мм, при которых наблюдается устойчивый электрошлаковый процесс с хорошим формированием наплавленного и минимальным проплавлением основного металла в пределах 7...9 %:  $I_{\text{н}} = 1400 \dots 1500 \text{ А}$ ;  $U_{\text{н}} = 32 \dots 33 \text{ В}$ ;  $v_{\text{н}} = 14 \dots 17 \text{ м/час}$ ; зазор между лентами — 16 мм. Механические свойства металла, наплавленного на этих режимах лентами ESAB OK Band 309LNb ESW и Св-08X19Н10Г2Б под флюсом ESAB OK 10.10, находятся на достаточно высоком уровне и отвечают предъявляемым к ним требованиям. Полученные результаты могут быть использованы при выборе или разработке материалов и технологий антикоррозионной наплавки деталей энергетического и химического оборудования. Библиогр. 11, табл. 4, рис. 5.

*Ключевые слова:* электрошлаковая наплавка, наплавленный металл, электродная лента, биметалл, коррозионностойкий слой, режимы наплавки, механические свойства

Для защиты от коррозии деталей энергетического и химического оборудования широко используется электродуговая наплавка высоколегированного металла на низкоуглеродистую сталь, выполняемая под слоем флюса [1, 2]. В основном наплавка осуществляется одной электродной лентой толщиной 0,5...0,8 и шириной 50...70 мм, что в зависимости от режимов наплавки обеспечивает производительность 10...35 кг/ч [2]. Так как доля основного металла (ДОМ) в наплавленном составляет 15...25 %, то для обеспечения необходимого химического состава коррозионностойкого слоя необходимо наплавлять два и более слоев, что может привести к накоплению микродефектов, повышению уровня остаточных напряжений, химической и структурной неоднородности [3]. В сложных условиях эксплуатации эти факторы могут негативно повлиять на стойкость наплавленного металла против образования и развития горячих трещин и межкристаллитной коррозии, что негативно скажется на долговечности деталей [4].

Одним из путей решения данной проблемы является использование способов и материалов для наплавки, которые бы обеспечили минимальное проплавление основного металла. Одним из таких способов является электрошлаковая наплавка двумя лентами, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона. По некоторым данным [5–7] этот способ позволяет получить необходимый химический состав наплавленного металла уже в первом слое, что особенно важно при получении биметалличе-

ских изделий путем наплавки высоколегированных аустенитных сталей на обычную конструкционную сталь. При этом коррозионностойкий слой должен также обладать необходимыми механическими свойствами: достаточной прочностью, высокой пластичностью и ударной вязкостью.

Цель данной работы — исследовать влияние тока, напряжения и скорости наплавки, а также величины зазора между электродными лентами на стабильность электрошлакового процесса, геометрические размеры наплавленных валиков и долю основного металла в наплавленном.

Схема процесса электрошлаковой наплавки двумя лентами показана на рис. 1. Процесс происходит в следующей последовательности: в сварочную головку с одинаковой скоростью подаются две электродные ленты. Ток подводится осуществляется через медную вставку, расположенную между лентами и, таким образом, задающую определенный зазор. Защита зоны наплавки от атмосферы осуществляется электропроводным флюсом. При наплавке в первый момент времени между электродом и изделием возникает дуга, которая оплавляет края ленты, способствует расплавлению флюса и образованию шлаковой ванны, шунтирующей дугу. Далее дуговой процесс переходит в шлаковый, так как ток начинает протекать через расплавленный электропроводный шлак. Нагрев и плавление лент происходит за счет теплопередачи от расплавленного шлака.

