

PACS numbers: 06.60.Vz, 46.50.+a, 62.20.mt, 68.35.bd, 81.05.Bx, 81.20.Vj, 81.40.Np

Формування критеріїв оцінки придатності застосування присадних матеріалів з ніклевих стопів у адитивних технологіях 3D-натоплення

О. В. Яровицин, М. О. Черв'яков, І. Р. Волосатов, Г. Д. Хрущов,
В. А. Пестов, О. О. Наконечний, Л. В. Черв'якова, С. О. Воронін,
С. Л. Чигилейчик*, С. Є. Кондратюк**, Н. П. Железняк**,
С. А. Каменєва***, В. Т. Зубкова***

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

**АТ «МОТОР СІЧ»,
просп. Моторобудівників, 15,
69068 Запоріжжя, Україна*

***Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 34/1,
03142 Київ, Україна*

****ДП «УкрНДІспецсталь»,
вул. Патріотична, 74-а,
69005 Запоріжжя, Україна*

Corresponding author: Oleksandr Valentynovych Yarovytsyn
E-mail: yarovytsyn@ukr.net

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

**Motor Sich JSC.,
15 Motorostroiteley Ave., UA-69068 Zaporizhzhya, Ukraine*

***Physico-Technological Institute of Metals and Alloys, N.A.S. of Ukraine.,
34/1 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

****SE 'UkrNIIspetsstal',
74-a Patriotychna Str., UA-69005 Zaporizhzhya, Ukraine*

Citation: O. V. Yarovytsyn, M. O. Cherv'yakov, I. R. Volosatov, H. D. Khrushchov, V. A. Pyestov, O. O. Nakonechnyy, L. V. Cherv'yakova, S. O. Voronin, S. L. Chyhyleychuk, S. Ye. Kondratyuk, N. P. Zhelyeznyak, S. A. Kamenyeva, and V. T. Zubkova, Formation of Criteria for Evaluating the Suitability of the Use of Filler Materials Made of Nickel Alloys in Additive Technologies of 3D Surfacing, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 46, No. 2: 129–149 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.02.0129](https://doi.org/10.15407/mfint.46.02.0129)

Під час вибору присадних матеріалів для адитивних технологій 3D-натоплення важливу роль набуває уточнення деформаційної здатності багат шарового натопленого металу у структурному стані «as built», яку, в свою чергу, пропонується співвідносити з експериментальними даними забезпечення/незабезпечення технологічної міцності відповідних виробів. Запропоновано методику тестування присадного матеріалу нікелевого стопу для планованого застосування у технологіях 3D-натоплення, що ґрунтується на проведенні для одержаного багат шарового натопленого металу оціночних механічних випробувань на повздовжній статичний розтяг (20, 1000, 1100°C), статичне та ударне загинання (20°C). Зазначену методику верифіковано шляхом тестування 14 видів присадного матеріалу у формі дроту та порошку. Відповідний натоплений метал нікелевих стопів Hastelloy C22, Inconel 625, ЭП648, ЧС40, Inconel 718, Inconel 939, Rene 80, Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32 був одержаний багат шаровим дуговим натопленням заготовок «вертикальна стінка». Виявлено два чинники технологічного впливу на деформаційну здатність натопленого металу нікелевих стопів у структурному стані «as built»: хемічний склад стопу за вмістом основних легувальних елементів Al, Ti, Nb, Ta, W, здатних за певної їхньої кількості утворювати γ' -фазу для дисперсного зміцнення; середньоваговий вміст домішок Оксигену та Нітрогену. За одержаними експериментальними даними критичної руйнівної деформації ϵ , максимального кута загинання до утворення тріщини β та показника ударної в'язкості KCU запропоновано натоплений метал нікелевих стопів поділяти на три групи, що на сучасному етапі розвитку технологій променевого та дугового 3D-натоплення співвідносяться з можливістю забезпечення його технологічної міцності.

Ключові слова: адитивні технології 3D-натоплення, технологічна міцність, жаротривкі та жароміцні нікелеві стопи, структурний стан «as built», механічні випробування, деформаційна здатність натопленого металу, середньоваговий вміст домішок Оксигену та Нітрогену.

During selection of filler materials for 3D deposition additive technologies, it is important to clarify the deformation capacity of multilayer-deposited metal in its 'as-built' structural state, which in its turn is suggested to be correlated with experimental data on ensuring or not ensuring the technological strength of corresponding products. A testing method of nickel alloys planned for applied application in 3D deposition technologies is proposed and based on conducting evaluation mechanical tests for multilayer-deposited metal, including longitudinal tensile tests (20, 1000, 1100°C), static and impact bending tests (20°C). This method is approved by testing on 14 types of wire- and powder-based filler material. Corresponding deposited metal of Hastelloy C22, Inconel 625, ЭП648, ЧС40, Inconel 718, Inconel 939, Rene 80, Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32 nickel alloys is obtained by multilayer arc-welding deposition of 'vertical wall'-type workpieces. Two technological factors affecting deformational capacity of nickel-alloy-deposited metal in 'as-built' structural state have been exposed: the chemical composition by criteria of Al, Ti, Nb, Ta, W main alloying-elements' content, which, given their certain amount, are capable of forming γ' -phase precipitate hardening; average weight content of oxygen and nitrogen. Based on the obtained

experimental data on critical deformation ε , maximum bend angle before cracking β and impact strength KCU values, it is proposed to divide the nickel-alloy-deposited metal into three groups, which correlate with the possibility to provide technological strength at the current level of beam and arc 3D deposition technological development.

Key words: additive 3D technologies, technological strength, heat-resistant and high-temperature strength nickel alloys, 'as-built' structural state, mechanical tests, deformational capacity of deposited metal, average weight content of oxygen and nitrogen.

(Отримано 30 вересня 2023 р.; остаточн. варіант — 15 листопада 2023 р.)

1. ВСТУП

Попри значні успіхи в розвитку адитивних технологій на базі лазерного [1–3] та дугового [4–6] процесів актуальною залишається проблема розробки критеріїв оцінки придатності стопів на нікелевій основі для їхнього застосування у таких технологіях, зокрема, розпорошених порошкових матеріалів з точки зору їхньої якості. Для фахівця-зварника основною технологічною проблемою застосування таких матеріалів є небезпека появи в багатошаровому нагрітому металі тріщин, які за міжнародним стандартом [7] класифікуються як гарячі. Згідно з сучасними уявленнями [7], вони поділяються на кристалізаційні (solidification cracks), ліквідаційні (liquation cracks) та тріщини провалу пластичності (ductility dip cracks). За певних умов цупкості зварного з'єднання вони можуть утворюватися під дією термодформаційного циклу зварювання [8, 9] за рахунок дії тимчасових і залишкових деформацій розтягу на стадії охолодження зварного з'єднання або нагрітого металу. Незважаючи на значну кількість вітчизняних та іноземних публікацій, присвячених апробації нікелевих стопів в адитивних технологіях, наприклад [10–14] та [6, 15, 16] відповідно, адекватних критеріїв придатності нікелевого стопу до застосування в адитивних технологіях досі не сформовано.

Нещодавні дослідження фахівців ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України показали, що при прогнозуванні технологічної міцності зварних з'єднань «основний–нагрітий метал» важливо враховувати особливості деформаційної здатності нагрітого металу нікелевих жароміцних і жаростійких стопів, зокрема, в стані безпосередньо після нагрівання [17–19].

Дана робота представляє собою спробу системної аналізи деформаційної здатності нагрітого металу різних жаротривких і жароміцних нікелевих стопів з різним вмістом домішок Оксигену та Нітрогену, оціненої як за комплексом типових механічних випробувань на статичний розтяг, статичне та ударне загинання за кім-

натної температури, відомим з часів введення нормативно-технічного документу з оцінки механічних властивостей зварних з'єднань [20], так і доповненої новими експериментальними даними випробувань на статичний розтяг за температур у 1000 та 1100°C, що для умов зварювання/топлення високожароміцних ніклевих стопів відповідають інтервалу провалу пластичности — ductility dip range (DDR) [21, 22].

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В даній роботі аналізувалися присадні матеріали (порошок фракцією (53–63)–(150–163) мкм, дріт \varnothing 1,6 мм) та відповідний нагрітий метал ніклевих жаротривких і жароміцних стопів, хемічний склад яких наведено в табл. 1.

