

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРИВАЕМЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

О.Ю. Козлова<sup>1</sup>

С.В. Овсеян<sup>2</sup>

А.С. Помельникова<sup>1</sup>

М.В. Ахмедзянов<sup>2</sup>

olga.ko.olga@gmail.com

lab3@viam.ru

pomelnikovalla@rambler.ru

lab3@viam.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГУП «ВИАМ», Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Исследовано влияние высокотемпературной химико-термической обработки в азоте на структуру и свойства листовых образцов свариваемых жаропрочных никелевых сплавов с разным типом легирования: гомогенного (ВЖ98), стареющего (ВЖ159) и разработанного для упрочнения внутренним азотированием (ВЖ171). Установлено положительное влияние высокотемпературной химико-термической обработки на длительную прочность при 1000 °С сплавов ВЖ171 и ВЖ98, содержащих титан. Специально подобранное соотношение компонентов сплава ВЖ171 позволяет сформировать благоприятную микроструктуру по всей толщине листового образца в процессе химико-термической обработки. Образование дисперсных частиц упрочняющей нитридной фазы в сплаве ВЖ171 способствует повышению (в 2 раза) микротвердости, а после выдержки при температуре 1200 °С в течение 100 ч не вызывает существенных изменений в структуре сплава

### Ключевые слова

*Химико-термическая обработка, высокотемпературное азотирование, нитриды, структура, жаропрочные никелевые сплавы, микротвердость, длительная прочность*

Поступила в редакцию 11.03.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

---

**Введение.** Многолетняя отечественная и зарубежная практика показывает, что более 80 % инновационных разработок в ведущих отраслях промышленности и секторах экономики базируются на внедрении новых материалов и технологий [1]. Деформируемые жаропрочные свариваемые никелевые сплавы, используемые для статорных деталей горячей зоны газотурбинных двигателей (ГТД), достигли предельного уровня легирования, и дальнейшее усложнение их химического состава неперспективно. Повышение служебных характеристик таких материалов может быть достигнуто вследствие специальных термических и химико-термических обработок (ХТО) [2]. Разработанные профессором Ю.М. Лахтиным и его школой теория и физические основы внутреннего азотирования и технологии ХТО, связанные с высокотемпературным внутренним азотированием [3–5], позволяют значительно повысить жаропрочность и жаростойкость сплавов.

Несмотря на то что исследования и эксперименты по высокотемпературному азотированию сталей в РФ и за рубежом, например [6], начались в первой половине XX в. вопросы формирования структуры и свойств при внутреннем азотировании никелевых сплавов недостаточно изучены.

Наиболее жаропрочный деформируемый сплав нового класса марки ВЖ171 с определенным соотношением легирующих элементов, упрочняемый нитридами, проходит опробование в промышленности для теплонагруженных узлов газотурбинных двигателей (ГТД) (жаровая труба камеры сгорания, детали сопла и форсажной камеры) [7, 8]. В результате высокотемпературного азотирования происходит образование по всему объему материала стабильных нитридов, которые не растворяются до температуры плавления сплава и обеспечивают высокий уровень свойств. Материал такого класса известен и за рубежом: сплав NS-163 фирмы *Haynes* [9].

Для эффективного внутреннего азотирования необходимо выполнение следующих условий [5]:

- в сплаве должны содержаться сильные нитридообразующие элементы;
- растворимость и диффузионная подвижность азота в сплаве должны быть достаточны для роста упрочняющей нитридной фазы внутри материала;
- не должно происходить образование сплошного нитридного слоя на поверхности.

При азотировании многокомпонентных сплавов следует учитывать, что в их составе могут находиться несколько нитридообразующих элементов. Например, хром и титан при определенных условиях могут образовывать и нитриды титана, и нитриды хрома [10]. Последнее нежелательно, так как не обеспечивается стабильность структуры при высоких температурах. При образовании нитридов хрома уменьшается его содержание в твердом растворе, что снижает жаростойкость и сопротивление коррозии [5].

Известно, что алюминий, ниобий и титан, входящие в состав сплавов ВЖ98 и ВЖ159, являются нитридообразующими элементами, и могут по-разному влиять на свойства в случае проведения ХТО в среде азота.