Основными факторами, влияющими на устойчивость электрошлакового процесса, являются

Таблица 1. Химический состав лент для антикоррозионной наплавки и объемная доля δ-феррита в соответствующем наплавленном металле [6–10]

Марка ленты	Массовая доля элементов, %						Объемная доля δ-феррита, %
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Другие	
Св-03Х22Н11Г2Б	≤0,03	1,7	0,4	22,0	11,0	1,0 Nb	7-9
Св-08Х19Н10Г2Б	0,09	1,8	0,4	20,0	10,4	1,3 Nb	2-8
Нп-02Х22Н11Г	≤0,02	1,5	0,4	22,0	11,0	-	2-6
ЛС-02Х21Н12Г	≤0,02	1,2	0,4	21,0	11,5	-	2-8
ЛС-02Х21Н12Г2Б	≤0,02	1,7	0,4	21,0	11,5	0,3 Nb	2-8
ESAB OK Band 309L ESW	0,015	1...2,5	≤0,5	21,0...22,0	10,0...12,0	-	4-5
ESAB OK Band 309LМо ESW	- « -	- « -	≤0,4	19,5...21,5	13,0...14,0	2,8...3,3 Мо	- « -
ESAB OK Band 309LNb ESW	- « -	- « -	≤0,4	20,0...22,0	11,0...13,0	0,4...0,8 Nb	- « -

Таблица 2. Химический состав флюсов для антикоррозионной электрошлаковой наплавки [6–10]

Марка флюса	Массовая доля компонентов, %						
	SiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	FeO	Прочие
АН-72	8,0	1,0	30,0	20,0	30,0	≤2,0	10ZrO <sub>2</sub>
АН-90	27,0*	-	23,5	10,5	39,0	-	-
ESAB OK 10.10	8,0*	-	-	25,0	63,0	-	-
ESAB OK 10.14	10,0*	-	-	20,0	70,0	-	-

\* SiO<sub>2</sub> + MgO

Таблица 3. Химический состав металла, наплавленного электрошлаковым способом двумя лентами марки ESAB OK Band 309LNb ESW

Количество наплавленных слоев	Массовая доля элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Nb	S	P
1 слой	0,014	1,43	0,67	22,7	12,5	0,59	0,005	0,017
2 слоя	0,017	1,47	0,65	22,4	12,4	0,63	0,005	0,017
3 слоя	0,017	1,42	0,70	23,1	12,8	0,58	0,007	0,019

составы лент и флюсов, режимы наплавки и величина зазора между лентами [5]. Для антикоррозионной наплавки в настоящее время разработано большое количество наплавочных материалов. В качестве электродных материалов, в основном,

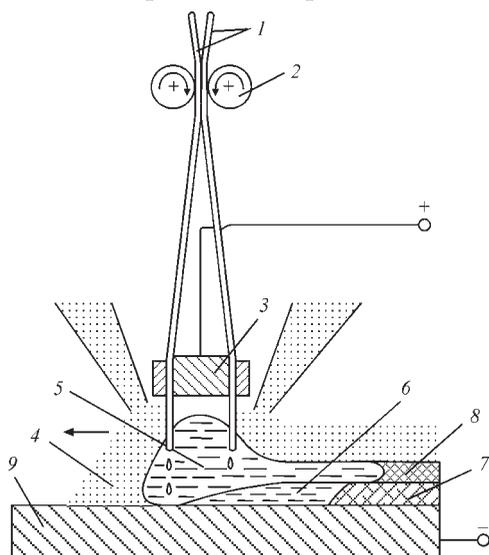


Рис. 1. Схема электрошлаковой наплавки двумя лентами [4]: 1 — электродные ленты; 2 — подающие ролики; 3 — медная вставка; 4 — шлак (флюс); 5 — шлаковая ванна; 6 — металлическая ванна; 7 — наплавленный металл; 8 — шлаковая корка; 9 — заготовка

применяются холоднокатаные, порошковые и спеченные ленты марок Св-08Х-19Н10Г2Б, Нп-02Х22Н11Г, ЛС-02Х-21Н12Г2Б, ESAB OK Band 309L ESW, ESAB OK Band 309LNb ESW и др., а также флюсы марок АН-72, АН-90, ESAB OK 10.10, ESAB OK 10.14 и др. [5, 8–10].