Попередньо в присадних матеріалах, що надалі використовувалися для нагрітання, за стандартизованою методикою відновного топлення в потоці газу-носія визначався вміст домішок Оксигену та

ТАБЛИЦЯ 1. Хемічний склад жаротривких і жароміцних ніклевих стопів, з яких виготовлялися розпоршені присадні порошки.

TABLE 1. Chemical composition of heat resistant and high-temperature strength nickel alloys, used for filler powder atomization.

№	Стоп	% ваг.											
		C	Cr	Ti	Al	Ni	Mo	W	Co	Re	Ta	Nb	
1	Inconel 625	≤ 0,10	20,0–23,0	≤ 0,4	≤ 0,4	≥ 58,0	8,0–10,0	–	≤ 1,0	–	3,15–4,15		
2	Hastelloy C22	< 0,15	20,0–22,5	–	–	Осн.	12,5–14,5	2,5–3,5	≤ 2,5	–	–	–	–
3	ЧС40	≤ 0,05	19,0–21,0	–	2,4–2,7	Осн.	8,0–10,0	4,5–5,5	–	–	–	–	–
4	ЭП 648	≤ 0,10	32,0–35,0	0,5–1,1	0,5–1,1	Осн.	2,3–3,3	4,3–5,3	–	–	–	–	0,5–1,1
5	Inconel 718	≤ 0,008	17,0–21,0	0,65–1,15	0,2–0,8	Осн.	2,8–3,3	–	≤ 1,0	–	–	–	4,75–5,50
6	Inconel 939	< 0,15	20,0–23,0	3,2–4,3	1,0–3,0	Осн.	–	1,5–2,5	16,0–20,0	–	1,0–1,8	–	0,5–1,5
7	Renè 80	0,15–0,19	13,7–14,3	4,8–5,2	2,8–3,2	Осн.	3,7–4,3	3,7–4,3	9,0–10,0	–	≤ 0,10	–	≤ 0,10
8	Inconel 738LC	0,09–0,13	15,0–17,0	3,2–3,7	3,2–3,7	Осн.	1,5–2,0	2,2–3,0	8,0–9,5	–	1,5–2,0	–	0,6–1,2
9	ЖС6К	0,13–0,20	9,5–12,0	2,5–3,2	5,0–6,0	Осн.	3,5–4,8	4,5–5,5	4,0–5,5	< 0,4	< 2,0	–	1,4–1,8
10	ЖС6У	0,13–0,20	8,0–9,5	2,0–2,9	5,1–6,0	Осн.	1,2–1,4	9,5–11,0	9,5–10,5	< 0,4	< 1,0	–	0,8–1,2
11	ЖС32	0,12–0,18	4,3–5,6	–	5,6–6,3	Осн.	0,8–1,4	7,8–9,5	8,0–10,0	3,5–4,5	3,5–4,5	–	1,4–1,8

Продовження таблиці 1.

Continuation of Table 1.

№	Стоп	Не більше, % ваг.					
		V	Fe	Si	Mn	S	P
1	Inconel 625	–	≤ 5,0	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,015	≤ 0,015
2	Hastelloy C22	≤ 0,35	2,0–6,0	≤ 0,08	≤ 0,05	≤ 0,02	≤ 0,02
3	ЧС40	–	≤ 5,0	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 0,010	≤ 0,010
4	ЭП 648	–	≤ 4,0	–	≤ 0,5	–	–
5	Inconel 718	–	18,5	≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 0,015	≤ 0,015
6	Inconel 939	–	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,20	≤ 0,01	≤ 0,010
7	Renè 80	–	≤ 0,35	≤ 0,50	≤ 0,5	≤ 0,015	≤ 0,015
8	Inconel 738LC	–	≤ 0,50	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,015	≤ 0,015
9	ЖС6К	–	≤ 0,5	≤ 0,25	≤ 0,20	≤ 0,010	≤ 0,010
10	ЖС6У	–	≤ 0,5	≤ 0,25	≤ 0,20	≤ 0,010	≤ 0,010
11	ЖС32	≤ 0,15	≤ 0,5	≤ 0,20	≤ 0,30	≤ 0,005	≤ 0,010

Нітрогену [23, 24]. Для досліджень деформаційної здатності кожного із досліджуваних видів нагрітого металу багат шаровим мікроплазмовим порошковим нагріванням (МПН) [6, 17–19] або аргонодуговим нагріванням (АДН або ТІГ-процес) вирошувалася зварна заготовка «вертикальна стінка» (рис. 1) довжиною у 65–85 мм. У якості основного металу використовувалася прямокутна пластина з аустенітної неіржавійної криці товщиною у 2,8–3,2 мм. Для МПН використовувалася установка МСТ-50, у склад якої входив порошковий дозатор, а для АДН — зварювальне джерело живлення КЕМРРІ MASTERTIG MLS 3000 разом з приводом переміщення і подачі зварювального дроту АД-228.

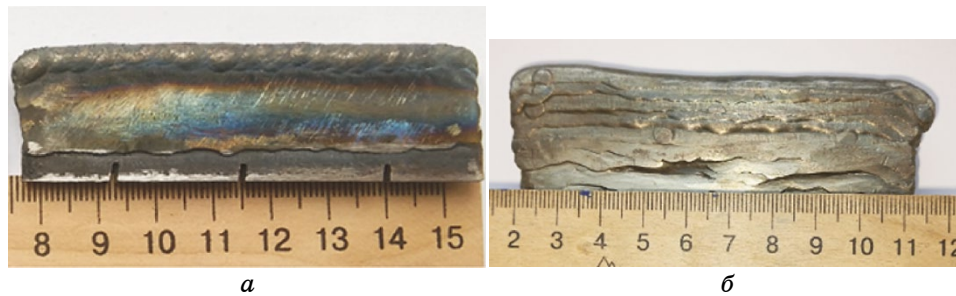


Рис. 1. Зовнішній вигляд зварних заготовок «вертикальна стінка» в процесі багат шарового нагрівання: мікроплазмового порошкового (а), аргонодугового (б).

Fig. 1. ‘Vertical wall’ type multilayer deposited weld workpiece: microplasma powder deposition (a), TIG deposition (b).

Параметри режиму для підготовки зварних заготовок склали: для МПН — середньоквадратичне (діюче) значення імпульсного зварювального струму $I = 20\text{--}35$ А, напруга на дузі $U = 22\text{--}23$ В, подача присадного порошку $G_p = 2,5\text{--}4$ г/хв., швидкість нагрівання $v = 0,8\text{--}1,5$ м/год; для АДН — середньоквадратичне (діюче) значення імпульсного зварювального струму $I = 80\text{--}115$ А, напруга на дузі $U \cong 12$ В, швидкість подачі присадного дроту $G_p = 120$ м/год, швидкість нагрівання $v = 5\text{--}10$ м/год. У якості присадного матеріалу застосовувалися: порошок фракцією (53–63)–(150–163) мкм; зварювальний дріт $\varnothing 1,6$ мм. Як захисне середовище, використовуються наступні технологічні гази згідно з класифікацією за [25]: плазмоутворювальний у кількості 0,5–1,5 л/хв. — П1-100Ar, транспортувальний у кількості 3–6 л/хв. — П1-100Ar, захисний у кількості 5–10 л/хв. — суміш R1-ArH-10. Для аргонодугового нагрівання, як захисний газ, використовувався П1-100Ar у кількості 10–12 л/хв.

Багатошарове нагрівання зварної заготовки «вертикальна стінка» виконувалося до висоти у 30–35 мм з типовою висотою нагрі-

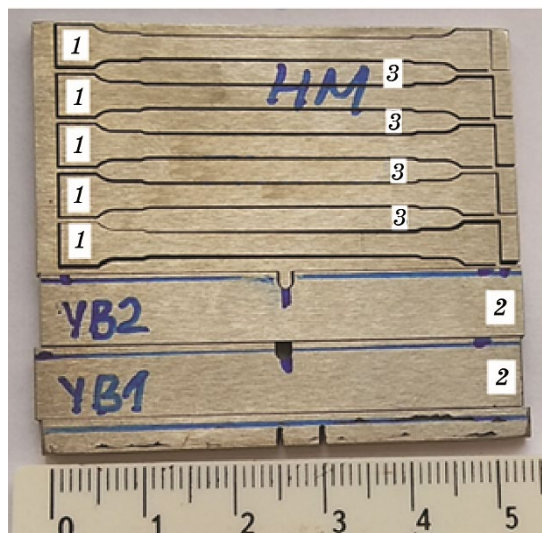


Рис. 2. Приклад схеми розкрою механічно обробленої заготовки нагрітого металу «вертикальна стінка» за виготовлення зразків для механічних випробувань електроерозійною різкою. Позначення видів зразків: 1 — зразок для випробувань на повздовжній статичний розтяг, 2 — зразок для випробувань на ударне загинавання, 3 — зразок для випробувань на статичне загинавання.

