

## *Закономірності формування структури приповерхневого рекристалізованого шару в процесі відновлювальної термічної обробки нікелевих жароміцних сплавів*

К. А. Ющенко, академік НАН України, доктор технічних наук, професор,  
керівник відділу, [yu.kon@paton.kiev.ua](mailto:yu.kon@paton.kiev.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6276-7843>

О. В. Яровицин, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
[yarovytsyn@ukr.net](mailto:yarovytsyn@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9922-3877>

Т. М. Кушнарьова, науковий співробітник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1920-3118>

В. Є. Мазурак, науковий співробітник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8671-348X>

С. С. Ковальчук, заст. керівника відділу, [kovalchuk@paton.kiev.ua](mailto:kovalchuk@paton.kiev.ua),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1247-6917>

В. В. Куренкова\*, кандидат технічних наук, керівник відділу, [vkurenkova@patontt.com](mailto:vkurenkova@patontt.com),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2084-4820>

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

\*ТОВ «Патон Турбайн Текнолоджіз», Київ

*В сучасних нікелевих жароміцних сплавах типу ЖС32 із спрямованою та монокристалічною структурою на поверхнях, що попередньо піддавались механічній обробці, при наступній ізотермічній витримці в околі температур гомогенізації тривалістю понад 15 хв утворюється приповерхневий рекристалізований шар глибиною до 40-65 мкм у вигляді ланцюга зерен. Формування такого шару є побічним негативним ефектом, що стримував промислове застосування вакуумної термічної обробки з метою усунення наслідків локальної експлуатаційної деградації (рафт-структура) на перегрітих вхідних кромках небандажованих газоохолоджуваних робочих лопаток турбіни високого тиску ряду сучасних авіаційних газотурбінних двигунів. З огляду на технічну складність усунення видалення такого рекристалізованого шару з трактової поверхні тонкостінних газоохолоджуваних лопаток актуальна розробка технологічних заходів з метою переведення границь зерен у його невиданих залишках у більш безпечний з точки зору подальшої експлуатації структурний стан. Методами растрової електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу на фрагментах робочих лопаток турбін високого тиску з НЖС ЖС26-НК з направленою та ЖС32-ВІ з монокристалічною структурою досліджено закономірності формування рекристалізованого шару в процесі 3-х стадійної відновлювальної вакуумної термічної обробки. Встановлено, що рекристалізований шар, який утворюється в процесі витримки 1,25-1,5 год при температурі гомогенізації сплаву, представляє собою ланцюг зерен з*

## Термічна і хіміко-термічна обробка

цільно упакованою  $\gamma'$ -фазою та пограничними прошарками з незміцнюючої  $\gamma'$ -фази шириною до 1-3 мкм і частками карбідної фази. Показано, що ефективним засобами управління структурним станом границь зерен в такому приповерхневому рекристалізованому шарі є раціональний вибір температури високотемпературного старіння. Вибір для ізотермічної витримки сплавів ЖС26 і ЖС32 після гомогенізації температури 1050 °С дозволяє знизити у рекристалізованому шарі ширину границь зерен до 1-2 мкм, зберегти їх переривчастими і уникнути систематичних виділень карбідних фаз по границям зерен. На базі закономірностей утворення і керування структурою приповерхневого рекристалізованого шару, розроблено технологічні рекомендації щодо оптимізації режимів вакуумної термічної обробки для відновлення структури небандажованих газоохолоджуваних робочих лопаток з НЖС типу ЖС32. Технологія пройшла дослідно-практичну перевірку при наступному міжремонтному циклі льотної експлуатації на одному з сучасних турбореактивних двоконтурних двигунів з форсажною камерою згоряння.

**Ключові слова:** нікелеві жароміцні сплави типу ЖС32, вакуумна термічна обробка, відновлення структури матеріалу, приповерхневий рекристалізований шар, растрова електронна мікроскопія.

Відомо [1, 2], що рекристалізація виникає в процесі високотемпературної термічної обробки (гомогенізація і старіння) виробів або заготовок з нікелевих жароміцних сплавів (НЖС) з направленою та монокристалічною структурою як наслідок релаксації наведених напружень, внесених в їх приповерхневі шари попередньою механічною обробкою. Вважається, що утворені внаслідок перебігу цього процесу границі зерен можуть привести до зниження опору повзучості монокристалічної матриці при тривалому навантаженні, а також сприяти зародженню і розповсюдженню тріщин багаточислової втоми.

При виготовленні робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна (ГТД) з направленою та монокристалічною структурою (сплави ЖС26-НК та ЖС32-ВИ відповідно, табл. 1) технологічний процес будується таким чином, щоб після гомогенізаційного ізотермічного відпалу литої заготовки цей шар видалявся при наступних операціях механічної обробки для забезпечення конструктивно заданого профілю [1-3].