Камера сгорания — это сварной узел, в котором присутствует сварка материалов в одноименном и разноименном сочетании. Для использования сплавов с нитридным упрочнением в перспективных ГТД необходимо решить задачу определения материалов, которые подходят для совместного азотирования. Например, для деталей камеры сгорания может потребоваться использовать совместно сплавы марок ВЖ171 и ВЖ98 или ВЖ159 [11].

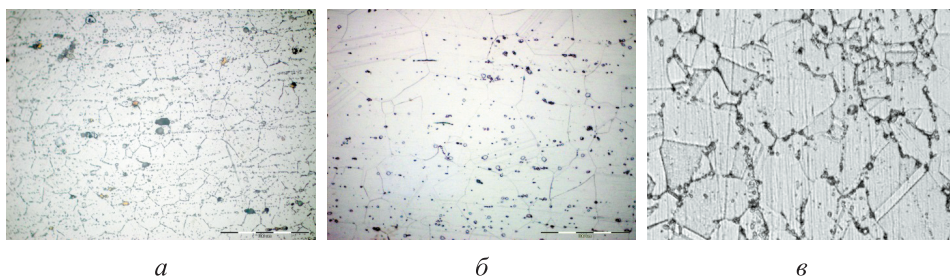
**Материалы и методики исследований.** В настоящей работе исследованы холоднокатаные листы толщиной 1,1...1,3 мм из следующих сплавов: гомогенный сплав ВЖ98, легируемый вольфрамом (10...16 % масс.) и титаном (0,5 % масс.), имеет хорошую технологичность, сваривается всеми видами сварки; сплав ВЖ159 содержит молибден и 4,5 % масс. в сумме ниобия и алюминия, формирующих упрочняющую  $\gamma'$ -фазу ( $\text{Ni}_3\text{Al}(\text{Nb})$ ), имеет высокие характеристики пластичности и технологичности [11, 12]; экспериментальный сплав ВЖ171.

Высокотемпературное азотирование проводили в атмосфере азота при температуре на 150...200 °С ниже начала плавления сплавов. Время выдержки 40 ч.

Микроструктуру азотированных сплавов исследовали на оптическом (Olympus GX51) и электронном растровом (JSM-840) микроскопах с увеличениями от  $\times 100$  до  $\times 15000$ . Испытания на кратковременную и длительную прочность проводили по ГОСТ 1497 (на разрывной машине Р-5) и ГОСТ 10145 (на испытательной машине АИМА-5-2). Коррозионную повреждаемость оценивали после длительной выдержки (100 ч) при 1200 °С по микроструктуре сплава.

После высокотемпературных процессов (отжига, азотирования и последующей выдержки в атмосфере) микротвердость измеряли по методу Виккерса на приборе ЕМСО–Test DuraScan 50 при нагрузке на индентор 0,98 Н на поперечных шлифах. Предел погрешности при измерении микротвердости не превышал 2 % среднего значения при доверительном уровне 95 %.

**Результаты исследований.** На рис. 1 представлены микроструктуры листовых образцов сплавов ВЖ98, ВЖ159 и ВЖ171 в состоянии поставки (после отжига).

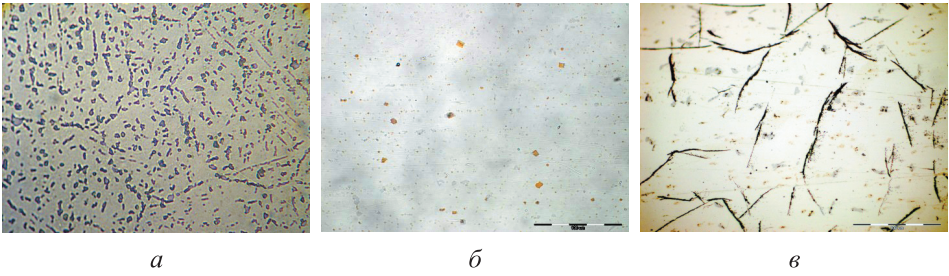


**Рис. 1.** Микроструктура сплавов ( $\times 500$ ) ВЖ98 (а), ВЖ159 (б) и ВЖ171 (в) в состоянии поставки

После отжига сплавы ВЖ98, ВЖ159 и ВЖ171 имеют гомогенную структуру с отдельными частицами карбидов. Сплав ВЖ98 имеет мелкое зерно (7 баллов), ВЖ159 и ВЖ171 более крупное (6 баллов), разностепенность отсутствует.