Fig. 2. Cutting scheme for mechanically processed ‘vertical wall’-type deposited metal workpiece to produce mechanical-test samples with electric-discharge cutting. Sample types’ designation: 1—longitudinal static tensile-test sample, 2—impact bending-test sample, 3—static bend-test sample.

леного шару за МПН у 2,5–3,5 мм, а за АДН — у 1,5–2,0 мм. Ширина натопленого валика складала 4,5–6,0 мм та 8–9 мм. Зазначену відмінність параметрів режимів АДН і МПН та ширини натопленого валика було зумовлено різницею у напрузі та теплових характеристиках відповідних зварювальних дуг [26] та особливостями формування натопленого валика на вузькій основі [27].

Після натоплення кожного валика він охолоджувався на повітрі до кімнатної температури та виконувалося проміжне механічне оброблення верхньої та бокових частин попередньо натопленого валика абразивним, а потім твердостопним (чистовий прохід) інструментом, зокрема для видалення приповерхневого окисненого шару. Після закінчення натоплення бокові поверхні цієї заготовки підлягали механічному обробленню шліфуванням до товщини у 2,5–3,0 мм. У разі відсутності дефектів за результатами проведеного капілярного контролю з неї електроерозійною різкою вирізалися зразки для механічних випробувань на повздовжній статичний розтяг, статичне й ударне загинання (рис. 2). Креслення мініатюрного плоского пропорційного зразка для випробувань на повздовжній статичний розтяг наведено на рис. 3; обґрунтування його форми та розмірів з точки зору відповідності вимогам чинної нормативно-технічної документації описано в попередній роботі [28]. Для випробувань на ударне загинання використовувався зразок *KCU* (тип XI) за [20]. Поверхня електроерозійних розрізів на зразках додатково підлягала механічному обробленню — чистовому шліфуванню та поліруванню. До механічних випробувань допускалися зразки, що за результатами капілярного контролю не мали на своїх поверхнях дефектів.

Виготовлені зразки натопленого металу випробовували у структу-

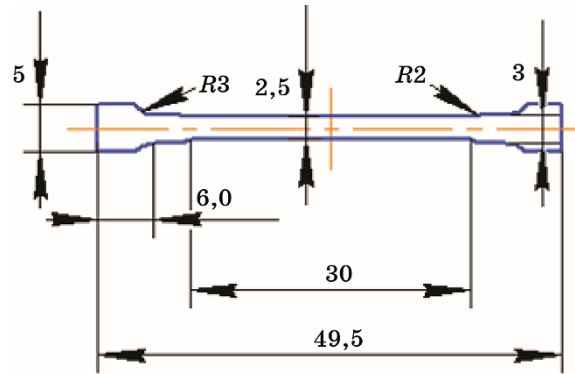


Рис. 3. Креслення плоского пропорційного мініатюрного зразка для сервогідравлічної машини MTS-810.

Fig. 3. Flat proportional miniature sample blueprint for MTS-810 servo-hydraulic machine.

рному стані безпосередньо після нагрівання (без термічного оброблення; за стандартизованою англомовною термінологією — *as built* [29]).

Для випробувань на статичний розтяг використовували сервогидравлічну випробувальну машину MTS-810, для визначення ударної в'язкості *KCU* — копер К15, для випробувань на статичне загинання — устаткування на основі гвинтової передачі.

Додатково оцінювався середньоваговий вміст домішок Оксигену та Нітрогену в нагрітому металі жаротривких і жароміцних ніклевих стопів за стандартизованою методикою відновного топлення в потоці газу-носія [23, 24]. Зразки для газової аналізи вирізали із непошкоджених частин відповідних зразків після їхніх випробувань на статичне або ударне загинання. Кожна поверхня зразка для газової аналізи підлягала попередньому обробленню абразивним інструментом типу Э14А та фінішному обробленню шліфувальним інструментом з синтетичних діамантів; надалі зразки промивалися від решток абразивного пилу ультразвуковою мийкою в розчині етилового спирту протягом 5–10 хв.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати оцінки комплексу механічних характеристик нагрітого металу жаротривких і жароміцних ніклевих стопів у стані «*as built*» представлено в табл. 2.

Аналіза результатів свідчить, що за комплексом механічних характеристик, зокрема за показником критичної руйнівної деформації за 1000°C (рис. 4), досліджений нагрітий метал можна поділити на 3 групи, дві з яких в основному збігаються з традиційним поділом відповідних ніклевих стопів за хемічним складом, що характеризується кількісним вмістом основних леґувальних елементів: Al, Ti, Nb, Ta, W, здатних за певної їхньої кількості утворювати γ' -фазу, тобто реалізовувати механізм дисперсного зміцнення, та за їхнім призначенням за показником жароміцності [30–32]. До першої групи належить нагрітий метал жаротривких (Hastelloy C22, Inconel 625, ЭП648) та деформованого (Inconel 718) ніклевих стопів; до другої — жароміцні ніклеві стопи (Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32).

До третьої групи можна віднести нагрітий метал, який за окремими механічними характеристиками відрізняється від типових їхніх значень у першій (ЧС40) або другій (Inconel 939, Renè 80) групі.

Встановлено, що особливістю формування нагрітого металу стопів на основі ніклю, незалежно від обраного способу дугового нагрівання, є, як правило, до 2–3 разів пониження в ньому вмісту Оксигену порівняно з вихідним присадним матеріалом у формі дроту або присадного порошку. Водночас значних змін вмісту Нітроге-

ну не зафіксовано.

Зазначений ефект можна пояснити як відомим рафінувальним ефектом плазово-дугового перетоплення металів і стопів [33, 34], так і руйнуванням в процесі топлення присадного порошку у зва-

ТАБЛИЦЯ 2. Результати механічних випробувань нагрітого металу ніклевих жаротривких і жароміцних стопів за 20°C у стані «as built» на поздовжній статичний розтяг, статичне й ударне загинання в залежності від $C_{CB[O]}$ і $C_{CB[N]}$ у присадному матеріалі та відповідному нагрітому металі.

TABLE 2. Mechanical test results for heat-resistant and high-temperature strength nickel-based superalloys-deposited metal at 20°C in structural state ‘as built’, including longitudinal static tensile test, static and impact bending, depending on the $C_{CB[O]}$ and $C_{CB[N]}$ impurities’ average weight content in filler and respective deposited metal.