При этом состав флюса оказывает большое влияние на качество наплавленного металла [7, 8]. В первую очередь флюс должен иметь высокую вязкость и быть достаточно «длинным», чтобы хорошо формировать наплавленный металл. Кроме того, флюс должен обладать достаточным электросопротивлением, которое обеспечивает выделение необходимого количества тепла в шлаковой ванне, тем самым увеличивая нагрев электродных лент и повышая производительность процесса наплавки. Химический состав некоторых антикоррозионных холоднокатаных и спеченных наплавочных лент приведен в табл. 1 и 2 [6–10]. Присутствие определенного количества δ-феррита в аустенитном наплавленном металле обеспечивает его высокую стойкость против образования трещин [11].

В данной работе в экспериментах использовали ленту ESAB OK Band 309LNb ESW сечением 0,5×60 мм и флюс ESAB OK Flux 10.10. Для сравнения в некоторых экспериментах использовалась также лента Св-08Х19Н10Г2Б такого же сечения. Наплавка выполнялась на заготовки из Ст3 размерами 200×100×30 мм, значения тока и напряжения изменялись в пределах 1200...1600 А и 25...38 В соответственно. Скорость наплавки варьировалась в пределах 10...30 м/ч, а зазор между лентами — 8...20 мм, вылет лент оставался неизменным и составлял 35 мм.

После наплавки проводился послойный спектральный анализ химического состава наплавленного металла, результаты которого приведены в табл. 3. Анализ данных, приведенных в табл. 1 и 3, показывает, что при электрошлаковой наплавке

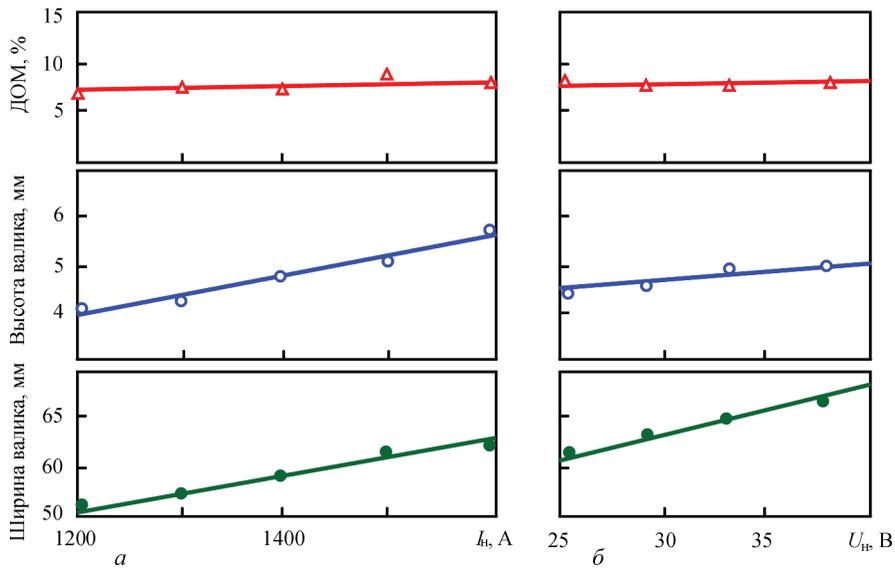


Рис. 2. Влияние тока  $I_n$  (а) и напряжения  $U_n$  (б) наплавки на геометрические размеры наплавленного валика и долю основного металла

двумя лентами заданный химический состав достигается уже в первом наплавленном слое.

Исследовали влияние тока, напряжения и скорости наплавки, а также зазора между лентами на стабильность электрошлакового процесса, геометрические размеры и ДОМ. Было установлено, что геометрические размеры наплавленного валика практически прямо пропорционально зависят от величины тока и напряжения наплавки, однако величина ДОМ при этом остается практически неизменной (рис. 2). Это объясняется тем, что при электрошлаковом процессе отсутствует прямое воздействие дуги на основной металл, поэтому увеличение электрической мощности в основном влияет только на увеличение количества наплавленного металла.