В результате исследования микроструктуры азотированных образцов выявили, что в процессе высокотемпературного азотирования диффузия азота происходит с обеих сторон образца к середине. В сплаве ВЖ171 (рис. 2, а) образуются нитриды по всему объему листа. Они равномерно распределены по сечению как в теле зерен, так и по их границам. В сплаве ВЖ98 (0,5 % масс. титана) (рис. 2, б) за то же время нитриды образовались также по всему объему листа, но их плотность существенно ниже, чем в сплаве ВЖ171. В сплаве ВЖ159 ниобий и алюминий образуют с азотом частицы игольчатой формы (рис. 2, в).

Для оценки влияния азотирования на механические свойства сплавов были проведены испытания образцов на кратковременную и длительную прочность до и после ХТО (таблица).

Рис. 2. Микроструктура сплавов ( $\times 500$ ) ВЖ171 (а), ВЖ98 (б) и ВЖ159 (в) после ХТО

## Свойства сплавов до и после ХТО

Сплав	Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}^{20}$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}^{20}$ , МПа	Относительное удлинение, %		Время $\tau^{1000}$ до разрушения, ч
			при 20 °С, $\delta^{20}$	при 1000 °С, $\delta^{1000}$	
ВЖ98	$\frac{885}{458}$	$\frac{345}{365}$	$\frac{65}{17}$	$\frac{35}{37}$	( $\sigma = 25$ МПа) $\frac{100}{456}$
ВЖ171	$\frac{830}{850}$	$\frac{370}{530}$	$\frac{90}{9}$	$\frac{115}{25}$	( $\sigma = 65$ МПа) $\frac{1,5}{103}$
ВЖ159	$\frac{1100}{416}$	$\frac{580}{-}$	$\frac{45}{1,6}$	—	( $\sigma = 26$ МПа) $\frac{100}{*}$

*Примечание.* Числитель — до ХТО, знаменатель — после ХТО.  
\* Разрушился при нагружении.

Анализ данных показал, что после азотирования в сплаве ВЖ98 при температуре испытания 20 °С временное сопротивление ( $\sigma_{\text{в}}^{20}$ ) значительно снижается (от 885 до 458 МПа), т. е. в 1,8 раза, предел текучести ( $\sigma_{0,2}^{20}$ ) незначительно увеличивается (от 345 до 365 МПа), относительное удлинение ( $\delta^{20}$ ) сильно уменьшается (от 65 до 17 %), т. е. почти в 4 раза, при этом сильно возрастает время до разрушения (при 1000 °С от 100 до 456 ч), т. е. в 4,5 раза (при  $\sigma = 25$  МПа), а относительное удлинение составляет 37 % при 1000 °С (в исходном состоянии 35 %). В сплаве ВЖ171 при температуре испытания 20 °С после азотирования временное сопротивление увеличивается незначительно: от 830 до 850 МПа, предел текучести увеличивается от 370 до 530 МПа, т. е. в 1,5 раза, а относительное удлинение снижается от 90 до 9 %, т. е. в 10 раз, при 1000 °С время до разрушения увеличилось от 1,5 до 103 ч, т. е. почти в 70 раз (при  $\sigma = 65$  МПа), а относительное удлинение

при 1000 °С уменьшилось от 115 до 25 %, т. е. в 4,5 раза. В сплаве ВЖ159 после ХТО механические свойства как кратковременные, так и длительные резко снижаются.

В целях определения влияния внутреннего азотирования на твердость материала была измерена микротвердость по сечению листовых образцов из сплава ВЖ171 после отжига (режим: температура 1140 °С, время выдержки 20 мин), ХТО (рис. 3) и длительной выдержки (100 ч) при температуре 1200 °С. Полученные данные приведены на рис. 4.

