

УДК 620.175.2: 669.15

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.1.52

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА СТІЙКІСТЬ ДО МІЖКРИСТАЛІТНОЇ КОРОЗІЇ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ INCONEL 718 ТА СТАЛІ 316L

Кашенкова А. В., Калініна Н. Є., Сітенко Д. О.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Анотація Для виготовлення деталей і вузлів турбонасосного агрегату (ТНА) і рідинного ракетного двигуна використовуються зварні з'єднання з корозійностійкими сталями та жароміцними сплавами, які вимагають різних режимів термічного оброблення для досягнення рівня механічних властивостей, зазначених у конструкторській документації. Оскільки для заміни необхідні декілька матеріалів, відпрацювання у виробництві та дослідження взаємодіючої температури-силових впливів у виробі, а на це необхідно багато часу, то найкращою була б заміна одного сплаву, а уніфікація застосовуваного матеріалу дозволила 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

Технологія виготовлення виконує істотну роль у розвитку металургії та машинобудування. Впровадження нових ефективних, менш метало- та енергоємних технологій дозволить створювати високопродуктивні, надійні і довговічні, конкурентоспроможні машини та обладнання, а також приймати технологічні рішення, здатні якісно змінити процеси споживання трудових і матеріальних ресурсів.

Аналіз публікацій

Проведено аналіз публікацій проблеми модифікування алюмінієвих сплавів. У напружених конструкціях машинобудування і будівельній техніці широко використовуються деформуючі алюмінієві сплави систем Al-Mg Al-Si-Mn і ливарні алюмінієві сплави системи Al-Si. Аналіз сучасного стану проблеми механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей алюмінієвих сплавів систем Al-Mg, Al-Mg-Sc, Al-Si дозволяє зробити висновок про доцільність модифікування розплаву нанодисперсними тугоплавкими композиціями. Для ефективного засвоєння наномодифікаторів композиції повинні мати наступні властивості: відповідність фізико-хімічної природи елементів модифікатора та матриці сплавів; ізоморфність кристалічних решіток; невелику різницю атомних радіусів; відсутність розчинності в основній матриці; високу температуру плавлення ве-

деної композиції, що має певний критичний розмір при кристалізації.

Перспективні напрями модифікування алюмінієвих сплавів у світі ведуться в галузі застосування порошкових модифікаторів. Застосування таких модифікаторів полегшує технологічний процес, є екологічно безпечним, призводить до рівномірного розподілу введених наноконпозицій по перерізу виливка, що підвищує міцність, пластичні властивості сплавів та їх стабільність. Модифікаторами можуть виступати карбіди, нітриди, карбонітриди та інші тугоплавкі елементи та сполуки.

Перспективні напрями модифікування алюмінієвих сплавів у світі ведуться в галузі застосування порошкових модифікаторів. Застосування таких модифікаторів полегшує технологічний процес, є екологічно безпечним, призводить до рівномірного розподілу введених наноконпозицій по перерізу виливка, що підвищує міцність, пластичні властивості сплавів та їх стабільність.

В машинобудуванні і будівельній індустрії для деталей відповідального призначення застосовують алюмінієві сплави систем Al-Mg, Al-Mg-Sc, Al-Si марок AMg6, D16, 1201, 1570, AL4. Такі сплави мають високі показники механічних властивостей, високу пластичність, деформованість, зварюваність, що обумовлює їх перспективність для відповідальних конструкцій [4-5]. Однак застосування легких сплавів ускладнюється одночасним розвитком різних видів корозії при експлуа-

тації. З урахуванням високих вимог, що пред'являються до продукції машинобудування, а так само дії агресивних середовищ при експлуатації. Вивчено корозійні властивості ливарних деформованих алюмінієвих сплавів систем Al-Mg, Al-Mg-Sc, Al-Si.

Одним з ефективних шляхів підвищення якості виливків, усунення стовпчастої і вялової структури, подрібнення зерна і дендритної структури, досягнення однорідної структури і підвищення корозійних властивостей є модифікування [6-9]. Промислові підприємства України застосовують модифікування ливарних алюмінієвих сплавів солями натрію.

Однак легкоплавкі солі натрію не технологічні для обробки масивних розплавів, оскільки короткий час дії модифікатора не дозволяє досягти необхідного подрібнення зерна і підвищення механічних і технологічних характеристик сплавів. Перспективним напрямом покращення якості та властивостей алюмінієвих сплавів є застосування дисперсних тугоплавких модифікаторів на основі карбідів, нітридів, боридів, чистих металів розмірами частинок 10...100 нм [10].