Большее влияние на ДОМ оказывает скорость наплавки, а также величина зазора между лентами (рис. 3). Скорость наплавки определяет продолжительность теплового воздействия шлаковой ванны на основной металл, а величина зазора существенно влияет на стабильность  $N$  протекания самого электрошлакового процесса. Стабильность определяли по осциллограммам как отношение продолжительности периодов электрошлакового и дугового процессов за определенное время. При небольшой величине зазора происходит перегрев шлаковой ванны между лентами, наблюдается непостоянный шлаково-дуговой процесс, в связи с чем увеличивается проплавление основного металла и ухудшается его формирование. С увеличением зазора площадь зеркала шлаковой ван-

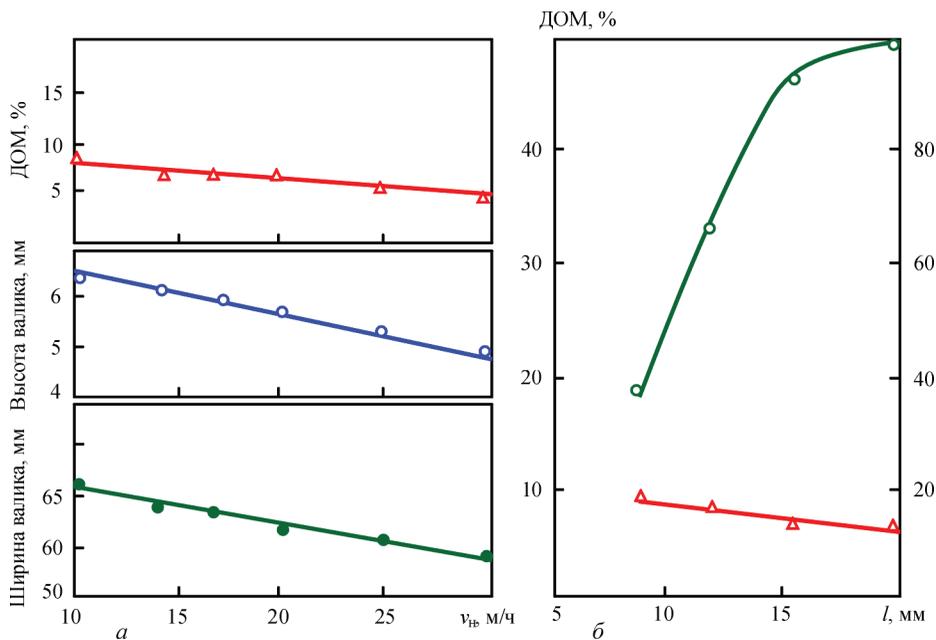


Рис. 3. Влияние скорости наплавки  $v_n$  (а) и зазора между лентами  $l$  (б) на геометрические размеры наплавленного валика, стабильность процесса  $N$  и долю основного металла



Рис. 4. Влияние величины зазора между лентами  $l$  на стабильность электрошлакового процесса:  $a — l = 8$  мм;  $b — l = 16$  мм. Режим наплавки:  $I_n = 1200...1300$  А;  $U_n = 32...33$  В;  $v_n = 14$  м/ч

Таблица 4. Механические свойства наплавленного металла при 20 °С

Наплавленный металл	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
309LNb	504...506	286...297	44,0...49,0	64,0...69,7
08X19H10Г2Б	523...588	295...314	24,0...28,0	52,0...55,0

ны увеличивается, температура ванны снижается и стабильность электрошлакового процесса улучшается (рис. 3, б). Из рис. 4 видно, что при ширине зазора 16 мм, наплавленный валик имеет более ровные края и гладкую поверхность, чем валик, полученный на таком же режиме, но при ширине зазора 8 мм.