№	Присадний матеріал/ спосіб нагрівання	Виробник, орієнтовний рік виготовлення	Порошок або дріт		Нагрітий метал		Нагрітий метал за 20°C				
			$C_{CB[O]}$, % ваг.	$C_{CB[N]}$, % ваг.	$C_{CB[O]}$, % ваг.	$C_{CB[N]}$, % ваг.	β , °	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ , %	KCU , Дж/см ²
1	Hastelloy C22/МПН	Hermius LTD, China, 2019	0,1586	0,0538	0,0515	0,0585	90	369	521	6,8	24,5
2	Hastelloy C22/МПН	Carpenter, USA, 2003	0,0427	0,0625	0,0140	0,0633	180	396	625	10,7	59,9
3	Inconel 625/МПН	Castolin Eutectic, 2008	0,0298	0,0692	0,0194	0,0660	180	321	673	57,6	171,1
4	Inconel 625/АДН	Bibus Metals, 2010	0,0071	0,0097	0,0001	0,0009	180	401	709	60,8	134,7
5	Inconel 625/МПН	УкрНДІспецсталь, 2016	0,0210	0,0028	0,0126	0,022	180	365,2	687,4	57	164,7
6	Inconel 718/АДН	Bibus Metals, 2010	0,0120	0,0070	0,010	0,0058	180	436	722	35,9	87,9
7	ЧС40/МПН	УкрНДІспецсталь, 2005	0,0251	0,0242	0,0217	0,0212	180	508	930	49,2	108,3
8	ЭП648/МПН	АТ «Мотор Січ», 2019	0,0475	0,2120	0,0249	0,2008	180	380	657	26	59,5
9	Inconel 939/МПН	Amperit, 2003	0,0149	0,0114	0,0166	0,0085	29	915	1063	3,6	27,6
10	Renè 80/МПН	УкрНДІспецсталь, 2002	0,0062	0,0011	0,0053	0,0055	35	950	1061	3,1	27,2
11	Inconel 738LC/МПН	УкрНДІспецсталь, 1999	0,007	0,0022	0,0042	0,0037	35	950	1096	4,8	34,2
12	ЖС6К/МПН	УкрНДІспецсталь, 2016	0,0069	0,0007	0,0049	0,0040	16,5	1004	1004	0,5	21,4
13	ЖС6У/МПН	УкрНДІспецсталь, 2008	0,0106	0,0007	0,0107	0,0048	27,5	938,5	1002,1	2,25	15,7
14	ЖС32/МПН	УкрНДІспецсталь, 2008	0,0087	0,0017	0,0046	0,0039	13,5	981	1006	0,8	11,2

Продовження таблиці 2.

Continuation of Table 2.

№	Присадний матеріал/спосіб нагрівання	Виробник, орієнтовний рік виготовлення	Нагрітий метал за 1000°C			Нагрітий метал за 1100°C		
			$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ε , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ε , %
1	Hastelloy C22/МПН	Hermius LTD, China, 2019	109	115	4,4	57	66	6,2
2	Hastelloy C22/МПН	Carpenter, USA, 2003	128	129	12,4	69	70	5,6
3	Inconel 625/МПН	Castolin Eutectic, 2008	132	133	11	88,2	88,8	3,8
4	Inconel 625/АДН	Bibus Metals, 2010	98	111	48	60	64	40,8
5	Inconel 625/МПН	УкрНДІспецсталь, 2016	104,3	121	43,2	61,5	83,7	37,8
6	Inconel 718/АДН	Bibus Metals, 2010	95	102	40	56	58	46,6
7	ЧС 40/МПН	УкрНДІспецсталь, 2005	99	102	40	62	64	19,1
8	ЭП 648/ МПН	АТ «Мотор Січ», 2019	87	95	9	49	56	10
9	Inconel 939/МПН	AMPERIT, 2003	277,5	282,5	1,95	52	62	21,0
10	Renè 80/ МПН	УкрНДІспецсталь, 2002	420,5	426,3	1,9	214,8	218,2	1,4
11	Inconel 738LC/МПН	УкрНДІспецсталь, 1999	369	374	0,65	181	183,5	0,7
12	ЖС6К/ МПН	УкрНДІспецсталь, 2016	–	386,5	0,65	–	256	0,1
13	ЖС6У/ МПН	УкрНДІспецсталь, 2008	–	362,5	0,15	241,2	243,6	0,41
14	ЖС32-ІЕЗ/ МПН	УкрНДІспецсталь, 2008	–	345	0,1	–	240	0,1

ривальній ванні присутнього на поверхні його частинок шару зі збільшеною концентрацією домішок Оксигену [35] та виведенням його хемічних сполук у оксидну плівку на поверхні нагрітого валика [36].

Показано, що протестований комплексом механічних випробувань нагрітий метал ніклевих жаротривких і деформованих ніклевих стопів і віднесений до першої групи за кімнатної температури у стані безпосередньо після нагрівання характеризується значеннями границі плинності $\sigma_{0,2} = 321\text{--}436$ МПа, границі міцності $\sigma_B = 521\text{--}722$ МПа, руйнівної деформації $\varepsilon = 6,8\text{--}60,8\%$, а також значеннями критичного кута загинання $\beta = 90\text{--}180^\circ$ та показника ударної в'язкості $KCU = 24,6\text{--}171,1$ Дж/см². За 1000°C такий метал характеризується значеннями границі плинності $\sigma_{0,2} = 87\text{--}132$ МПа, границі міцності $\sigma_B = 95\text{--}133$ МПа, руйнівної деформації $\varepsilon = 4,4\text{--}48\%$, за 1100°C — значеннями границі плинності $\sigma_{0,2} = 49\text{--}88,2$ МПа, границі міцності $\sigma_B = 56\text{--}88,8$ МПа, руйнівної деформації $\varepsilon = 3,8\text{--}46,6\%$.

Аналіза дослідженої вибірки нагрітого металу першої групи показує, що впливовими чинниками пониження деформаційної здатності за 20° за показниками критичної деформації під час подовжнього статичному розтягу ε , максимального кута статичного загинання й ударної в'язкості є високий вміст в ньому (див. табл. 2): Оксигену

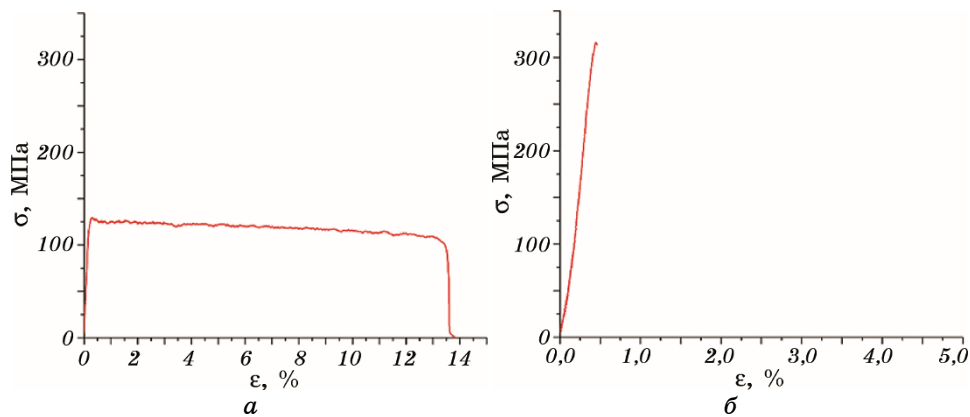


Рис. 4. Приклади типового вигляду діаграм випробувань нагрітого металу у стані «as built» на поздовжній статичній розтяг при температурі 1000°C: ступу Hastelloy C22 (перша група, табл. 2 поз. 2) (а), ступу ЖС6К (друга група, табл. 2, поз. 12) (б).

Fig. 4. Examples of typical testing diagrams for deposited metal in ‘as built’ structural state during longitudinal static tensile test at 1000°C: Hastelloy C22 (group 1, Table 2, pos. 2) (a), ЖС6К (group 2, Table 2, pos. 12) (b).

$C_{CB[O]} \cong 0,052\%$ ваг., і це — нагрітий метал ступу Hastelloy C22 з $\varepsilon = 6,8\%$, $\beta = 90^\circ$, $KCU = 24,5$ Дж/см²; Нітрогену $C_{CB[N]} \cong 0,21\%$ ваг., і це — нагрітий метал ступу ЭП648 з $\varepsilon = 26\%$, $\beta = 180^\circ$, $KCU = 59,5$ Дж/см².

В умовах поєднання в нагрітому металі Inconel 625, Inconel 718, ЧС40 обмежень середньовагового вмісту Оксигену та Нітрогену $C_{CB[O]}$, $C_{CB[N]} \leq 0,022\%$ ваг. величина критичної руйнівної деформації за високих температур зберігається підвищеною та становить: за 1000°C — $\varepsilon = 40-48\%$, за 1100°C — $\varepsilon = 19-46,6\%$. Із зростанням в нагрітому металі Inconel 625 та Hastelloy C22 вмісту Нітрогену до $C_{CB[N]} = 0,063-0,067\%$ ваг. зі збереженням обмеженого вмісту Оксигену $C_{CB[O]} = 0,014-0,019\%$ ваг. зафіксовано істотне пониження величини критичної руйнівної деформації: за 1000°C — $\varepsilon = 11-12,4\%$, за 1100°C — $\varepsilon = 3,8-5,6\%$. Найбільші пониження величини руйнівної деформації ε під час випробувань на поздовжній розтяг 1000–1100°C спостерігаються (див. табл. 2): для нагрітого металу ЭП648 (МПН) із підвищеним середньоваговим вмістом Нітрогену $C_{CB[N]} = 0,201\%$ ваг. зі збереженням обмеженого вмісту Оксигену $C_{CB[O]} = 0,025\%$ ваг. — $\varepsilon = 9-10\%$; для нагрітого металу Hastelloy C22 (МПН) зі зростанням середньовагового вмісту Оксигену до рівня $C_{CB[O]} = 0,052\%$ ваг. навіть за деякого пониження вмісту Нітрогену $C_{CB[N]} = 0,059\%$ ваг. — $\varepsilon = 4,4-6,2\%$; для нагрітого металу Inconel 625 зі зростанням середньовагового вмісту Оксигену до рів-

ня $C_{\text{св[O]}} = 0,0194\%$ ваг. за вмісту Нітрогену $C_{\text{св[N]}} = 0,066\%$ ваг. — $\varepsilon = 3,8-11\%$.

