

## ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Калініна Н. Є.<sup>1</sup>, Калінін В. Т.<sup>2</sup>, Серженко І. О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

<sup>2</sup>Національна металургійна академія України, Дніпро

**Анотація.** Для виготовлення деталей і вузлів турбонасосного агрегату (ТНА) і рідинного ракетного двигуна застосовуються зварні з'єднання з корозійностійкими сталями і жароміцними сплавами, які вимагають різних режимів термічної обробки для досягнення рівня механічних властивостей, зазначених у конструкторській документації.

З огляду на те, що пошук заміни відразу декільком матеріалам, їхнє відпрацювання у виробництві й дослідження взаємної сполучуваності за умови температурно-силових впливів у виробі може зайняти значний час і кошти, найкращою була б заміна на один сплав, а уніфікація застосовуваного матеріалу дозволила б конструкції працювати як єдине ціле, що підвищило б технологічність виробів. Після вивчення різних варіантів заміни для дослідження було обрано *inconel 718*.

**Ключові слова:** жароміцний сплав, корозійна стійкість, міжкристалітна корозія, зварювання, структура, пайка, *inconel 718*.

### Вступ

Основними експлуатаційними властивостями деталей і вузлів ТНА є жароміцність і корозійна стійкість. Якщо перша вимога досягається підбором матеріалів, то друга залежить від подальшої обробки.

Температура під час зварювання і термічної обробки впливає на структуру сплаву, змінюючи його експлуатаційні властивості. Тому в роботі було досліджено термічний вплив на корозійну стійкість зварних з'єднань основних сполучень матеріалів, що застосовуються у виготовленні ракетноносіїв. Оскільки більшість деталей і вузлів ТНА проходить як пайку, так і зварювання в різних послідовностях, то в роботі розглянуто випадок проведення пайки стрічковим припоєм після зварювання з корозійностійкою сталлю. Жароміцні сплави використовують для виготовлення багатьох деталей газових турбін у ракетобудуванні та реактивній авіації, стаціонарних газових турбін, у процесі перекачування нафти та газопродуктів, під час гідрогенізації палива в металургійних печах та в багатьох інших установках.

### Аналіз публікацій

Корозія – це мимовільний окислювально-відновний процес руйнування металів і сплавів унаслідок взаємодії з навколишнім середовищем. Під час зіткнення багатокомпонентних сплавів з електролітом (яким може бути  $H_2O$ , адсорбована з повітря, оскільки в ній,

як правило, є іони розчинених речовин) на поверхні металу виникає безліч мікрогальванічних пар. У цих парах атоми більш активного металу (зазвичай Fe) відіграють роль анода, а атоми менш активного – роль катода. На катоді йде процес відновлення молекул  $O_2$  в нейтральному й лужному середовищах, або іонів  $H^+$  – у кислому середовищі. На аноді відбувається окислення атомів металу, з яких складається анод, з утворенням катіонів  $Me_n^+$ . Останні переходять в електроліт (розчинення анода) і з'єднуються з іонами  $OH^-$ , з утворенням гідроксиду  $Me(OH)_n$  та інших продуктів. У результаті метал, який грає роль анода, руйнується. Швидкість електрохімічної корозії тим більша, чим далі один від одного розташовані метали в ряду напруг, і чим вища температура навколишнього середовища.

Нікель має кристалічну ґратку ГЦК, аналогічну решітці Fe $\gamma$ , тому легування нікелем розширює область існування аустеніту (рис. 1).

Найбільш широко використовуються хромонікелеві сталі марок 12X18N9 і 12X18N9T. Структура цих сталей – аустеніт як за умови кімнатної температури, так і під час нагрівання, тобто вони не зазнають поліморфного перетворення. Вироби з цих сталей піддають термічній обробці, але не з метою зміцнення (це неможливо, оскільки в процесі зміни температури не відбувається перекристалізації), а для підвищення корозійної стій-

кості за рахунок збагачення хромом твердого розчину. За умови наявності вуглецю в структурі обпаленої сталі присутні карбіди хрому. Це означає, що не весь хром знаходиться в твердому розчині. Загартування від температури  $\sim 1000^\circ\text{C}$  з охолодженням у воді дозволяє розчинити карбіди хрому в аустеніті й запобігти їхньому виділенню за умови швидкого охолодження.