Роль нанодисперсних добавок-модифікаторів зводиться до створення в розплаві додаткових штучних центрів кристалізації. Для цього такі добавки повинні бути співрозмірні з критичними зародками матричної фази сплавів і забезпечувати достатню їх кількість для отримання в литві дрібнодисперсної структури. Як показано в роботі [11], найбільш ефективними модифікаторами алюмінієвих сплавів визнані порошки тугоплавких сполук на основі титану і кремнію з розміром частинок менше 100 нм.

На механічні властивості алюмінієвих сплавів суттєво впливають розміри частинок зміцнюючої фази. Промислові експерименти з застосуванням дисперсних частинок SiC у широкому діапазоні розмірів 0,075...0,100; 10...20; 30...40; 50...60 і 90...100 мкм виявили, що зі зменшенням розмірів частинок карбіду кремнію межа міцності сплаву АЛ4 зростає з 115 до 260 МПа (рис. 1).

Для визначення оптимальної кількості модифікатора карбіду кремнію виконали промислові плавки та випробування зразків, що пройшли термічну обробку за режимом Т6 (гартування і штучне старіння).

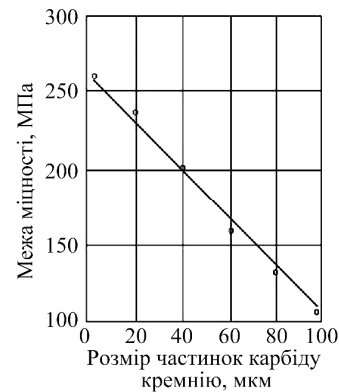


Рис. 1. Вплив розмірів частинок SiC на міцність сплаву АЛ4

Для комп'ютерної обробки даних складу сплавів і вмісту модифікаторів використали програму Microsoft Excel. Аналіз результатів засвідчив, що модифікування частинками карбіду кремнію в кількості 0,1 мас. % максимально підвищує пластичність сплаву АЛ4 за одночасного збільшення межі міцності і межі текучості.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є підвищення корозійної стійкості алюмінієвих сплавів модифікуванням. Для досягнення мети були поставлені завдання: провести дослідження комплексу фізико-механічних властивостей, необхідних технологічних характеристик, корозійної стійкості та структури сплавів до і після модифікування.

Матеріали і методи

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

Inconel 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. Цей сплав застосовується в діапазоні температур від -252.8°C до 704.4°C в хімічно активних газових середовищах, він стійкий до $+980^{\circ}\text{C}$.

Після зварювання зразки-заготовки для технологічного процесу виготовлення направляли на паяння.

Паяння здійснювали за 2 режимами:

– нагрівання до $950 \pm 10^{\circ}\text{C}$, витримка 30 хвилин з моменту завантаження в піч, охолодження до 300°C з піччю, а далі на повітрі.

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

Сталь 316L – конструкційна криогенна аустенітна сталь. Вона стійка до корозії в агресивних середовищах, а також до більшості зовнішніх впливів. Сталь 316 L має властивість зберігати цілісність структури у разі підвищення та зниженні температур.

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

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

Термооброблення здійснюється в термічній сілітовій печі. Імітація паяння припоєм Г70НХ проводилася з проходженням повного режиму паяння згідно з типовим техпроцесом, режими якого вказані нижче. Зварювання відбувається апараті Сані-2М.

Результати та їх обговорення

Підготовка до 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 зварна кромку зачищають від окисних плівок після термічного оброблення та знежирюють розчинником типу «Нефрас».

Технологія зварювання

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

Під час зварювання в атмосфері захисних газів використовувався аргон і гелій 1 сорту (об'ємна частка аргону – 99,90 %, кисню – 0,005 %, азоту – 0,10 %, парів води – 760 мм. Рт. Ст. 0,03 г / м³).

Оброблення зварного шва. Для видалення окисної плівки і кольорів мінливості поверхню зварного шва та зони поблизу шва оброблялася до параметра шорсткості Rz 40.

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

Визначення стійкості проти МКК Дослідження зварних зразків сплавів inconel 718-нержавкої сталі на стійкість проти МКК методом «АМ» за ГОСТ 6032-89 проводилося з боку сталі. Поверхня сталі 316L в зоні зварного шва досліджувалася в стані поставлення без зачищення поверхні. Результати дослідження наведені в табл. 2.

Травлення здійснювали в реактиві такого складу: вода – 1000см³, сірчано-кисла мідь – 130,0 г, сіра кислота 120,0 г. Витримували в цьому розчині 7 діб з моменту занурення за температури $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Після цього поверхню пасивувати в двадцятипроцентному водному розчині соди і промили дистильованою водою.

Відповідно до вимог ДСТУ 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 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.