Таким чином показано, що для відповідного нагрітого металу жаротривких стопів на ніклевій основі обмеження $C_{\text{нм[O]}}$, $C_{\text{св[N]}} \leq 0,020-0,025\%$ ваг. можуть значним чином поліпшувати показники його високотемпературної пластичності за $T = 1000-1100^\circ\text{C}$.

Встановлено, що нагрітий метал ніклевих жароміцних стопів Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32, віднесений до другої групи, за кімнатної температури у структурному стані безпосередньо після нагрівання характеризується вищими значеннями міцності та значно меншою деформаційною здатністю порівняно з нагрітим металом ніклевих жаротривких і деформованих ніклевих жароміцних стопів. Його значення границі плинності складають $\sigma_{0,2} = 938-1004$ МПа, границі міцності — $\sigma_B = 1022-1096$ МПа, критичної руйнівної деформації — як правило, $\varepsilon \leq 2,5\%$, а значення критичного кута загинання складають $\beta = 13,5-33,5^\circ$, показника ударної в'язкості — $KCU = 11,5-34,2$ Дж/см². Зазначені характеристики показників короткочасної міцності за кімнатної температури, окрім величини критичної руйнівної деформації ε , відповідають опублікованим даним на литі ніклеві жароміцні стопи ЖС6К, ЖС6У, ЖС32 [31, 37], а за показником ударної в'язкості — даним по ніклевому жароміцному стопу ЖС6К [38]. За 1000°C нагрітий метал цих ніклевих жароміцних стопів характеризується значеннями границі міцності $\sigma_B = 345-386,5$ МПа, руйнівної деформації — $\varepsilon \leq 0,65\%$; за 1100°C — значеннями границі міцності $\sigma_B = 183,5-256$ МПа, руйнівної деформації — $\varepsilon \leq 0,7\%$. Визначений діапазон значень границі міцності σ_B нагрітого металу ЖС6К, ЖС6У, ЖС32 за 1000 і 1100°C у стані «as built» знаходиться на рівні $0,5-0,7$ відносно опублікованих даних з короткочасних механічних властивостей відповідних литих ніклевих жароміцних стопів [31, 37] та має значно меншу високотемпературну пластичність. Встановлені шляхом випробувань на поздовжній статичний розтяг для нагрітого металу другої групи значення критичної руйнівної деформації ε за 1000 і 1100°C є близькими до попередньо визначених [21, 22] для литих ніклевих жароміцних стопів за стандартизованою методикою Varestraint test [39].

Відмітимо, що для мікроплазмового порошкового нагрівання ніклевих жароміцних стопів Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32 застосовували високоякісні присадні порошки виробництва УкрНДІспецсталь з обмеженим вмістом Оксигену $C_{\text{св[O]}} < 0,011\%$ ваг. та Нітрогену $C_{\text{св[N]}} < 0,0025\%$ ваг., які за цими показниками знаходяться на рівні відомих світових аналогів [40, 41]. Відповідно, в такому нагрітому металі порівняно з деякими видами нагрітого металу жаротривких стопів другої групи було досягнуто достатньо низький середньоваговий вміст Оксигену $C_{\text{св[O]}} \cong 0,004-0,006\%$ ваг.

і Нітрогену $C_{\text{св[N]}} \cong 0,0037-0,0055\%$ ваг., що орієнтовно відповідав умовам АДН із застосуванням присадного дроту. Проте, навіть за такого низького рівня вмісту Оксигену та Нітрогену, що близький до умов вакуумно-індукційної витопки жароміцних ніклевих стопів [42], в нагрітому металі стопів Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32 за температур у 1000 і 1100°C є присутнім малопластичний стан із $\varepsilon \leq 0,65-0,7\%$.

До третьої «перехідної» групи авторами віднесено нагрітий метал стопів ЧС40, Inconel 939, René 80 через нетипові значення певних показників їхніх механічних характеристик. Для нагрітого металу ЧС40 — це $\sigma_B = 930$ МПа за 20°C, що є близьким до діапазону значень границі міцності ніклевих жароміцних стопів. Для нагрітого металу Inconel 939 та René 80 — це рівень критичної руйнівної деформації $\varepsilon = 1,5-2,0\%$ за 1000 та 1100°C, помітно вищий порівняно з нагрітим металом високожароміцних ніклевих жароміцних стопів типу Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32. Достатньо високий для нагрітого металу ніклевих жароміцних стопів Inconel 939, René 80 рівень критичної руйнівної деформації $\varepsilon = 1,5-2,0\%$ за 1000 та 1100°C співвідноситься з практичною можливістю виконання бездефектних 3D-нагріть певних об'ємів матеріалу, що підтверджується як власними дослідно-практичними роботами (рис. 5), так і опублікованими даними [43, 44]. Таким чином, показано, що протестований механічними випробуваннями нагрітий метал жаротривких (Inconel 625, Hastelloy C22, ЭП648,

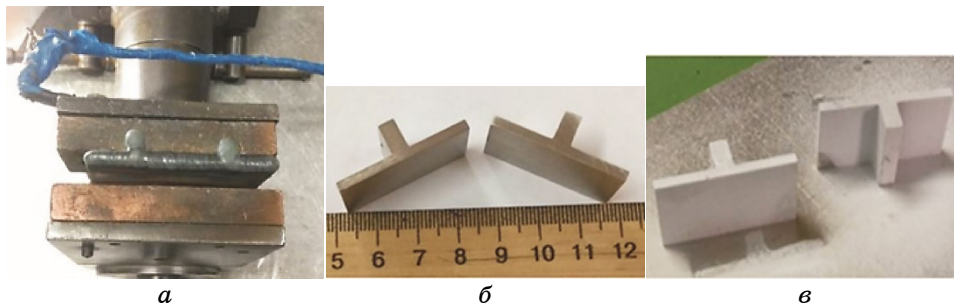


Рис. 5. Приклад дослідно-практичного опробування 3D-нагріть заготовок ремонтних вставок зі стопів René 80 та Inconel 939 об'ємом $\cong 20$ см³: в процесі багат шарового МПН (а), окремі ремонтні вставки після механічного оброблення шліфуванням (б), окремі ремонтні вставки після капілярного контролю, зокрема після наступних технологічних нагріть (в).

Fig. 5. Example of experimental and practical testing of 3D-deposition on workpieces of René 80 and Inconel 939 repair inserts with $\cong 20$ cm³ volume: during multilayer microplasma powder deposition (a), separate repair inserts after polishing (b), separate repair inserts after capillary control, particularly, after subsequent heat treatments (c).

ЧС40) і деформованих (Inconel 718) ніклевих стопів у стані «as built» за умови обмеження вмісту домішок Оксигену та Нітрогену має високі показники деформаційної здатності, зокрема за температур у 1000 і 1100°C. Відповідно, такі матеріяли за адитивних технологій мають значний потенційний «резерв безпеки» щодо забезпечення технологічної міцности виробу, що дає можливість підвищення тепловкладень і цупкості натопленого виробу. Тобто підвищена пластичність ніклевих жаротривких стопів може конвертуватися у певне зменшення вимог якості за вмістом Оксигену та Нітрогену для відповідних порошкових присадних матеріялів або збільшення конструкційних розмірів адитивного виробу та товщини його стінок, виготовлення деталей із замкненим контуром та ін. Тим самим може досягатися додатковий технічний результат або економічний ефект, наприклад описаний у роботі [6].