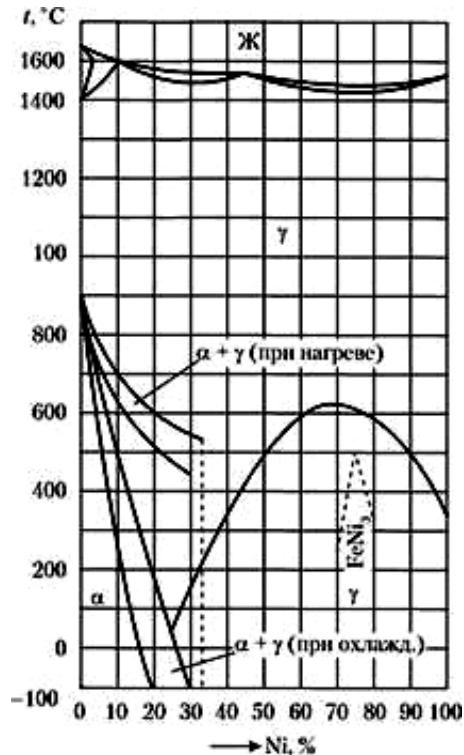


Рис. 1. Діаграма стану системи Fe – Ni

#### Мета і постановка завдання

Метою роботи є підвищення корозійної стійкості нікелевих сплавів термічною обробкою. Для досягнення мети були поставлені завдання: провести дослідження необхідних технологічних характеристик, корозійної стійкості та структури сплавів, вивчення термічних впливів у процесі пайки на зварений шов і для імітації умов виготовлення реальних вузлів.

#### Вплив режимів термічної обробки на корозійну стійкість зварних з'єднань

Матеріалами дослідження обрані: жароміцний сплав аустенітного класу incoel 718 системи Fe-Cr-Ni і корозійностійкі сталі 12X18H10T і SLS 316L.

Incoel 718 є жароміцним нікелевим сплавом системи Fe-Cr-Ni і використовується в ракетній техніці для виготовлення сорочок камер згоряння ракетних двигунів, деталей

турбонасосних агрегатів та інших виробів відповідального призначення. Цей сплав застосовується в діапазоні температур від  $-252,8^\circ\text{C}$  до  $704,4^\circ\text{C}$ , у хімічно активних газових середовищах стійкий до  $+980^\circ\text{C}$ .

Після зварювання зразки-заготовки за технологічним процесом виготовлення направляли на пайку.

Пайку проводили в двох режимах:

- нагрів до  $950 \pm 10^\circ\text{C}$ , витримка 30 хв із моменту завантаження в піч, охолодження до  $300^\circ\text{C}$  з піччю, далі – на повітрі;

- нагрів до  $1200 \pm 10^\circ\text{C}$ , витримка 20 хв із моменту завантаження в піч, охолодження до  $300^\circ\text{C}$  з піччю, далі – на повітрі.

Сталь 316L – конструкційна криогенна аустенітна сталь. Ця сталь стійка до корозії в агресивних середовищах, а також до більшості зовнішніх впливів. Сталь 316 L має властивість зберігати цілісність структури за умови підвищення та зниження температур.

Перелік досліджуваних матеріалів та їхній хімічний склад наведено в табл. 1.

Роботи, випробування й дослідження виконувалися на промисловому обладнанні. Під час контролю, випробувань і досліджень застосовувалися інструменти й методи відповідних ГОСТ або ОСТ, що використовуються для жароміцних сплавів.

Термообробка проводилася в термічній силітовій печі. Імітація пайки припоєм Г70НХ проводилася з проходженням повного режиму пайки за типовим техпроцесом, режими якої вказані нижче. Зварювання проводилося на зварювальному апараті Сані-2М.

Підготовка під зварювання. Кожна заготовка перед зварюванням проходила візуальний контроль на наявність окисних плівок, забоїн, а також контроль геометрії та перевірку магнітом.