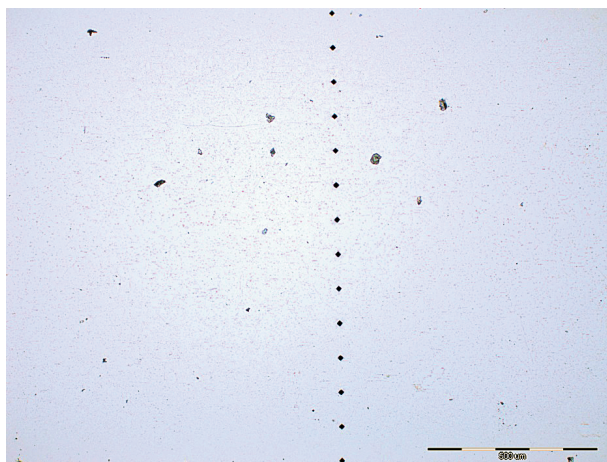
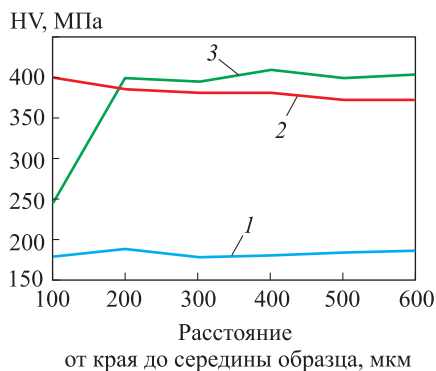


Рис. 3. Дорожка микротвердости по сечению образца сплава ВЖ171 (×100)

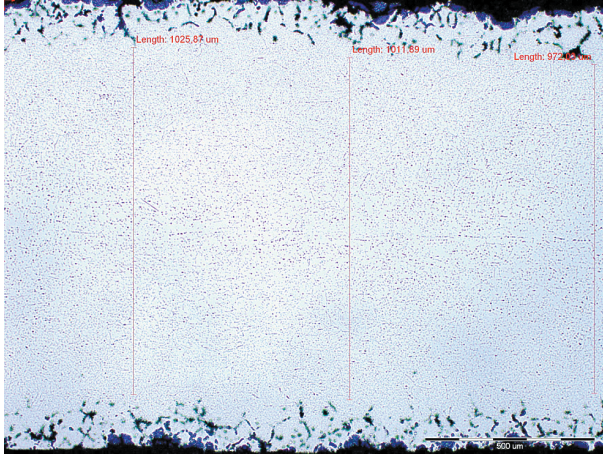
Рис. 4. Изменение микротвердости образца сплава по сечению от поверхности к центру:

1 — кривая поле отжига; 2 — кривая после ХТО; 3 — кривая после выдержки при  $t = 1200$  °С



Установлено, что значения микротвердости по толщине образца после высокотемпературного азотирования от поверхности к центру меняются незначительно и составляют в среднем 392 HV, в то время как среднее значение микротвердости сплава в исходном состоянии равно 183 HV, т. е. микротвердость после азотирования больше почти в 2 раза. После длительной выдержки при температуре 1200 °С микротвердость в местах коррозионных повреждений составляет 245 HV, а в слое, не подверженном коррозии, микротвердость распределена равномерно и равна 400 HV.

Коррозионная повреждаемость азотированного материала при высокой температуре была исследована на сплаве ВЖ171 по микроструктуре образца. После выдержки 100 ч при 1200 °С глубина поврежденного слоя на образце толщиной 1,18 мм составила ~105 мкм (рис. 5).



**Рис. 5.** Глубина коррозионных повреждений азотированного сплава ВЖ171 после выдержки при 1200 °С в течение 100 ч (×100)

**Обсуждение результатов.** Установлено, что высокотемпературная ХТО положительно влияет на длительную прочность сплавов, содержащих титан (ВЖ98, ВЖ171), значительно увеличивая время до разрушения при температуре испытания 1000 °С. Это достигается вследствие образования стабильных нитридов компактной формы. Нитриды титана крупнее, и их количество больше в сплаве ВЖ171, чем в ВЖ98, из-за значительной разницы (почти в 4 раза) в содержании титана. Образующиеся в процессе азотирования игольчатые нитриды на основе ниобия и алюминия в сплаве ВЖ159 охрупчивают материал, снижая кратковременную и длительную прочность. Известно, что помимо снижения характеристик прочности и пластичности, игольчатые нитриды приводят к образованию пор в структуре материала [13].