З огляду на присутній малопластичний стан у стані «as built», переважно з $\varepsilon \leq 0,65-0,7\%$, встановлений на протестованому механічними випробуваннями натопленому металі ніклевих жароміцних стопів Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32, такий «резерв безпеки» щодо забезпечення технологічної міцности адитивного виробу, на відміну від натопленого металу розглянутих жаротривких і деформованих ніклевих стопів, є достатньо незначним. Тому навіть відносно невеликі збільшення тепловкладень у виріб, необхідні для забезпечення нормального формування натопленого металу за підвищеного вмісту Оксигену [41, 45], або збільшена цупкість натопленого виробу [19] легко приводять до перевищення діючими зварювальними деформаціями деформаційної здатности такого натопленого металу. Відповідно, водночас у процесі багат шарового натоплення формуються тріщини повторного нагріву [41, 45], на думку авторів статті, переважно за механізмом ductility dip cracking [7, 46]. Аналіза попередньо опублікованих робіт [17, 28, 41, 45] дає змогу приблизно оцінити практично можливий на робочих лопатках авіаційних газотурбінних двигунів максимальний об'єм бездефектних натоплень ніклевих жароміцних стопів типу ЖС6 та ЖС32 як у декілька см³.

Натоплений метал третьої перехідної групи — ніклевих жароміцних стопів Inconel 939 та René 80 з огляду на вищий встановлений рівень критичної руйнівної деформації $\varepsilon = 3,1-3,6\%$ за 20°C та $\varepsilon = 1,5-2,0\%$ за 1000 та 1100°C порівняно з натопленим металом типу Inconel 738LC, ЖС6, ЖС32, очевидно, має дещо вищий «резерв безпеки» щодо забезпечення технологічної міцности адитивного виробу, який за [43, 44] можливо конвертувати у практичний результат виготовлення адитивного виробу відносно невеликих розмірів. Висновки авторів даної роботи щодо правомірности виділення окремого класифікаційного поділу для натопленого металу ніклевих жароміцних стопів типу Inconel 939 та René 80 можна також підтвердити нещодавно опублікованою роботою [47], де, з одного боку, підтверджено присут-

ність у натопленому металі Inconel 939, одержаного за адитивною технологією селективного лазерного стоплення, проявів схильності до утворення тріщин, а з іншого, — підтверджено можливість їхнього уникнення за рахунок певної корекції його хемічного складу.

4. ВИСНОВКИ

1. Прогнозування технологічної міцності виробу за його виготовлення шляхом застосування адитивних технологій 3D-натоплення залежить від співвідношень у системі взаємочину в процесі перебігу зварювального термодформаційного циклу 3 головних чинників: цупкості виробу, рівня діючих деформацій, деформаційної здатності натопленого металу. В свою чергу, водночас важливу роль набуває уточнення деформаційної здатності багатошарового натопленого металу, одержаного шляхом адитивних технологій, яка може бути як значно більшою, так і значно меншою відносно нікелевого стопу, одержаного за традиційними технологіями.

2. З позицій протидії відомому механізму утворення тріщин ductility dip cracking у зварних з'єднаннях нікелевих стопів запропоновано і верифіковано методику оцінки придатності присадного матеріалу нікелевого стопу для застосування у технологіях 3D-натоплення. Вона полягає у підготовці багатошаровим натопленням зварної заготовки «вертикальна стінка», її капілярному контролі після механічного оброблення бокових поверхонь натоплених валиків і проведенні у структурному стані «as built» оціночних механічних випробувань на поздовжній статичний розтяг (20, 1000, 1100°C), статичне та ударне загинання (20°C).

3. Встановлено, що відома хороша здатність натопленого металу жаротривких і деформованих нікелевих стопів до застосування у технологіях 3D-натоплення співвідноситься з його високою деформаційною здатністю. Вона характеризується наступними показниками: величиною критичної руйнівної деформації $\varepsilon = 19\text{--}61\%$, кутом статичного загинання $\beta = 180^\circ$ без утворення тріщин та ударної в'язкості $KCU = 88,0\text{--}171$ Дж/см², що спостерігаються за обмеженого середньовагового вмісту Оксигену та Нітрогену до 0,025% ваг.

4. Негативний вплив подальшого збільшення вмісту Оксигену (переважно) та Нітрогену в такому натопленому металі полягає у пониженні деформаційної здатності натопленого металу: критична руйнівна деформація ε за 1000 і 1100°C — у 3–10 разів, максимальний кут статичного загинання за 20°C — у 2 рази, ударна в'язкість за 20°C — $KCU < 60$ Дж/см². Тому задля вибору присадних порошоків для адитивних технологій рекомендовано не перевищувати в них середньоваговий вміст домішок Оксигену понад 0,03–0,05% ваг., Нітрогену — понад 0,07% ваг.

5. Показано, що відомі проблеми із забезпеченням технологічної

міцності багат шарового нагрітого металу ніклевих високожароміцних стопів із вмістом зміцнювальної γ' -фази більше 45–50% об. у технологіях 3D-нагрітня, зокрема утворення тріщин за механізмом ductility dip cracking, співвідносяться з його малопластичним станом безпосередньо після нагрітня. Обмежена деформаційна здатність нагрітого металу Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32 зберігається навіть за достатньо низького середньовагового вмісту Оксигену та Нітрогену $C_{\text{св[O]}} \cong 0,004\text{--}0,006\%$ ваг. і $C_{\text{св[N]}} \cong 0,0037\text{--}0,0055\%$ ваг. Вона характеризується значеннями критичної руйнівної деформації за 20°C $\varepsilon \leq 4,8\%$, за 1000 і 1100°C — $\varepsilon \leq 0,7\%$, кута статичного загинання до утворення тріщини $\beta = 13,5\text{--}27,5^\circ$ і показника ударної в'язкості $KCU = 11,2\text{--}34,2$ Дж/см².

6. Нагрітий метал Inconel 939, Renè 80 віднесено до перехідної групи між ніклевими високожароміцними стопами та жаротривкими і деформованими стопами. Його деформаційна здатність за обмеженого середньовагового вмісту Оксигену до 0,012% ваг. і Нітрогену до 0,0085% ваг. безпосередньо після нагрітня характеризується: значеннями критичної руйнівної деформації за 20°C — $\varepsilon = 3,1\text{--}3,6\%$, за 1000 і 1100°C — $\varepsilon = 1,4\text{--}1,95\%$, кута статичного загинання до утворення тріщини — $\beta = 29\text{--}35^\circ$ і показника ударної в'язкості — $KCU = 27,2\text{--}35$ Дж/см². Підвищена величина критичної руйнівної деформації за 1000 і 1100°C порівняно з нагрітим металом типу Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32 співвідноситься з експериментально підтвердженою можливістю вирощування багат шаровим мікроплазмовим порошковим нагрітням бездефектних адитивних виробів з об'ємом нагрітого металу у $\cong 20$ см³.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing* (New York: Springer Science + Business Media: 2015).
2. D. Gu, *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag: 2015).
3. М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш, *Аддитивные технологии в машиностроении* (Москва: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»: 2015).
4. H. Wang, W. Jiang, M. Valant, and R. Kovacevic, *Proc. Institution of Mechanical Eng. B. J Eng. Manufacture*, **217**, Iss. 12: 1641 (2003).
5. V. Korzhyk, V. Khaskin, O. Voitenko, V. Sydorets, and O. Dolianovskaia, *Material. Sci. Forum*, **906**: 121 (2017).
6. С. Л. Чигилейчик, І. А. Петрик, О. В. Овчинников, С. В. Кирилах, *Авіаційно-космічна техніка та технологія*, **177**, № 1: 57 (2022).
7. *ISO 17641-1:2004. Destructive Tests on Welds in Metallic Materials—Hot Cracking Tests for Weldments—Arc Welding Processes. Part 1* (ISO copyright office: 2004).