Відповідно до ОСТ 92-1152-75 безпосередньо перед зварюванням кожен зварну кромку зачищають від окисних плівок після термічної обробки і знежирюють розчинником типу «Нефрас».

*Технологія зварювання.* Зварні збірки були зварені ручним аргано-дуговим зварюванням за режимом, рекомендованим компанією – виробником Nicrofer:  $I = 140\text{ A}$ , витрати аргону: на захист 15 л / хв, на піддув 5л / хв.

Аргон і гелій у процесі зварювання в атмосфері захисних газів застосовувався 1 сорту (об'ємна частка аргону – 99,90 %, кисню – 0,005 %, азоту – 0,10 %, парів води за умови 760 мм. рт. ст. – 0,03 г / м<sup>3</sup>).

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваних сплавів

Сплав	Полуф., мм	Хімічний склад, % мас													
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Ti	Mo	W	V	Al	Cu	Fe
inconel 718	Лист 3,17	0,03	0,08	0,08	0,0001	0,008	18,24	53,53	0,97	2,99	-	B-0,002	0,51	0,07	17,95
	Звар. дрiт. Ø 1,6	0,04	0,06	0,07	0,001	0,008	18,75	53,44	0,98	2,88	-	B-0,004	0,58	0,11	17,8
12X18H10T	Лист 3,0	0,05	0,57	0,59	0,002	0,029	17,58	9,05	0,3	0,1	0,023	0,029	-	0,22	Осн.
316L	Лист 3,0	0,03	2,0	1,0	0,003	0,045	16,0	14,05	0,5	3,1	0,023	-	-	-	Осн.

*Обробка зварного шва.* Для видалення окисної плівки і кольорів мінливості поверхню зварного шва й колошовної зони обробляли до параметра шорсткості Rz 40.

Всі зварні з'єднання пройшли рентгеноконтроль на наявність дефектів зварювання.

**Визначення стійкості проти МКК.** Дослідження зварних зразків сплав inconel 718 – нержавіюча сталь на стійкість проти МКК методом «АМ» ГОСТ 6032-89 – проводилося з боку сталі. Поверхня сталі 316L в зоні зварного шва досліджувалася в стані поставки, без зачистки поверхні. Результати дослідження наведені в табл. 2.

Травлення проводили в реактиві, що містить воду – 1000 см<sup>3</sup>, сірчано-кислу мідь – 130,0 г, сіру кислоту – 120,0 г. Витримали в цьому розчині сім діб з моменту занурення за умови температури 20 ± 5 °С. Після завершення часу поверхню пасивували в 20 % водному розчині соди і промили дистильованою водою.

Відповідно до вимог ГОСТ 6032-89 зразок вважається стійким, якщо глибина МКК не перевищує 0,03 мм. Підвищена травимість не є ознакою браку, але вказує на схильність матеріалу до корозії (табл. 2).

Таблиця 2 – Результати дослідження на міжкристалітну корозію

Умов. № зр.	Матеріал	Режим Т/О	Глибина МКК, мм	Підсумок
132	STS 316L – inconel 718	Пайка за умови 950 °С+ старіння	МКК відсутня (підвищена травимість на глибину до 0,33 мм)	Стійкий
133		Пайка за умови 1200 °С+ старіння		
151	12X18H10T- inconel 718	Пайка за умови 1210 °С + старіння	0,24	Нестійкий
141		Пайка за умови 950 °С + старіння	0,17 (підвищена травимість на глибину до 0,23мм)	
2		Пайка за умови 950 °С + старіння	0,07 (підвищена травимість на глибину до 0,14 мм)	

Проводили зовнішній огляд, а також огляд у процесі збільшення до х 200 разів поверхні зварних зразків із боку сталі 316L до їхніх випробувань на схильність до МКК. Установлено, що поверхня зразків із вихідного боку сильно шорстка з наявністю заглиблень і виступів довгастої та округлої форми,

інший бік зразка після механічної зачистки гладкий, злегка шорсткий.