Было установлено, что устойчивый электрошлаковый процесс при использовании лент сечением 0,5×60 мм достигается при следующих параметрах режима наплавки:  $I_n = 1400...1500$  А;  $U_n = 32...33$  В;  $v_n = 14...17$  м/ч; зазор между лентами — 16 мм. Металлографические исследования показали, что образцы, наплавленные на указанных режимах, характеризуются хорошим формированием наплавленного и минимальным проплавлением основного металла в пределах 7...9 % (рис. 5). При этом граница сплавления наплавленного и основного металла достаточно ровная, что положительно сказывается на прочностных свойствах полученного соединения.

Для определения механических свойств наплавленного металла была произведена многослойная наплавка по указанному выше режиму. Общая толщина наплавленного металла составила 16 мм, ширина — 62...65 мм. Из наплавленной заготовки были вырезаны образцы для проведения механических испытаний. Механические свойства исследуемого наплавленного металла определяли

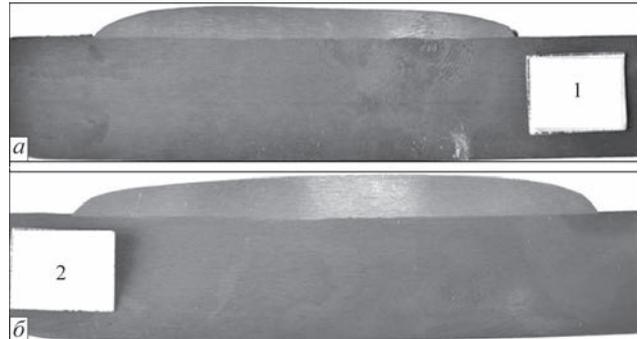


Рис. 5. Макрошлифы образцов, наплавленных на двух режимах:  $a — I_n = 1400$  А (ДОМ = 7 %);  $b — I_n = 1500$  А (ДОМ = 9 %);  $U_n = 32...33$  В;  $v_n = 12$  м/ч;  $l = 16$  мм

при температуре 20 °С в исходном состоянии путем испытаний на растяжение образцов по ГОСТ 6996–66, результаты которых приведены в табл. 4. Для сравнения там же приведены механические свойства металла, наплавленного электрошлаковым способом двумя лентами широко применяемой марки Св-08Х19Н10Г2Б.

Результаты испытаний показывают, что прочностные характеристики металла, наплавленного лентами ESAB OK Band 309LNb ESW и Св-08Х19Н10Г2Б, находятся на достаточно высоком уровне и отвечают предъявляемым к ним требованиям. Полученные результаты могут быть использованы при выборе или разработке материалов и технологий антикоррозионной наплавки деталей энергетического и химического оборудования.

### Выводы

1. Определена область режимов наплавки двумя нержавеющей лентами сечением 0,5×60 мм, при которых достигается устойчивый электрошлаковый процесс с хорошим формированием наплавленного и минимальным проплавлением основного металла в пределах 7...9 %:  $I_n = 1400...1500$  А;  $U_n = 32...33$  В;  $v_n = 14...17$  м/ч; зазор между лентами — 16 мм.

2. Механические свойства металла, наплавленного электрошлаковым способом лентами ESAB OK Band 309LNb ESW и Св-08Х19Н10Г2Б под флюсом ESAB OK 10.10, находятся на достаточно высоком уровне и отвечают предъявляемым к ним требованиям.