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних жароміцних сплавів

Сплав	Масова частка елемента. %													
	C	Cr	Ni	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Ta	Re	Fe	B	V
ЖС26- НК	0,13- 0,18	4,3- 5,6	Осн.	8,0- 10,0	5,5- 6,2	0,8- 1,2	0,8- 1,4	11,0- 12,5	1,4- 1,8	-	-	-	-	0,8- 1,2
ЖС32- ВИ	0,12- 0,18	4,3- 5,6	Осн.	8,0- 10,0	5,6- 6,3	-	0,8- 1,4	7,8- 9,5	1,4- 1,8	3,5- 4,5	3,5- 4,5	<1,0	<0,02	-

В наш час вивчення закономірностей формування структури приповерхневого рекристалізованого шару для НЖС з направленою та монокристалічною структурою набуває актуальності в наступних випадках:

Робота виконана під керівництвом д.т.н. І. С. Малапенко

## Термічна і хіміко-термічна обробка

- при паянні газоохолоджуваних лопаток авіаційних ГТД зі сплавів типу ЖС32 (закриття знакових отворів, зміцнення торців бандажних полиць зносостійкими накладками) [4-5];

- при застосуванні відновлювальної термічної обробки з метою подовження експлуатаційного ресурсу робочих лопаток зі сплавів ЖС26 і ЖС32 турбіни високого тиску (ТВТ) ряду сучасних авіаційних ГТД.

Встановлено [4], що ізотермічний відпал шліфованої поверхні сплаву ЖС32 при температурі більше 1260 °С тривалістю більше 15 хв викликає появу рекристалізованих зерен. Тому при формуванні паяного з'єднання одним з заходів щодо запобігання утворенню рекристалізованого шару рекомендовано зниження температури нагріву і зменшення тривалості ізотермічної витримки.

Застосування вакуумної термічної обробки за режимами гомогенізації та старіння, є одним з найбільш поширених і технічно доступних способів відновлення структури полікристалічних НЖС у промисловості [6-8].

Як відомо [1-3], у НЖС з монокристалічною структурою за умов довготривалого впливу підвищеної температури та прикладених напружень відбувається коагуляція основної зміцнюючої  $\gamma'$ -фази та поступова зміна її морфології, результатом якої є утворення так званої «рафт-структури». Цей тип структури характеризується пластинчастою будовою основної  $\gamma'$ -(Ni<sub>3</sub>Al)-фази, частки якої орієнтовані більшою стороною перпендикулярно до осі прикладених напружень (рис. 1).

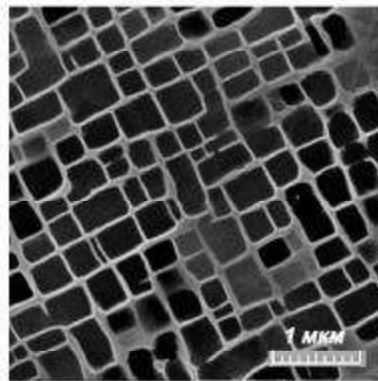
Під час експлуатації робочих лопаток ТВТ авіаційного ГТД найбільшого температурного удару зазнає її вхідна кромка, яка першою сприймає тепловий потік, що передається статором. Основними ознаками її перегріву є трансформація щільно упакованої кубоїдної  $\gamma'$ -фази розміром менше 0,5 мкм (рис. 1 б) у скоагульовану та збільшену у розмірах до 5-25 мкм фазу (рис. 1 в). Залежно від ступеня температурного впливу і температурних градієнтів (напружень) рафт-структура, що утворюється, відрізняється залежно від етапів повзучості. Спочатку це чітко орієнтовані пластини (рис. 1 в), які з часом (на прискореній стадії повзучості) значно погрублюються, можуть викривлятися та перетворюватися у розорієнтовані скоагульовані окремі частки  $\gamma'$ -фази, розділені великими проміжками твердого матричного розчину  $\gamma$ -фази. Наявність локальних зон огрубілої та трансформованої зміцнюючої  $\gamma'$ -фази, що зумовлює зниження жароміцності та підвищення конструкційної крихкості, може призводити до руйнування пера лопатки в процесі подальшої експлуатації [10].

Відновлювальна термічна обробка за режимами гомогенізації та наступного двоетапного старіння показала, що рафт-структура (рис. 1 в) на вхідних кромках робочих лопаток повертається у початковий стан структури (рис. 1 б), характерний для сплавів ЖС26-НК та ЖС32-ВИ.

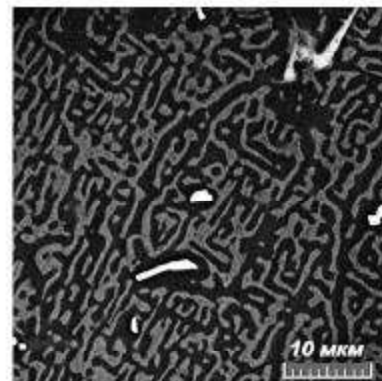
Застосування для робочих лопаток ТВТ першого етапу відновлювальної вакуумної термічної обробки (ізотермічної витримки при температурі гомогенізації) призводить до формування приповерхневого рекристалізованого шару глибиною до 40-65 мкм (рис. 2) внаслідок перевищення за температурою та тривалістю ізотермічної витримки



а

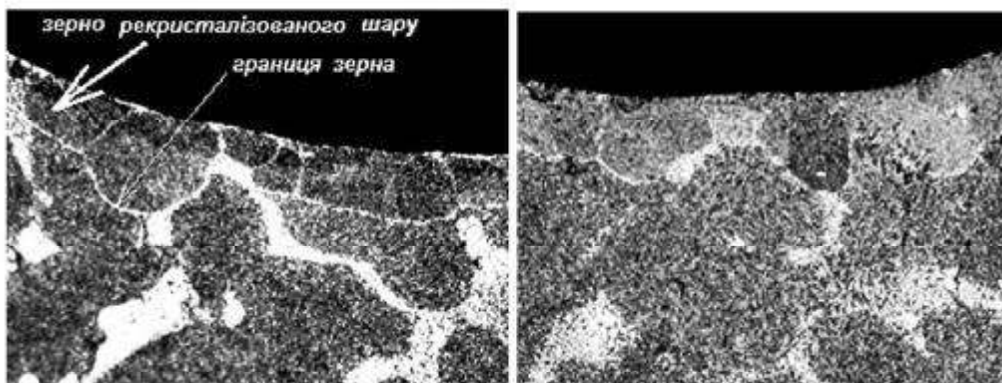


б



в

Рис. 1. Схема силових і температурних впливів на перо небандажованої робочої лопатки ТВТ в процесі експлуатації (а) та зміни вихідної структури сплаву ЖС26-НК (б) в зоні перегріву вхідної кромки лопатки (в).