Сплав ВЖ171, специально разработанный для азотирования, показывает значительно более высокий уровень длительной прочности после ХТО. При этом полученные значения относительного удлинения (9 % при 20 °С и 25 % при 1000 °С) соответствуют паспортным значениям на данный сплав [7].

Проведенные исследования влияния высокотемпературных процессов (отжига, азотирования и последующей выдержки в атмосфере) на микротвердость показали, что образование дисперсных частиц упрочняющей нитридной фазы способствует повышению в 2 раза микротвердости по сравнению с результатами после отжига. Частицы нитридов по размеру отличаются в центре и по краю образца, однако они распределены равномерно по всему сечению, что и подтверждают полученные значения микротвердости. После испытаний на жаростойкость при температуре 1200 °С на образце в местах коррозионных повре-

ждений микротвердость снижается до значений 245 HV, но в целом по сечению листа практически не изменяется по сравнению с образцом после ХТО, что указывает на отсутствие существенных изменений в структуре в процессе длительной выдержки при высоких температурах.

Зона коррозионных повреждений после 100 ч при 1200 °С составляет ~105 мкм. Это близко к результатам, полученным в работе [14] для сплава системы Ni–Co–Cr–W–Ti — 130 мкм, что указывает на возможность использования сплава ВЖ171 при температурах до 1200 °С без защитного покрытия.

**Заключение.** Исследовано влияние высокотемпературной ХТО в азоте на структуру и свойства свариваемых жаропрочных никелевых сплавов с разным типом легирования: гомогенного (ВЖ98), стареющего (ВЖ159) и разработанного для упрочнения внутренним азотированием (ВЖ171).

Установлено положительное влияние высокотемпературной ХТО на длительную прочность при 1000 °С сплавов ВЖ171 и ВЖ98, содержащих титан, образующий нитриды компактной формы. Высокотемпературное азотирование сплава ВЖ159, упрочняемого частицами  $\gamma'$ -фазы, неприемлемо, так как на основе ниобия и алюминия формируются нитриды игольчатой формы, которые охрупчивают материал, снижая кратковременную и длительную прочность.

Специальное соотношение компонентов сплава ВЖ171 позволяет формировать благоприятную микроструктуру по всей толщине образца.

Образование дисперсных частиц упрочняющей нитридной фазы в сплаве ВЖ171 способствует увеличению микротвердости (почти в 2 раза). Полученные данные о глубине коррозионных повреждений говорят о возможности использования сплава ВЖ171 для изделий с коротким ресурсом при 1200 °С без защитного покрытия.

*Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук, профессору Якушину Борису Федоровичу за помощь в работе и обсуждение настоящей статьи.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1. С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // *Крылья Родины*. 2012. № 3-4. С. 34–38.
3. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Структура и прочность азотированных сплавов. М.: Металлургия, 1982. 176 с.
4. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.-И., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
5. Петрова Л.Г. Высокотемпературное азотирование жаропрочных сплавов // *МиТОМ*. 2004. № 1. С. 18–25.
6. Fry A. The theory and practice of nitrogen case-hardening // *JISI*. 1932. Vol. 125. P. 192–212.

7. Быков Ю.Г., Овсепян С.В., Мазалов И.С., Ромашов А.С. Применение нового жаропрочного сплава ВЖ171 в конструкции перспективного двигателя // Вестник двигателестроения. 2012. № 2. С. 246–249.
8. Ахмедзянов М.В., Скугорев А.В., Овсепян С.В., Мазалов И.С. Разработка ресурсосберегающей технологии получения холоднокатаного листа из высокожаропрочного свариваемого сплава ВЖ171 // Производство проката. 2015. № 1. С. 14–17.
9. Fahrman M., Srivastava S.K. Nitridation of HAYNES® NS-163® alloy: Thermodynamics and kinetics // JOM. 2012. Vol. 64. No. 2. P. 280–287. DOI: 10.1007/s11837-012-0239-y
10. Krupp U., Christ H.-J. Internal nitridation of nickel-base alloys. Part II. Behavior of quaternary Ni–Cr–Al–Ti alloys and computer-based description // Oxidation of Metals. 1999. Vol. 52. No. 3. P. 299–320. DOI: 10.1023/A:1018895628849
11. Латышев В.Б. Жаропрочные деформируемые свариваемые сплавы для камер сгорания // Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков: Науч.-техн. сб. М.: ВИАМ, 1994. С. 273–278.
12. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 52–57.
13. Krupp U., Christ H.-J. Internal nitridation of nickel-base alloys. Part I. Behavior of binary and ternary alloys of the Ni–Cr–Al–Ti system // Oxidation of Metals. 1999. Vol. 52. No. 3. P. 277–298. DOI: 10.1023/A:1018843612011
14. Абраимов Н.В., Шкретов Ю.П., Минаков А.И. Высокотемпературное окисление никелевого сплава с нитридным упрочнением // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 2. С. 19–24.