1. Кравцов Т. Г. Электродуговая наплавка электродной лентой / Т.Г. Кравцов. – М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.
2. Рябцев И. А. Высокопроизводительная широкослойная наплавка электродными проволоками и лентами: Обзор / И. А. Рябцев. // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – С. 36–41.
3. Иванов В. П. Влияние технологии наплавки и термообработки на структуру и свойства металла, наплавленного ленточным электродом ЛН-02Х25Н22АГ4М2 на углеро-

- дистую сталь / В. П. Иванов, В. Ю. Иващенко // Автоматическая сварка. – 2011. – № 8. – С. 9–11.
4. Фетисов Г. П. Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман. – М.: Высшая школа, 2001. – 639 с.
  5. Разработка процесса и исследование некоторых технологических особенностей электрошлаковой наплавки лентами / И. И. Фрумин, В. К. Каленский, Ю. А. Панчишин и др. // Теоретические и технологические основы наплавки. Новые процессы механизированной наплавки: [сб. ст.]. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1977. – С. 83–88.
  6. Применение электрошлаковой наплавки спеченными лентами для изготовления двухслойных листовых заготовок / В. К. Каленский, Ю. А. Панчишин, С. Я. Шехтери др. // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла: [сб. ст.]. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. – С. 89–92.
  7. Исследование процесса электрошлаковой антикоррозионной наплавки двумя ленточными электродами / В. А. Игнатов, В. В. Мурзин, Э. А. Рохлин и др. // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла: [сб. ст.]. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. – С. 101–106.
  8. Буга В. М. Разработка флюса и исследование свойств наплавленного металла применительно к однопроходной наплавке никельхромового сплава / В. М. Буга // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочные материалы: [сб. ст.]. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1978. – С. 95–96.
  9. Каленский В. К. Об эффективности антикоррозионной наплавки электродными лентами / В. К. Каленский, Ю. А. Панчишин // Наплавка. Опыт и эффективность применения: [сб. ст.]. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. – С. 35–40.
  10. Производство оборудования и расходных материалов для сварки и резки [электронный ресурс]: сайт концерна ESAB. – Режим доступа: <http://www.esab.com/>
  11. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением: монография / Под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.

Поступила в редакцию 21.01.2016

## **IV Международная научно-техническая конференция «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»**

4–7 октября 2016 г.

г. Краматорск

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА) проводит IV Международную научно-техническую конференцию «Сварка и родственные технологии: перспективы развития».

### НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- ◆ Прогрессивные технологии сварки, наплавки, пайки, резки, нанесения покрытий и обработки поверхностей
  - ◆ Математическое, физическое, имитационное моделирование, компьютерные и информационные технологии в сварке и родственных процессах
    - ◆ Теория процессов сварки и наплавки
    - ◆ Физико-химические процессы при сварке и родственных процессах
      - ◆ Материаловедение в сварке и родственных процессах
  - ◆ Перспективные конструкционные, сварочные и наплавочные материалы
    - ◆ Механизация и автоматизация в сварке и родственных процессах
  - ◆ Оборудование и источники питания в сварке и родственных процессах
    - ◆ Ресурс и надежность сварных конструкций
  - ◆ Техническая диагностика и контроль качества в сварке и родственных технологиях
    - ◆ Энерго- и ресурсосбережение в сварке и родственных технологиях
      - ◆ Экологические проблемы процессов сварки и наплавки
        - ◆ Нормативная база сварочного производства
        - ◆ Сварочные и родственные технологии в медицине
    - ◆ Нанотехнологии, наноматериалы в сварочных и родственных процессах
      - ◆ Нейросетевые технологии в сварочных и родственных процессах
- ◆ Подготовка и повышение квалификации кадров для сварочного производства и смежных областей
  - ◆ История развития сварки и родственных процессов

Рабочие языки конференции: украинский, русский, английский.

**Контакты:** Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА), ул. Шкадинова, 72, 84313, г. Краматорск, Донецкая обл., Украина, факс: (+38-0626) 41-63-15.

Ученый секретарь конференции – Голуб Денис Михайлович.

E-mail: [sp@dgma.donetsk.ua](mailto:sp@dgma.donetsk.ua); [goldenmih@ukr.net](mailto:goldenmih@ukr.net); [www.dgma.donetsk.ua](http://www.dgma.donetsk.ua)