а

б

Рис. 2. Поверхневий рекристалізований шар в ЖС26-НК (а) і ЖС32-ВИ (б) після ізотермічної витримки при температурі (відповідно 1265°C і 1280°C, 1,5 год.).  $\times 500$ .

встановлених в роботі [4] обмежень. При складному профілі трактової поверхні пера даних робочих лопаток ТВТ і невеликій товщині їх стінок ( $\approx 1$  мм) можливості повного видалення механічною обробкою такого приповерхневого шару обмежені.

Дана робота присвячена дослідженню закономірностей формування і будови приповерхневого рекристалізованого шару при відновлюваній вакуумній термічній обробці (гомогенізація та двоетапне старіння) сплавів ЖС26-НК та ЖС32-ВИ з метою приведення границь зерен, що утворюються в процесі її проведення, в більш безпечний стан з точки зору подальшої експлуатації небандажованої газоолоджуваних лопаток ТВТ на одному з сучасних турбореактивних двохконтурних двигунів з форсажною камерою згоряння.

На час проведення викладених нижче дослідних робіт, крім відміченої роботи [4], інших публікацій щодо особливостей формування рекристалізованого шару на аналогічних НЖС не виявлено. Також слід зазначити, що у відомих вітчизняних серійних ремонтних технологіях з використанням зварювання плавленням [5, 11, 12], для робочих лопаток зі сплавів ЖС26-НК і ЖС32-ВИ повна термічна обробка (гомогенізація та двоетапне старіння), раніше не застосовувалася. Тобто вирішення технологічної задачі корекції мікроструктури приповерхневого рекристалізованого шару на трактових поверхнях і ялинкових хвостовиках робочих лопаток НЖС з направленою та монокристалічною структурою при їх відновлювальній вакуумній термічній обробці є актуальною для сучасного етапу розвитку ремонтних технологій.

Об'єктом досліджень були фрагменти робочих лопаток ТВТ з нікелевих жароміцних сплавів ЖС26-НК (спрямовано закристалізована структура) та ЖС32-ВИ (монокристалічна структура) після льотної експлуатації, що не містили захисного покриття. Заготовки шліфів для подальших досліджень вирізалися електроерозійною різкою: ділянка пера лопатки в безпосередній близькості від вихідної кромки до галтелі нижньої бандажної полиці; ділянка ялинкового хвостовика лопатки (околиці вершини першого зубу та наступної западини). Площина металографічних досліджень була розташована паралельно осі Z лопатки. Для підготовки мікрошліфів використовувався комплекс обладнання на базі установки Labo Press 3 фірми Struers.

Закономірності формування та будови приповерхневого рекристалізованого шару досліджувалися після проходження модельним зразком кожної стадії відновлювальної термічної обробки. Тривалість гомогенізації складала 1,25...1,5 год (при 1265 °С для сплаву ЖС26-НК; при 1280 °С для сплаву ЖС32-ВИ). Мікроструктура рекристалізованого шару порівнювалася після режимів високотемпературного старіння тривалістю 4-5 год: при температурі 1150 °С – рекомендації ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ [13], при температурі 1050 °С – рекомендації АТ «Мотор Січ» [14], а також при їх поєднанні. Високотемпературне старіння дослідних лопаток проводилося в вакуумі ( $\approx 1.3 \times 10^{-2}$  Па при 1050 °С), а низькотемпературне старіння (870 °С, 24 год) – на повітрі. Також досліджувався стан залишків рекристалізованого шару після нанесення за технологією ВПТВЕ [1] нового захисного покриття СДП-2/ВСДП-16 та його наступного дифузійного відпалу за оптимізованим режимом високотемпературного старіння.

### Термічна і хіміко-термічна обробка

Дослідження структури і морфології  $\gamma'$ -фази проводилися на мікроскопі Neophot 32 ( $\times 50 \dots 500$ ) та електронному мікроскопі CamScan ( $\times 50 \dots 2000$ ). Для мікроаналізу складу використовували енергодисперсійну приставку ENERGY 200 з системою обробки INCA.

Для отримання контрастних зображень мікроструктури рекристалізованого шару в цілому або окремо її складових фаз застосовували термічне та хімічне травлення у водному розчині кислот ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HF} + \text{H}_2\text{SO}_4$ ).

При порівнянні структур приповерхневого прошарку сплавів ЖС26 і ЖС32 після 3-х типів термічної обробки виявлено їх суттєві відмінності.

Ізотермічна гомогенізація за температур 1265 °С і 1280 °С відповідно призвела до розчинення та укрупнення основної зміцнюючої  $\gamma'$ -фази, (рис. 3 а та рис. 4 а). Границі зерен після термічної обробки по режиму гомогенізації представляють собою переривчастий ланцюг часток незміцнюючої  $\gamma'$ -фази розміром до 1-3 мкм.