Під час мікродослідження в перетинах вивчених зразків усл. №№ 132, 133 міжкристалітної корозії не виявлено. З поверхні на глибину до 0,33 мм спостерігалася підвищена травимість зерен (рис. 2). У процесі дослі-

дження зразків після режиму пайки в умовах 1200 °С було виявлено, що зразки менш стійкі до МКК, ніж ті, які пройшли пайку за температури 950 °С. Підвищена травимість зерен сталі 316L вказує на схильність сплаву до міжкристалітної корозії, але не є його визначенням.

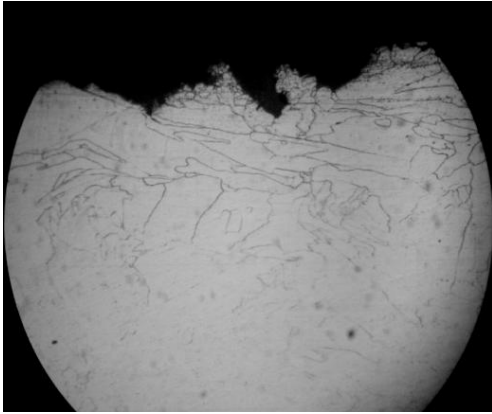


Рис. 2. Підвищена травимість зерен поверхні зразка з боку сталі 316L, x200

Міжкристалітна корозія на зразках сталі 12X18H10T показана на рис. 3.

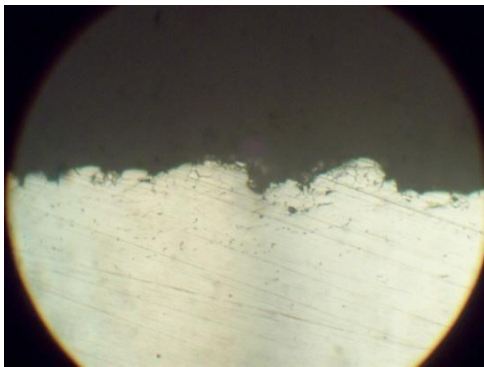


Рис. 3. Міжкристалітна корозія на зразках сталі 12X18H10T, x200

На рисунку чітко видно зони корозійного викришування зерна, що виявляє нестійкість сталі 12X18H10T до МКК після пайки за умови температури 1200 °С.

### Висновки

Після високотемпературних нагрівів стійкість проти МКК обох сталей знижується.

Дослідження зварних зразків сплав inconel 718 – нержавіючі сталі на стійкість проти МКК – показали, що зварні з'єднання сплаву 2.4668 зі сталлю 12X18H10T і зі сталлю 316L після нагрівів у процесі пайки і старіння в

агресивних середовищах застосовувати небажано.

Дослідження зварних зразків сплав inconel 718 – нержавіючі сталі на стійкість проти МКК – показали, що зварні з'єднання сплаву inconel 718 зі сталлю 12X18H10T і сталлю 316L після високотемпературних нагрівів у процесі пайки й подальшому старінні в агресивних середовищах застосовувати небажано.

Рекомендований режим пайки: нагрів до 950 ± 10 °С, витримка 30 хв із моменту завантаження в піч, охолодження до 300 °С з піччю, далі – на повітрі.

Контроль якості сплаву inconel 718 методами ГОСТ, аналогічними застосовуваним під час контролю жароміцних сплавів типу ХН67МВТЮ, показали результати, близькі до отриманих методами контролю за ASTM і AMS. Визначені оптимальні варіанти з'єднань під час ручного аргоно-дугового зварювання вольфрамовим електродом.

### Література

1. Глушкова Д.Б., Большаков В.И. Повышение долговечности ответственных деталей строительных машин: монография. – Харьков: Цифропринт, 2015. – 236 с.
2. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Попов Н.А. Структура и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов: учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство Урал. ун-та, 2016. – 160 с.
3. Моделирование и разработка новых жаропрочных сплавов. Ч. 1. / А.В. Логунов, Ю.Н. Шмотин, И.А. Лещенко, Б.Ю. Старков // Двигатель. – 2013. – 5(89). – С. 24–27.
4. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов: учебное пособие. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. – 312 с.
5. Богуслаев В.О., Качан О.Я., Калініна Н.С. Авіаційно-космічні матеріали та технології. – Запоріжжя: МоторСич, 2005. – 385 с.
6. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Ч. II / В.А. Богуслаев и др. – Запорожье: Мотор Сич, 2003. – 420 с.
7. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 19–35.