Таблиця 2 – Результати дослідження на міжкристалітну корозію

Умов. № зр.	Матеріал	Режим Т/О	Глибина МКК, мм	Завершення
132	STS 316L – inconel 718	Паяння за 950 ⁰ С+ старіння	МКК відсутня (підвищена травимість на глибину до 0,33мм)	Стійкий
133		Паяння за 1200 ⁰ С+ старіння		
151	12X18Н10Т- inconel 718	Паяння за 1210 ⁰ С + старіння	0,24	Нестійкий
141		Паяння за 950 ⁰ С + старіння	0,17, (підвищена травимість на глибину до 0,23мм)	
2		Паяння за 950 ⁰ С + старіння	0,07, (підвищена травимість на глибину до 0,14 мм)	

Проводили зовнішній огляд, а також огляд ляд у випадку збільшення до х 200 разів поверхні зварних зразків з боку сталі 316L до їх випробувань на схильність до МКК. Встановлено, що поверхня зразків з вихідною боку сильно шорстка з наявністю заглиблень і виступів довгастої і округлої форми, інший бік після механічного зачищення зачистки гладкий та шорсткий.

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

Під час дослідження зразків після режиму паяння за 1200 °С було виявлено, що зразки є менш стійкими до МКК, ніж ті, які пройшли паяння за температури 950 °С.

Підвищена травимість зерен сталі 316L демонструє схильність сплаву до міжкристалітної корозії, але не є його визначенням.

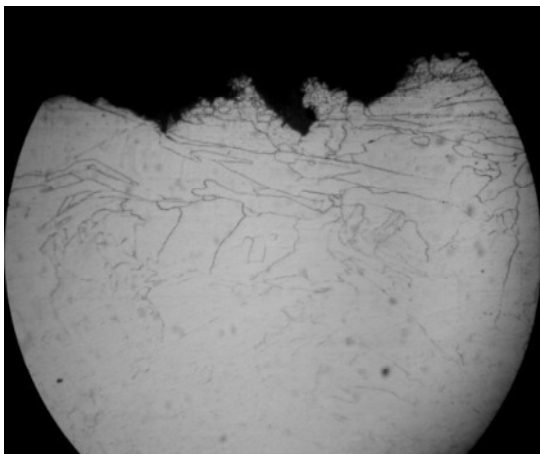


Рис. 2. Підвищена травимість зерен поверхні зразка з боку сталі 316L, х200

Міжкристалітна корозія на зразках сталі 12X18Н10Т показана на рис. 3.

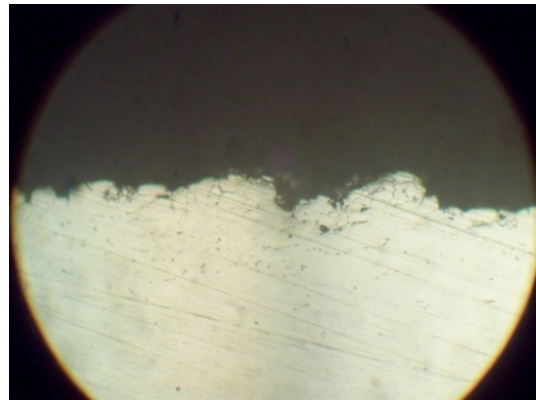


Рис. 3. Міжкристалітна корозія на зразках сталі 12X18Н10Т, х200

На рисунку подано зони корозійного викришування зерна, які вказують на нестійкість сталі 12X18Н10Т до МКК після паяння за температури 1200°С.

Висновки

Після високотемпературних нагрівань стійкість проти МКК обох сталей знижується. Дослідження зварних зразків сплавів inconel 718-неіржавкої сталі на стійкість проти МКК демонструють, що зварні з'єднання сплаву 2.4668 зі сталлю 12X18Н10Т і зі сталлю 316L після нагрівів під час паяння і старіння в агресивних середовищах застосовувати небажано.

Дослідження зварних зразків сплавів inconel 718- неіржавкої сталі на стійкість проти МКК демонструють, що зварні з'єднання сплаву inconel 718 зі сталлю 12X18Н10Т і зі сталлю 316L після високотемпературних нагрівань під час паяння і подальшого старіння в агресивних середовищах застосовувати небажано.

Рекомендований режим паяння-нагрівання до 950 ± 10°С, витримка – 30 хвилин з моменту завантаження в піч,

охлаждения до 3000С- з піччю, далі на повітрі, оскільки менший режим впливає на корозійну стійкість сталей в з'єднаннях з неіржавкими сталями.