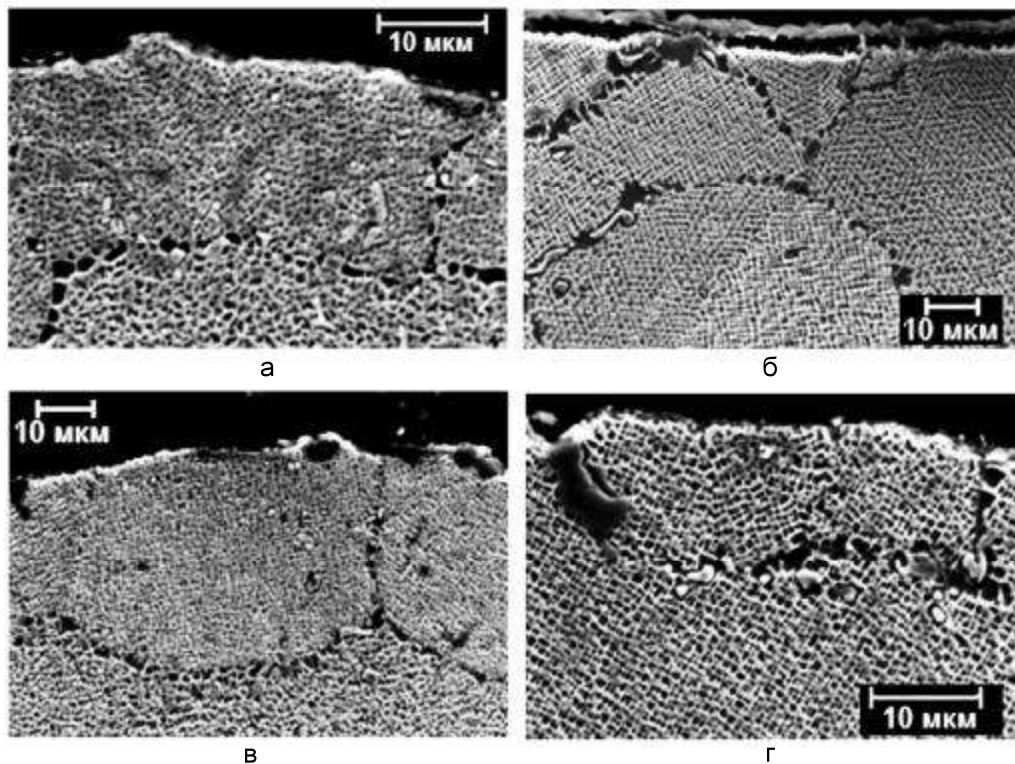


Рис. 3. Мікроструктура (РЕМ) приповерхневого рекристалізованого шару сплаву ЖС26-Ні після вакуумної термічної обробки: а – 1265 °С (1 год 20 хв); б – 1265 °С (1 год 20 хв) + 1150 °С (5 год) + 870 °С (24 год, повітря); в, г – 1265 °С (1 год 20 хв) + 1050 °С (4 год).

Така операція не може бути кінцевою у ланці термічної обробки, оскільки призводить до максимального розчинення первинних та вторинних фаз, в тому числі евтектичних ( $\gamma + \gamma'$ )-фаз та карбідних, і, як наслідок, до зниження твердості та міцності базового сплаву.