### References

1. Glushkova D.B., Bol'shakov V.I. Povysheniye dolgovechnosti otvetstvennykh detaley stroitel'nykh mashin: monografiya. – Khar'kov: Tsifroprint, 2015. – 236 s.

2. Kuznetsov V.P., Lesnikov V.P., Popov N.A. *Struktura i svoystva monokristallicheskikh zharoprochnykh nikelovykh splavov: uchebnoye posobiye.* – Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural. un-ta, 2016. – 160 s.
3. Modelirovaniye i razrabotka novykh zharoprochnykh splavov. Ch. 1. / A.V. Logunov, YU.N. Shmotin, I.A. Leshchenko, B.YU. Starkov // *Dvigatel'.* – 2013. – 5(89). – S. 24–27.
4. Merkulova G.A. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka tsvetnykh splavov, Uchebnoye posobiye.* – Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2008. – 312 s.
5. Boguslaev V.O., Kachan O.YA., Kalinina N.E. *Aviatsiyno-kosmichni materiali ta tekhnologii.* – Zaporizhzhya: MotorSich, 2005. – 385 s.
6. Tekhnologicheskoye obespecheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley GTD. Lopatki turbiny. Ch. II / V.A. Boguslayev i dr. – Zaporozh'ye: Motor Sich, 2003. – 420 s.
7. Ospennikova O.G. *Strategiya razvitiya zharoprochnykh splavov i staley spetsial'nogo naznacheniya, zashchitnykh i teplozashchitnykh pokrytyy // Aviatsionnyye materialy i tekhnologii.* – 2012. – № 5. – S. 19–35.

**Калініна Наталія Свграфівна**, д.т.н., професор кафедри технології виробництва, тел. (+38) 095-550-28-00,

e-mail: [kalinina.dnu@gmail.com](mailto:kalinina.dnu@gmail.com), Дніпровський Національний університет імені Олеся Гончара, вул. Наукова 1, Дніпро, 49000, Україна.

**Калінін Василь Тимофійович**, д.т.н., професор кафедри ливарного виробництва, тел. (+38) 050-480-44-15,

e-mail: [kalinina.dnu@gmail.com](mailto:kalinina.dnu@gmail.com), НМетаУ, пр. Гагаріна, 4, Дніпро 49000, Україна, Україна.

**Серженко Іванна Олегівна**, аспірант, тел. (+38) 093-361-19-48, e-mail: [lady.anna.we@gmail.com](mailto:lady.anna.we@gmail.com), Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна.

#### **Studying the effect of heat treatment modes on corrosion resistance of welded joints**

**Abstract.** *Welded joints with corrosion-resistant steels and heat-resistant alloys, which require different modes of heat treatment to achieve the level of mechanical properties specified in the design documentation, are used for the manufacture of parts and components of the turbo-pumping unit (TPU) and liquid rocket engine. Heat-resistant alloys are a large group of alloys on iron, nickel and cobalt bases with the addition of chromium and other alloying elements (C, V, Mo, Nb, W, Ti, Al, B, etc.), whose main feature is to maintain high strength at high and cryogenic temperatures. Heat-resistant alloys are used in the manufacture of many parts of gas turbines in rocketry and jet aircraft, stationary gas turbines, the pumping of oil and gas, hydrogenation of fuel in metallurgical furnaces and many other installations. For the*