Контроль якості сплаву inconel 718 методами ДСТУ, що є аналогічним під час застосування під час контролю жароміцних сплавів типу ХН67МВТЮ, продемонстрував результати, близькі до отриманих методами контролю за ASTM і AMS. Були 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: моногр. 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. ISBN 978-5-7996-1829-2.
3. Моделирование и разработка новых жаропрочных сплавов. Часть 1. [Текст] / А. В. Логунов и др. Двигатель. 2013. 5(89). С. 24–27.
4. Меркулова Г. А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов: уч. пособие Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. 312 с.
5. Богуслаев В. О., Качан О. Я., Калініна Н. Є. Авіаційно-космічні матеріали та технології. Запоріжжя: МоторСич, 2005–385с.
6. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины (часть II) / В. А. Богуслаев и др. Запорожье: ОАО «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. Bol'shakov V. I., Glushkova D. B. Povysheniye dolgovechnosti otvetstvennykh detaley stroitel'nykh mashin: monogr. Kharkov: Tsifroprint, 2015. 236 s.
2. Kuznetsov, V. P., Lesnikov V. P., Popov N. A. Struktura i svoystva monokristallicheskiykh zharoprochnykh nikelovykh splavov: uchebnoye posobiye [Tekst]. Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural. un-ta, 2016. 160 s. ISBN 978-5-7996-1829-2.
3. Modelirovaniye i razrabotka novykh zharoprochnykh splavov. Chast' 1. [Tekst] / A. V. Logunov i dr/ 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. Aviatyino-kosmichni materialy ta tekhnologii. Zaporizhzhya: MotorSich, 2005–385s.
6. Tekhnologicheskoye obespecheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley GTD. Lopatki turbiny (chast' II) / V. A. Boguslayev i dr. Zaporozh'ye: OAO «Motor Sich», 2003. 420 s.
7. Ospennikova O. G. Strategiya razvitiya zharoprochnykh splavov i staley spetsial'nogo naznacheniya, zashchitnykh i teplozashchitnykh pokrytiy. Aviatyionnyye materialy i tekhnologii. 2012. №5. S. 19–35.

Кашенкова Анастасія Вячеславівна, аспірант, +380730393283,

e-mail-kashenkova.nastyushka@gmail.com,

Калініна Наталія Євграфівна, д.т.н., професор, +30955502800, e-mail- kalinina.dnu@gmail.com,

Ситенко Дмитро Олександрович, студент, +380730393283, e-mail-

kashenkova.nastyushka@gmail.com .

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Гагаріна, 72, м. Дніпро, Дніпропетровська область, 49000.

Влияние температуры термической обработки на стойкость к межкристаллитной коррозии сварных соединений жаропрочных никелевых сплавов inconel 718 и стали 316L

Аннотация. Для изготовления деталей и узлов турбонасосного агрегата (ТНА) и жидкостного ракетного двигателя применяются сварные соединения стальных и жаропрочных сплавов, требующих различных режимов термической обработки для достижения уровня механических свойств, указанных в конструкторской документации. Учитывая то, что поиск замены сразу нескольких материалов, их отработка в производстве и исследования взаимной сочетаемости при температурно-силовых воздействиях в изделии может занять значительное время и средства, лучшей была бы замена на один сплав, а унификация применяемого материала позволила конструкции работать как единое целое, что повышает технологичность изделий. После изучения различных вариантов замены для исследования были выбраны inconel 718.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, коррозионная стойкость, межкристаллитная коррозия, сварка, структура, пайка, inconel 718.

Кашенкова Анастасія Вячеславівна, аспірант, + 380730393283, e-mail-

kashenkova.nastyushka@gmail.com,

Калініна Наталія Євграфівна, д.т.н., професор, +30955502800,

e-mail- kalinina.dnu@gmail.com,

Ситенко Дмитрій Олександрович, студент.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Гагаріна, 72, м. Дніпр, Дніпропетровська область, 49000.

The effect of heat treatment temperature on the resistance to intergranular corrosion of welded joints of heat-resistant nickel alloys inconel 718 and steel 316L

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 (TNA) and liquid rocket engine. Heat-resistant alloys are called 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.), the main feature of which 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 γ -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 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 contain 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 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 their high cost of 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 to get rid of them during melting does not appear possible. 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 aircraft, 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 lead to 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, and 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 welded inconel 718 alloy joints with 12X18H10T steel and 316L steel after high temperature heating during soldering and subsequent aging in aggressive environments. Thus, on the basis of working conditions and technical requirements 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, has been investigated. The recommended soldering mode is heating up to $950 \pm 10^\circ\text{C}$, 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 similar to that used for the control of X67MBHT type alloys showed results similar to those obtained by the ASTM and AMS control methods.

Keywords: heat resistant alloy, corrosion resistance, intergranular corrosion, welding, structure, soldering, inconel 718.

Kashenkova Anastasia, PhD student,
+ 380730393283,

e-mail- kashenkova.nastyushka@gmail.com,

Kalinina Nataliya, Doctor of Technical Sciences,
Prof., +30955502800, e-mail- kalinina.dnu@gmail.com,

Sitenko Dmitry, student,

Dnipro National University, Potter, Olesya 72
Gagarina avenue, Dnipro, Dnipropetrovsk region,
49000.