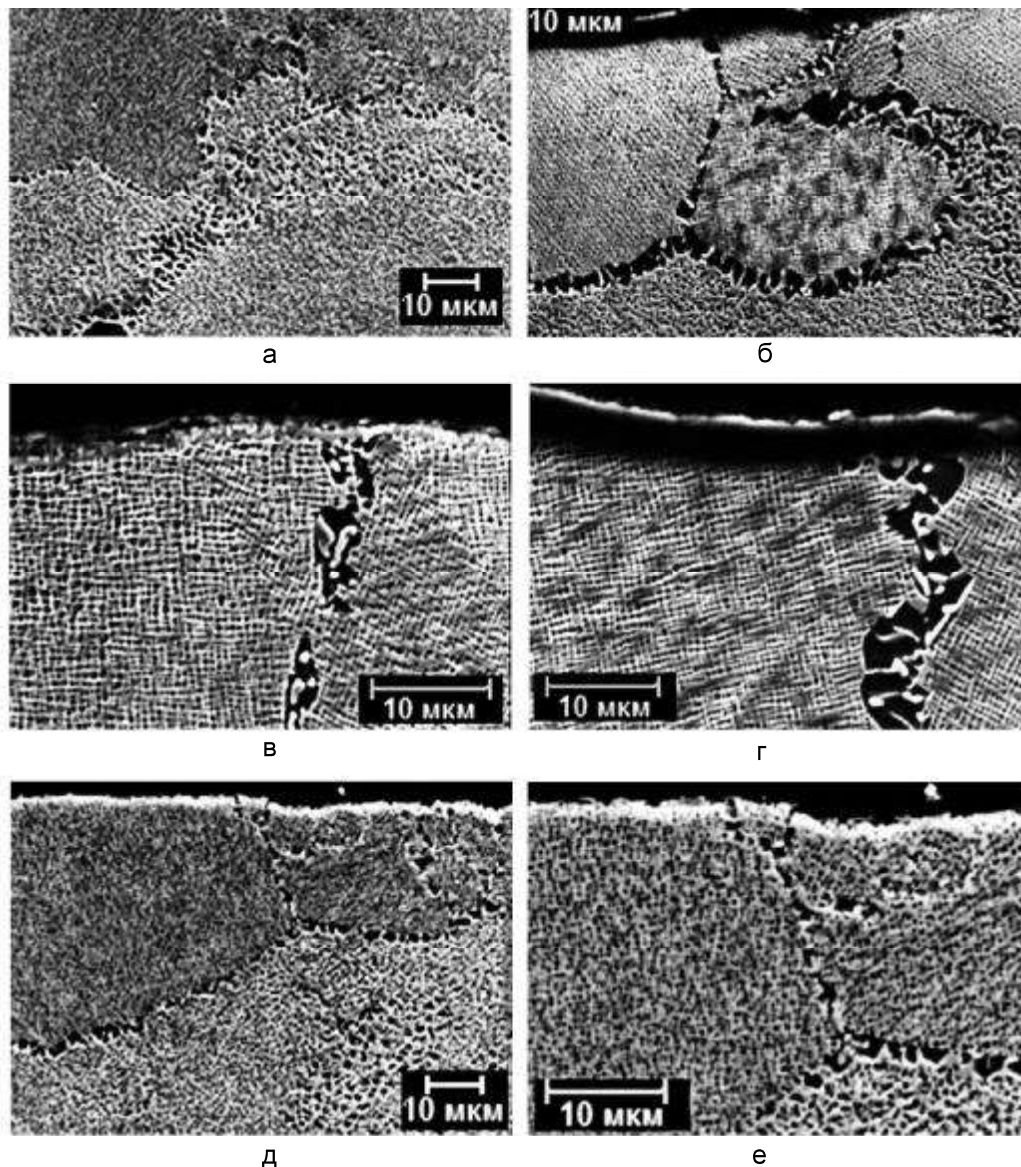


Рис. 4. Мікроструктура (РЕМ) приповерхневого рекристалізованого шару сплаву ЖС32-ВІ після вакуумної термічної обробки: а – 1280 °С (1 год 20 хв); б, в, г – 1280 °С (1 год 20 хв) + 1150 °С (5 год) + 870 °С (24 год - повітря); д, е – 1265 °С (1 год 20 хв) + 1050 °С (4 год).

Наступними етапами термічної обробки були часткова гомогенізація при 1150 °С та високотемпературне (1050 °С), і низькотемпературне (870 °С) старіння.

Після комплексної термічної обробки гомогенізація + 1150 °С (5 год) + 870 °С (24 год, повітря) структура рекристалізованого шару відрізняється високою щільністю та високою дисперсністю часток зміцнюючої  $\gamma'$ -фази (рис. 3 б, рис. 4 б, в, г). Це забезпечує надійну функціональну жароміцність приповерхневого шару глибиною до 40 мкм. Проте границі зерен чітко виражені та декоровані прошарками

## Термічна і хіміко-термічна обробка

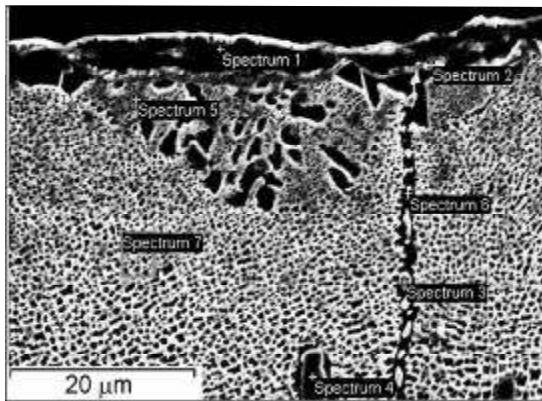


Рис. 5. Структурні складові рекристалізованого шару сплаву ЖС26-НК після термічної обробки (гомогенізація 1265 °С, 1 год 20 хв, старіння 1150 °С, 5 год, старіння 870 °С, 24 год).

незмцнюючої  $\gamma'$ -фази розміром до 1-3 мкм з частим вкрапленням карбідних фаз, особливо у структурі монокристалічного карбидовмісного сплаву ЖС32 (рис. 4 б, в, г).

Результати визначення хімічного складу приповерхневого рекристалізованого шару сплаву ЖС26-НК після гомогенізації та двоетапного старіння за температури 1150 °С та 870 °С (табл. 2 і рис. 5) свідчать про гетерофазність сформованої на поверхні зразка зони рекристалізованих зерен.

Основними структурними складовими приповерхневих зерен, що утворилися внаслідок процесу рекристалізації, є зміцнююча  $\gamma'$ -фаза, а також евтектики ( $\gamma+\gamma'$ ) (рис. 5). Крім того в об'ємі зерен зустрічаються поліедричні первинні карбіди типу  $MeC$  на основі Nb, W, Ti, що збереглися при гомогенізації та наступному старінні. Границі рекристалізованих зерен окантовані прошарками із незмцнюючої  $\gamma'$ -фази з включеннями карбідів типу  $(W, Mo)_6C$ , (табл. 2, Spectrum 3 і 6).