8. Г. Б. Талыпов, *Сварочные деформации и напряжения* (Ленинград: Машиностроение: 1973).
9. В. И. Махненко, *Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций* (Киев: Наукова думка: 1976).
10. Y.-C. Hagedorn, J. Risse, W. Meiners, N. Pirch, K. Wissenbach, and R. Poprawe, *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping* (Eds. P. J. Bartolo, A. C. S. de Lemos, A. M. H. Pereira, A. J. Dos Santos Mateus, C. Ramos, C. Dos Santos, D. Oliveira, E. Pinto, F. Craveiro, H. M. C. da Rocha Terreiro Galha Bartolo, H. Almeida, I. Sousa, J. Matias, L. Duraõ, M. Gaspar, N. M. F. Alves, P. Carreira, and T. Ferreira, T. Marques) (CRC Press: 2013), p. 291.
11. Е. А. Лукина, К. О. Базалеева, Н. В. Петрушин, Е. В. Цветкова, *Цветные металлы*, № 3: 55 (2016).
12. Н. В. Петрушин, А. Г. Евгенов, А. Г. Тренников, А. В. Заводов, *Материалы III Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (23 марта, 2017)* (Москва: 2017), с. 271.
13. J. S. Zuback and T. DebRoy, *Materials*, No. 11: 2070 (2018).
14. J.-U. Park, S.-Y. Jun, B. H. Lee, J. H. Jang, B.-S. Lee, H.-J. Lee, J.-H. Lee, and H.-U. Hong, *Additive Manufacturing*, 52, No. 4: 102680 (2022)
15. О. С. Воденнікова, М. О. Коваль, С. А. Воденніков, *Металознавство та обробка металів*, 28, № 2: 12 (2022).
16. O. S. Vodennikova, M. O. Koval, and S. A. Vodennikov, *Металлофіз. новейшие технол.*, 43, № 7: 925 (2021).
17. К. А. Ющенко, Г. В. Звягінцева, О. В. Яровицин, М. О. Черв'яков, Г. Д. Хрущов, І. Р. Волосатов, *Металлофіз. новітні технол.*, 41, № 10: 1345 (2019).
18. О. В. Яровицин, *Металознавство та обробка металів*, 26, № 2: 38 (2020).
19. К. А. Yushchenko, O. V. Yarovitsyn, O. O. Nakonechnyi, I. R. Volosatov, O. O. Fomakin, and G. D. Khrushchov, *The Paton Welding J.*, No. 11: 25 (2020).
20. *ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств* (Москва: 2006).
21. К. А. Yushchenko, V. S. Savchenko, L. V. Chervyakova, S. David, and J. Vitek, *The Paton Welding J.*, No. 6: 2 (2005).
22. І. А. Петрик, *Процеси відновлення зварюванням та паянням лопаток газотурбінних двигунів з важкозварюваних сплавів на нікелевій та титановій основі* (Автореф. дис. ... канд. техн. наук) (Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України: 2007).
23. *ISO 4491-4:2013(E). Metallic Powders—Determination of Oxygen Content Reduction Methods—Part 4. Total Oxygen by Reduction-Extraction* (ISO copyright office: 2013).
24. *ASTME E1019-11. Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques* (ASTM International: 2011).
25. *EN ISO 14175-2008. Welding Consumables—Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes* (ISO copyright office: 2008).
26. М. Ю. Каховський, А. В. Гуляев, О. В. Яровицин, М. О. Черв'яков, *Озброєння та військова техніка*, 12, № 4: 61 (2016).
27. A. V. Yarovitsyn, K. A. Yushchenko, A. A. Nakonechny, and I. A. Petrik, *The*

- Paton Welding J.*, No. 6: 31 (2009).
28. К. А. Yushchenko, A. V. Yarovitsyn, N. O. Chervyakov, A. V. Zvyagintseva, I. R. Volosatov, and G. D. Khrushchov, *The Paton Welding J.*, No. 7: 29 (2019).
 29. *ISO/ASTM 52900:2015(E). Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology* (ISO copyright office: 2015).
 30. Ч. Симс, Н. Столлов, В. Хагель, *Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок* (Москва: Металлургия: 1995).
 31. С. Т. Кишкин, *Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов* (Москва: Наука: 2006).
 32. R. C. Reed, *The Superalloys Fundamentals and Applications* (Cambridge: Cambridge University Press: 2006).
 33. В. И. Лакомский, *Плазменно-дуговой переплав* (Ред. Б. Е. Патон) (Київ: Техніка: 1974).
 34. А. А. Ерохин, *Плазменно-дуговая плавка металлов и сплавов. Физико-химические процессы* (Москва: Наука: 1978).
 35. О. В. Яровицин, А. В. Микитчик, *Металлофіз. новітні технол.*, **43**, № 4: 519 (2021).
 36. К. А. Yushchenko and A. V. Yarovitsyn, *The Paton Welding J.*, No. 6–7: 115 (2014).
 37. В. П. Кузнецов, В. П. Лесников, И. П. Конакова, *Структура и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЭ2-ВИ* (Екатеринбург: Квист: 2010).
 38. *Марочник сталей и сплавов* (Ред. А. С. Зубченко) (Москва: Машиностроение: 2003).
 39. *ISO/TR 17641-3:2005. Destructive Tests on Welds in Metallic Materials—Hot Cracking Tests for Weldments—Arc Welding Processes. — Part 3. Externally Loaded Tests* (ISO copyright office: 2005).
 40. А. Г. Евгенов, С. В. Неруш, С. А. Василенко, *Труды ВИАМ*, № 5 (2014).
 41. С. В. Неруш, А. С. Ермолаев, А. М. Рогалев, С. А. Василенко, *Труды ВИАМ*, № 8 (2016).
 42. *ТУ 1-92-177-91. Заготовка шихтовая мерная литейных жаропрочных сплавов вакуумной выплавки. Изменение № 5.*
 43. R. Acharya, J. J. Gambone, M. A. Kaplan, G. E. Fuchs, N. G. Rudawski, and S. Das, *Adv. Eng. Mater.*, **17**, Iss. 7: 942 (2015).
 44. *EOS Nickel Alloy IN939 Material Data Sheet*
https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/nickelalloy-inconel/material_datasheet_eos_nickelalloy_in939_premium_en_web.pdf
 45. К. А. Ющенко, О. В. Яровицин, Г. Д. Хрущов, І. А. Петрик, С. Л. Чигилейчик, *Космічна наука і технологія*, **28**, № 3: 3 (2022).
 46. J. C. Lippold, *Welding Metallurgy and Weldability* (John Willey and Sons: 2015).
 47. Y. T. Tang, C. Panwisawas, J. N. Ghossoub, Y. Gong, J. W. G. Clark, A. A. N. Németh, D. G. McCartney, and R. C. Reed, *Acta Mater.*, **202**, No. 1: 417 (2021).