*doping of nickel chromium  $\gamma$ -solid solution, several elements are used, which differently influence the increase of heat resistance and processability. Along with the main reinforcing elements (Ti, Al), refractory elements (W, Mo, Nb) are introduced into the alloy, which increase the thermal stability of the solid solution. Heat resistant alloys are based on cobalt. Cobalt has a positive effect on the heat-resistant properties of alloys. The introduction of chromium in cobalt increases its heat resistance and hardness. In addition to chromium, alloys containing cobalt include additives of other alloying elements that improve their various properties at high temperatures. A characteristic feature of these alloys is that they have relatively low heat resistance characteristics at moderate temperatures, which, however, change a little with the temperature up to 900 °C and therefore become quite high compared to the characteristics of other heat-resistant alloys. A significant drawback of these alloys is their high cost due to the costly cobalt. Nickel-based heat-resistant alloys typically have a complex chemical composition. It includes 12–13 components, carefully balanced to obtain the required properties. The content of impurities such as silicon (Si), phosphorus (P), sulfur (S), oxygen (O) and nitrogen (N) is also controlled. The content of elements such as selenium (Se), tellurium (Te), lead (Pb) and bismuth (Bi) should be negligible, which is provided by the selection of charge materials with low content of these elements, because it is not possible to get rid of them during melting. These alloys typically contain 10–12 % chromium (Cr), up to 8% aluminum (Al) and titanium (Ti), 5–10 % cobalt (Co), as well as small amounts of boron (B), zirconium (Zr) and carbon (C). Molybdenum (Mo), tungsten (W), niobium (Nb), tantalum (Ta) and hafnium (Hf) are sometimes added. Heat-resistant alloys are used for the production of many parts of gas turbines in rocketry and jet aircrafts, stationary gas turbines, for pumping oil and gas products, for hydrogenation of fuel in metallurgical furnaces and in many other installations. Nickel-based heat-resistant alloys are also cryogenic, i.e., they are capable of operating and retaining mechanical properties at very low temperatures (–100 °C to –269 °C). Such alloys are chromium-nickel alloys having an austenitic structure. Not only do they have good mechanical properties that do not change over a large temperature range (–200 °C to 900 °C), they can also work in corrosive environments. Nickel-based heat-resistant alloys typically have a complex chemical composition. It includes 12–13 components, carefully balanced to obtain the required properties. Welded and combined workpieces are made of separate components that are interconnected by various welding methods. Welded and combined blanks greatly simplify the creation of complex configuration designs. Improper workpiece design or incorrect welding technology can cause defects (grooves, porosity, internal stresses) that are difficult to correct by machining. Given that finding replacements with multiple materials, working them out in production, and*

investigating interconnectivity during thermal forces in a product can take considerable time and money, it would be best to replace one alloy. Unifying the material used would allow the structure to work as a whole, which would increase the manufacturability of the products. After examining the different replacement options, inconel 718 was selected for the study. Studies of welded specimens of inconel 718 alloy-stainless steel for resistance to the ICC have shown that it is not appropriate to use welded inconel 718 for the impeller, it is advisable to use material that would ensure uninterrupted operation in a corrosive environment at cryogenic temperatures. Based on the working conditions of the parts, it is most expedient to make it from heat-resistant chromium-nickel alloys, namely, from float inconel 718 which meets the necessary strength characteristics. The recommended soldering mode is heating up to  $950 \pm 10$  °C, holding for 30 minutes from the moment of loading into the oven, cooling to 3000C with the oven, further in the air, since it has less influence on the corrosion resistance of steels in stainless steel joints. Quality control of inconel 718 alloy by GOST methods simi-

lar to that used for the control of X67MBHT type alloys showed the results similar to those obtained by the ASTM and AMS control methods.

**Key words:** heat resistant alloy, corrosion resistance, intergranular corrosion, welding, structure, soldering, inconel 718.

**Kalinina Nataliya**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Production Technology, tel. (+38) 095-550-28-00, e-mail: kalinina.dnu@gmail.com, Oles Honchar National University, vul. Naukova 1, Dnipro, 49000, Ukraine.

**Kalinin Vasilii**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Foundry Production, tel. (+38) 050-480-44-15,

e-mail: kalinina.dnu@gmail.com, NMetaU, Gagarina Ave., 4, Dnipro 49000, Ukraine.

**Serzhenko Ivanna**, PhD student,

tel. (+38) 093-361-19-48,

e-mail: lady.anna.we@gmail.com,

The National Metallurgical Academy of Ukraine, 4 Gagarina avenue, Dnipro, 49600, Ukraina.

---