Таблиця 2

Результати енергодисперсійного аналізу (мас. частка, %) структурних складових приповерхневого рекристалізованого шару сплаву ЖС26-НК після термічної обробки

Spectrum	C	O	Al	Ti	V	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	W
Spectrum 1	3,63	26,88	4,88	1,61	2,24	2,42	7,19	7,8	35,62	0,6		7,13
Spectrum 2	2,39	24,5	10,88	0,2	0,5	1,63	0,49	3,32	20,84	0,85	2,56	31,84
Spectrum 3	3,85		0,64	0,26	1,24	4,95	0,61	4,96	16,92	2,59	5,88	58,09
Spectrum 4	14,57			12,06	2,28	0,68		0,33	2,87	40,09	3,04	24,09
Spectrum 5	2,67		2,89	0,4	1,2	6,19	3,07	10,6	60,75	0,86	1,47	9,88
Spectrum 6	6,58		1,02	0,45	0,98	4,49	0,8	4,8	22,19	1,67	5,47	51,53
Spectrum 7	1,83		3,52	0,64	0,94	6,53	2,42	10,29	60,71	1,05	0,96	11,12

Встановлено, що проведення після гомогенізації відпалу за температури 1050 °С дозволяє обмежити ширину границь рекристалізованого зерна до 1-2 мкм, зробити їх переривчастими і тим самим зменшити кількість розташованої вздовж границь зерен незмцнюючої  $\gamma'$ -фази; обмежити розмір окремих карбідів типу  $Me_6C$  до 1-2 мкм (рис. 3 в, г та рис. 4 д).

Наведені результати свідчать, що при відновлюваній вакуумній термічній обробці робочих лопаток зі сплаву типу ЖС26 та ЖС32 після високотемпературної гомогенізації доцільно застосовувати одностадійне старіння при 1050 °С (4-5 год) для формування границь рекристалізованих зерен більш сприятливого нерегулярного характеру, що позитивно впливає

## Термічна і хіміко-термічна обробка

на довготривалу міцність монокристалічного сплаву при експлуатації виробу.

При нанесенні захисного покриття на відновлені термообробкою виробу з НЖС операція високотемпературного старіння може поєднуватися з дифузійним відпалом нанесеного зовнішнього захисного покриття. Встановлено, що на трактовій поверхні пера лопаток залишки приповерхневого рекристалізованого шару товщиною 10-15 мкм розчиняються при формуванні під час термічної обробки дифузійної зони «нікелевий жароміцний сплав – захисне покриття СДП-2/ВСДП-16» (рис. 6). Таким чином, у приповерхневій зоні трактової поверхні пера залишаються лише поодинокі рекристалізовані зерна із щільною структурою.

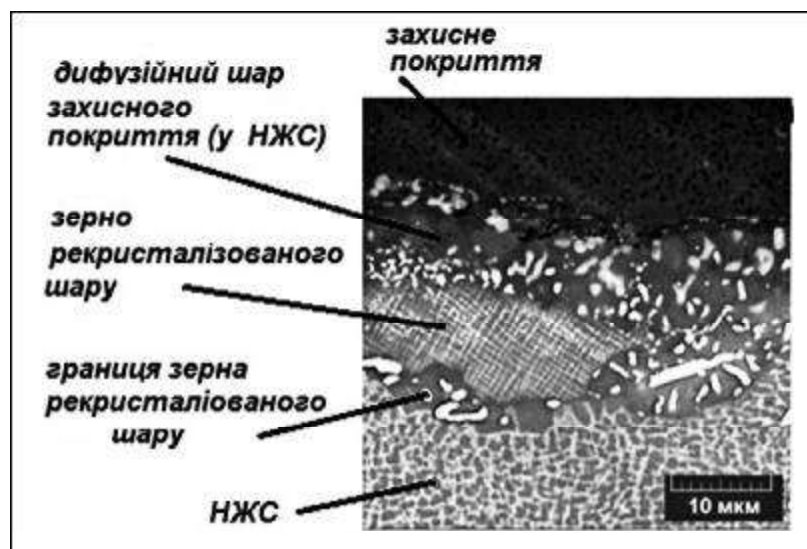


Рис. 6. Мікроструктура (РЕМ) залишків рекристалізованого шару після нанесення нового захисного покриття СДП-2/ВСДП-16 і наступного ізотермічного відпалу при 1050 °С протягом 4-5 год.

Розроблені режими оптимізації відновлювальної термообробки з метою усунення побічного впливу приповерхневої рекристалізації НЖС ЖС26-НК та ЖС32-ВИ використано на ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» для відновлення структури небандажованих газоохолоджуваних робочих лопаток одного з сучасних турбореактивних двохконтурних двигунів з форсажною камерою згоряння. Спільно з ІЕЗ ім. Є. О. Патона за розробленою технологією відновлено структуру більше 10 моторокомплектів таких лопаток. Значна частина з них вже відпрацювала призначений міжремонтний цикл льотної експлуатації.

Таким чином встановлено, що напруження, зумовлені операціями механічної обробки на поверхні газоохолоджуваної робочої лопатки ТВТ з сучасних НЖС типу ЖС32, релаксуються при наступному нагріві до температури гомогенізації тривалістю 1,25-1,5 год з утворенням рекристалізованого шару товщиною до 40-65 мкм у вигляді ланцюга зерен.