REFERENCES

1. I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing* (New York: Springer Science + Business Media: 2015).

2. D. Gu, *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag: 2015).
3. M. A. Zlenko, M. V. Nagaytsev, and V. M. Dovbysh, *Additivnye Tekhnologii v Mashinostroenii* [Additive Technologies in Mechanical Engineering] (Moskva: GNTs RF FGUP 'NAMI': 2015) (in Russian).
4. H. Wang, W. Jiang, M. Valant, and R. Kovacevic, *Proc. Institution of Mechanical Eng. B. J Eng. Manufacture*, **217**, Iss. 12: 1641 (2003).
5. V. Korzhyk, V. Khaskin, O. Voitenko, V. Sydorets, and O. Dolianovskaia, *Material. Sci. Forum*, **906**: 121 (2017).
6. S. L. Chyhlychych, I. A. Petryk, O. V. Ovchynnykov, and S. V. Kyrylakha, *Aviatsiyno-Kosmichna Tekhnika ta Tekhnolohiya*, **177**, No. 1: 57 (2022) (in Ukrainian).
7. *ISO 17641-1:2004. Destructive Tests on Welds in Metallic Materials—Hot Cracking Tests for Weldments—Arc Welding Processes. Part 1* (ISO copyright office: 2004).
8. G. B. Talypov, *Svarochnye Deformatsii i Napryazheniya* [Welding Deformation and Stress] (Leningrad: Mashinostroenie: 1973) (in Russian).
9. V. I. Makhnenko, *Raschetnye Metody Issledovaniya Kinetiki Svarochnykh Napryazheniy i Deformatsiy* [Calculation Methods for Studying the Kinetics of Welding Stresses and Deformations] (Kiev: Naukova Dumka: 1976) (in Russian).
10. Y.-C. Hagedorn, J. Risse, W. Meiners, N. Pirch, K. Wissenbach, and R. Poprawe, *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping* (Eds. P. J. Bartolo, A. C. S. de Lemos, A. M. H. Pereira, A. J. Dos Santos Mateus, C. Ramos, C. Dos Santos, D. Oliveira, E. Pinto, F. Craveiro, H. M. C. da Rocha Terreiro Galha Bartolo, H. Almeida, I. Sousa, J. Matias, L. Durao, M. Gaspar, N. M. F. Alves, P. Carreira, and T. Ferreira, T. Marques) (CRC Press: 2013), p. 291.
11. E. A. Lukina, K. O. Bazaleeva, N. V. Petrushin, and E. V. Tsvetkova, *Tsvetnyye Metally*, No. 3: 55 (2016) (in Russian).
12. N. V. Petrushin, A. G. Evgenov, A. G. Trennikov, and A. V. Zavodov, *Materialy III Mezhdunarodnoy Konferentsii 'Additivnye Tekhnologii: Nastoyashchee i Budushchee' (March 23, 2017)* (Moskva: 2017), p. 271 (in Russian).
13. J. S. Zuback and T. DebRoy, *Materials*, No. 11: 2070 (2018).
14. J.-U. Park, S.-Y. Jun, B. H. Lee, J. H. Jang, B.-S. Lee, H.-J. Lee, J.-H. Lee, and H.-U. Hong, *Additive Manufacturing*, **52**, No. 4: 102680 (2022).
15. O. S. Vodennikova, M. O. Koval', and S. A. Vodennikov, *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, **28**, No. 2: 12 (2022) (in Ukrainian).
16. O. S. Vodennikova, M. O. Koval, and S. A. Vodennikov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 7: 925 (2021).
17. K. A. Yushchenko, H. V. Zvyahintseva, O. V. Yarovytsyn, M. O. Cherv'yakov, H. D. Khrushchov, and I. R. Volosatov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 10: 1345 (2019) (in Ukrainian).
18. O. V. Yarovytsyn, *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, **26**, No. 2: 38 (2020) (in Ukrainian).
19. K. A. Yushchenko, O. V. Yarovytsyn, O. O. Nakonechnyi, I. R. Volosatov, O. O. Fomakin, and G. D. Khrushchov, *The Paton Welding J.*, No. 11: 25 (2020).
20. *ГОСТ 6996-66. Svarnye Soedineniya. Metody Opredeleniya Mekhanicheskikh*

- Svoystv* [ГОСТ 6996-66. Welded Joints. Methods to Determine Mechanical Properties] (Moskva: 2006) (in Russian).
21. K. A. Yushchenko, V. S. Savchenko, L. V. Chervyakova, S. David, and J. Vitek, *The Paton Welding J.*, No. 6: 2 (2005).
 22. I. A. Petryk, *Protsesy Vidnovlennya Zvaryuvannyam ta Payannyam Lopatok Hazoturbinnnykh Dvyhunyiv z Vazhkozvaryuvanykh Splaviv na Nikeleviy ta Tytanoviy Osnovi* [Processes of Restoration of Gas Turbine Engine Blades Made of Nickel- and Titanium-Based Hard-to-Weld Alloys by Welding and Brazing] (Thesis of Dissert. for PhD Techn. Sci.) (Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine: 2007) (in Ukrainian).
 23. *ISO 4491-4:2013(E). Metallic Powders—Determination of Oxygen Content Reduction Methods—Part 4. Total Oxygen by Reduction-Extraction* (ISO copyright office: 2013).
 24. *ASTME E1019-11. Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques* (ASTM International: 2011).
 25. *EN ISO 14175-2008. Welding Consumables—Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes* (ISO copyright office: 2008).
 26. M. Yu. Kakhov's'kyi, A. V. Hulyayev, O. V. Yarovytsyn, and M. O. Cherv'yakov, *Ozbroyennya ta Viys'kova Tekhnika*, 12, No. 4: 61 (2016) (in Ukrainian).
 27. A. V. Yarovytsyn, K. A. Yushchenko, A. A. Nakonechny, and I. A. Petrik, *The Paton Welding J.*, No. 6: 31 (2009).
 28. K. A. Yushchenko, A. V. Yarovytsyn, N. O. Chervyakov, A. V. Zvyagintseva, I. R. Volosatov, and G. D. Khrushchov, *The Paton Welding J.*, No. 7: 29 (2019).
 29. *ISO/ASTM 52900:2015(E). Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology* (ISO copyright office: 2015).
 30. Ch. Sims, N. Stollov, and V. Khagel', *Supersplavy II. Zharoprochnye materialy dlya aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok* [Superalloys II: High Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power Applications] (Moskva: Metallurgiya: 1995) (in Russian).
 31. S. T. Kishkin, *Sozdanie, Issledovanie i Primenenie Zharoprochnykh Splavov* [Creation, Research and Application of High Temperature Strength Alloys] (Moskva: Nauka: 2006) (in Russian).
 32. R. C. Reed, *The Superalloys Fundamentals and Applications* (Cambridge: Cambridge University Press: 2006).
 33. V. I. Lakomskiy, *Plazmenno-Dugovoy Pereplav* [Plasma Arc Remelting] (Ed. B. E. Paton) (Kiev: Tekhnika: 1974) (in Russian).
 34. A. A. Erokhin, *Plazmenno-Dugovaya Plavka Metallov i Splavov. Fiziko-Khimicheskie Protssesy* [Plasma Arc Melting of Metals and Alloys. Physical and Chemical Processes] (Moskva: Nauka: 1978) (in Russian).
 35. O. V. Yarovytsyn and A. V. Mykytchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 4: 519 (2021) (in Ukrainian).
 36. K. A. Yushchenko and A. V. Yarovytsyn, *The Paton Welding J.*, No. 6–7: 115 (2014).
 37. V. P. Kuznetsov, V. P. Lesnikov, and I. P. Konakova, *Struktura i Svoystva Zharoprochnogo Nikelevogo Splava ЖС32-ВІІ* [Structure and Properties of ЖС32-ВІІ High Temperature Strength Alloy] (Ekaterinburg: Kvist: 2010) (in Russian).

38. *Marochnik Staley i Splavov* [Grade List for Steels and Alloys] (Ed. A. S. Zubchenko) (Moskva: Mashinostroenie: 2003) (in Russian).
39. *ISO/TR 17641-3:2005. Destructive Tests on Welds in Metallic Materials—Hot Cracking Tests for Weldments—Arc Welding Processes. — Part 3. Externally Loaded Tests* (ISO copyright office: 2005).
40. A. G. Evgenov, S. V. Nerush, and S. A. Vasilenko, *Trudy VIAM*, No. 5 (2014) (in Russian).
41. S. V. Nerush, A. S. Ermolaev, A. M. Rogalev, and S. A. Vasilenko, *Trudy VIAM*, No. 8 (2016) (in Russian).
42. *ТУ 1-92-177-91. Zagotovka Shikhtovaya Mernaya Liteynykh Zharoprochnykh Splavov Vakuumnoy Vyplavki. Izmenenie No. 5* [ТУ 1-92-177-91. Vacuum-Melt Cast High-Temperature Strength Measurement Charge Billet. Ed. No. 5] (in Russian).
43. R. Acharya, J. J. Gambone, M. A. Kaplan, G. E. Fuchs, N. G. Rudawski, and S. Das, *Adv. Eng. Mater.*, **17**, Iss. 7: 942 (2015).
44. *EOS Nickel Alloy IN939 Material Data Sheet*
https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/nickelalloy-inconel/material_ddatasheet_eos_nickelalloy_in939_premium_en_web.pdf
45. K. A. Yushchenko, O. V. Yarovytsyn, H. D. Khrushchov, I. A. Petryk, and S. L. Chyhyleychyk, *Kosmichna Nauka i Tekhnolohiya*, **28**, No. 3: 3 (2022) (in Ukrainian).
46. J. C. Lippold, *Welding Metallurgy and Weldability* (John Willey and Sons: 2015).
47. Y. T. Tang, C. Panwisawas, J. N. Ghossoub, Y. Gong, J. W. G. Clark, A. A. N. Németh, D. G. McCartney, and R. C. Reed, *Acta Mater.*, **202**, No. 1: 417 (2021).