Методами растрової електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу встановлено закономірності формування такого рекристалізованого шару в процесі відновлювальної вакуумної термічної обробки (гомогенізації)

Науково-технічний журнал "Металознавство та обробка металів" 1'2021 61

та високотемпературного і низькотемпературного старіння) на НЖС з направленою (ЖС26-НК) та монокристалічною (ЖС32-ВИ) структурою. Рекристалізований шар представляє собою зерно з щільно упакованою  $\gamma'$ -фазою, більш дисперсною порівняно з відповідною фазою на осях дендритів в глибині матеріалу НЖС. Границі зерен представляють собою прошарки знеміцнюючої  $\gamma'$ -фази шириною до 1-3 мкм з присутністю часток карбідної фази.

Структура границь зерен приповерхневого рекристалізованого шару формується переважно при ізотермічній гомогенізації та високотемпературному старінні. Режим останнього визначає будову границь зерен (суцільна, переривчаста) і регулює кількість в них карбідних фаз.

З метою зменшення побічного ефекту, обумовленого появою рекристалізованого шару при відновлювальній вакуумній термічній обробці робочих лопаток, після гомогенізації рекомендовано застосовувати високотемпературне старіння за температури 1050 °С. Такий режим термічної обробки дозволяє частково розчинити границі рекристалізованого шару, надати їм дискретного характеру, а також уникнути там систематичних виділень карбідних часток, що зменшує їх негативний вплив на довговічність виробу в цілому.

Оптимізовані режими вакуумної термічної обробки впроваджено для відновлення структури небандажованих газоохолоджуваних робочих лопаток ТВТ з НЖС типу ЖС32 на ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор». Відновлені деталі пройшли практичну перевірку при міжремонтному циклі льотної експлуатації на одному з сучасних турбореактивних двохконтурних двигунів з форсажною камерою згорання.

## Література

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
2. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.:Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. Богуслаев В.А., Муравченко В.М., Жемаюк П.Д., Колесников В.И. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. – Запорожье: Изд. ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с.
4. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходькин А.Н., Орехов Н.Г. Особенности пайки монокристаллических отливок из сплава ЖС32 // Сварочное производство. – 2012. – № 5. – С. 24-30.
5. Пейчев Г.И., Шурин А.К., Замковой В.Е., Калашников Г.П., Андрейченко Н.В. Разработка и внедрение високотемпературного износостойкого сплава для упрочнения бандажных полок лопаток ГТД // Технологические системы. – 2000. – № 3. – С. 40-42.
6. Морозова Г.И., Богина Н.Х., Сорокина Л.П. Оценка степени деградации и восстановления  $\gamma'$ -фазы никелевых сплавов методом фазового анализа // Заводская лаборатория. – 1994. – № 7. – С. 8-11.

7. Быков Ю., Душкин А., Поклад В. Восстановительный ремонт турбинных лопаток для ГТУ // Газотурбинные технологии. – 2003. – № 3. – С. 24-26.
8. Тарасенко Ю.П. Постэксплуатационное состояние лопаток первой ступени ТВД двигателя ДЖ59 и особенности их восстановления // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 11-12. – С. 30-32.
9. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджан С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Спец. выпуск «Перспективные конструкционные материалы и технологии». – 2011. – С. 26-37.
10. Карпинос Б.С., Коровин А.В., Лобушко А.П., Ведищева М.Ю. Эксплуатационные повреждения турбореактивных двухконтурных двигателей с форсажной камерой сгорания // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 1. – С. 18-24.
11. Юценко К.А. Савченко В.С., Яровицын А.В. и др. Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки // Автоматическая сварка. – 2010. – № 8. – С. 25-29.
12. Жеманюк П.Д., Петрик И.А., Чигилейчик С.Л. Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства // Автоматическая сварка. – 2015. – № 8. – С. 43-46.
13. Каблов Е.Н., Орехов Н.Г., Толораия В.Н., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы и технология получения монокристаллических турбинных лопаток ГТД // Технология легких сплавов. – 2002. – № 4. – С. 100-105.
14. Лысенко Н.А., Клочихин В.В., Наумик В.В. Структура и свойства пустотелых отливок лопаток турбины после горячего изостатического прессования // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 10(127). – С.19-27.

## References

1. Kablov E.N. *Litye lopatki gazoturbinnnyh dvigatelej (splavy, tehnologija, pokrytija) (Cast blades of gas turbine engines (alloys, technology, coatings))*, Moscow, MISIS, 2001, 632 p. [in Russian].
2. Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B., Tolorajja V.N., Gavrilin O.S. *Monokristally nikelovyh zharoprochnykh splavov (Single crystals of nickel high-temperature strength alloys)*, Moscow, Mashinostroenie, 1997, 336 p. [in Russian].
3. Bohuslaev V.A., Muravchenko F.M., Zhemanyuk P.D., Yacenko V.K., Kachan A. Ya., Civirko Ye.I., Belikov S.B., Orlov M.R., Zamkovej V.E., Mozgovoj V.F., Vrubel O.V. *Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatacionnykh harakteristik detalej GTD, Lopatki turbiny, Chast' II (Technological support for operational characteristics of gas turbine engine parts, turbine blades, Part II)*, Monograph, Zaporozhye, OJSC Motor Sich, 2003, 420 p. [in Russian].
4. Lukin V.I., Ryl'nikov V.S., Afanasev-Hodykin A.N., Orehov N.G. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, No. 2, pp. 24-30 [in Russian].
5. Pejchev G.I., Shurin A.K., Zamkovej V.E., Kalashnikov G.P., Andrejchenko N.V., *Tekhnologicheskie sistemy*, 2000, No. 3, pp. 40-42 [in Russian].
6. Morozova G.I., Bogina N.H., Sorokina L.P. *Zavodskaja laboratorija*, 1994, No. 7, pp. 8-11 [in Russian].

7. Bykov Ju, Dushkin A., Poklad V. *Gazoturbinnye tehnologii*, 2003, No. 3, pp. 24-26 [in Russian].
8. Tarasenko Ju.P. *Gazoturbinnye tehnologii*, 2005, No. 11-12, pp. 30-32 [in Russian].
9. Budinovskij S.A., Kablov E.N., Mubojadzhan S.A., Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana, Serija «Mashinostroenie». *Spec. vypusk «Perspektivnye konstrukcionnye materialy i tehnologii»*, 2011, pp. 26-37 [in Russian].
10. Karpinos B. S., Korovin A. V., Lobunko A. P., Vedishheva M. Ju., *Vestnik dvigatelestroenija*, 2014, No. 1, pp. 18-24 [in Russian].
11. Yushchenko K.A., Savchenko V.S., Yarovytsyn A.V., Nakonechny A.A., Nastenکو G.F., Zamkovoј V.E., Belozertsev O.S., Andrejchenko N.V., *The Paton Welding J.*, 2010, No. 8, pp. 25-29 [in English].
12. Zhemanyuk P.D., Petrik I.A. and Chigilejchik S.L., *The Paton Welding J.*, 2015, No. 8, pp. 43-46 [in English]. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.08.08>
13. Kablov E.N., Orehov N.G., Tolorajja V.N., Demonis I.M., *Tehnologija legkih splavov*, 2002, No. 4, pp. 100-105 [in Russian].
14. Lysenko N.A., Klochihiн V.V., Naumik V.V., *Aviacionno-kosmicheskaja tehnikа i tehnologija*, 2015, No. 10(127), pp. 19-27 [in Russian].

Одержано 22.12.20

**K. A. Yushchenko, O. V. Yarovytsyn, T. M. Kushnaryova, V. E. Mazurak,  
S. S. Kovalchuk, V. V. Kurenkova**

**The formation of structure regularities in the recrystallized near-surface layer after restoration by heat treatment process of nickel-based high-temperature strength alloys**

**Summary**

In modern nickel nickel-based high-temperature strength alloys of the ZhS32 type with a directional and single-crystal structure on surfaces that were previously subjected to mechanical treatment, with the subsequent isothermal exposure in the vicinity of the homogenization temperature lasting more than 15 minutes a subsurface recrystallized layer up to 40-65  $\mu\text{m}$  deep is formed such as a chain of grains. The formation of this layer is a side effect that restrained the industrial application of vacuum heat treatment to restore local operational degradation ("raft"-structure) on the overheated inlet edges of non-bandage shelved gas-cooled high-pressure turbine blades of some modern aircraft turbine engines. Given the technical complexity of reliable removal of this recrystallized layer from the tract surface of thin-walled gas-cooled blades, it is important to develop technological measures to translate grain boundaries in unremoved residues of recrystallized near-surface layer into a safer structural state. The regularities of recrystallized layer formation in the process of 3-stage reductive vacuum treatment has been investigated by the methods of raster electron microscopy and X-ray structural (EDX) microanalysis at magnification up to  $\times 2000$  on fragments of TVT blades with ZhS26-VI alloy (directional structure) and ZhS32-VI alloy (monocrystalline structure). It has been established that the recrystallized layer formed in the process of aging 1.25-1.5 hours at the temperature of alloy homogenization, is a chain of grain with a tightly packed  $\gamma'$ -phase with layers at their boundaries, which consist of the non-reinforcing  $\gamma'$ -phase up to 1-3  $\mu\text{m}$  wide with the carbide phases presence. It has been shown that the rational choice of the temperature of high-temperature

## Термічна і хіміко-термічна обробка

aging is an effective technological control of the grain boundaries structural state in a near-surface recrystallized layer of the considered high-temperature strength alloys. Assigning a temperature of 1050 °C for isothermal exposure after homogenization heat treatment for ZhS26 and ZhS32 alloys allows to reduce the grain boundaries width in the recrystallized layer to 1-2 μm, keep them intermittent and avoid systematic release of carbide particles at the grain boundaries. On the basis of established in the Paton welding institute of regularities of formation and control of the structure of the near-surface recrystallized layer developed technological recommendations for optimizing the vacuum heat treatment modes to restore the structure of non-bandage shelved gas-cooled high-pressure turbine blades with type ZhS32 high-temperature strength alloys. This technology has passed experimental and practical testing during the next maintenance cycle of flight operation on one of the modern turbojet double-circuit gas turbine engines with afterburner combustion chamber.

**Keywords:** nickel nickel-based high-temperature strength alloys of the ZhS32 type; vacuum heat treatment; restoration of alloys structure; subsurface recrystallized layer; raster electron microscopy.

Журнал **МММ** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно з наказом Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020.

Повна назва журналу  
**"Науково-технічний журнал  
"Металознавство та обробка металів"**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.  
Вартість одного номера журналу - 50 грн., передплата на рік – 200 грн.  
Ціна архівних номерів 1995 – 2019 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,  
спонсорів і рекламодавців:**  
р/р UA828201720313251001201012215,  
банк ДКСУ в м. Києві код банку 820172  
Отримувач - ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,  
з посиланням на журнал "МММ"

Копію документа передплати та відомості про передплатника  
**просимо надсилати до редакції,**  
вказавши номер і дату платіжного документа.