**Козлова Ольга Юрьевна** — студентка кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Овсепян Сергей Вячеславович** — канд. техн. наук, начальник лаборатории «Жаропрочные сплавы на никелевой основе» ФГУП «ВИАМ» (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

**Помельникова Алла Сергеевна** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Ахмедзянов Максим Вадимович** — инженер второй категории ФГУП «ВИАМ» (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

#### **Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Козлова О.Ю., Овсепян С.В., Помельникова А.С., Ахмедзянов М.В. Влияние высокотемпературного азотирования на структуру и свойства свариваемых жаропрочных никелевых сплавов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 6. С. 33–42. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-33-42



## HIGH TEMPERATURE NITRIDING EFFECT ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED NICKEL SUPERALLOYS

O.Yu. Kozlova<sup>1</sup>  
S.V. Ovsepyan<sup>2</sup>  
A.S. Pomelnikova<sup>1</sup>  
M.V. Akhmedzyanov<sup>2</sup>

olga.ko.olga@gmail.com  
lab3@viam.ru  
pomelnikovalla@rambler.ru  
lab3@viam.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The study tested the effect of thermo-chemical treatment (high-temperature nitriding) on the structure and properties of sheet samples of welded nickel superalloys with different types of alloying: homogeneous (VZH98), aging (VZH159) and nitride dispersion-strengthened alloy (VZH171). Findings of the research show the positive effect of high-temperature nitriding on prolonged heat resistance at 1000 °C for alloys VZH171 and VZH98, containing titanium. Specially selected ratio of VZH171 alloy components allows us to create a favorable microstructure throughout the entire thickness of the sample sheet in the process of thermo-chemical treatment. Finally, we found that formation of dispersed nitride particles in VZH171 alloy doubles microhardness, and soaking it at 1200 °C for 100 hours does not cause significant changes in the alloy structure

---

### Keywords

*Thermo-chemical treatment, high-temperature nitriding, nitrides, structure, nickel superalloys, microhardness, prolonged heat resistance*

## REFERENCES

- [1] Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2015, no. 1, pp. 3–33 (in Russ.).
- [2] Kablov E.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G. Development of modern heat-resisting materials and their manufacturing processes for aircraft engine building. *Kryl'ya Rodiny*, 2012, no. 3–4, pp. 34–38 (in Russ.).
- [3] Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D. *Struktura i prochnost' azotirovannykh splavov* [Nitrided materials structure and strength]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 176 p.
- [4] Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Shpis G.-I., Bemer Z. *Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya* [Nitriding theory and technology]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 320 p.
- [5] Petrova L.G. High-temperature nitriding of refractory alloys. *MiTOM*, 2004, no. 1, pp. 18–25. (in Russ.). (Eng. version of journal: *Metal Science and Heat Treatment*, 2004, vol. 46, no. 1, pp. 18–24. DOI: 10.1023/B:MSAT.0000029595.28616.40)
- [6] Fry A. The theory and practice of nitrogen case-hardening. *JISI*, 1932, vol. 125, pp. 192–212.

- [7] Bykov Yu.G., Ovsepyan S.V., Mazalov I.S., Romashov A.S. Application of new heat-resisting alloy VZh171 in perspective motor construction. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2012, no. 2, pp. 246–249 (in Russ.).
- [8] Akhmedzyanov M.V., Skugorev A.V., Ovsepyan S.V., Mazalov I.S. Development of resource-saving technology for production of cold-rolled sheet of welded high-temperature superalloy VZh171. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2015, no. 1, pp. 14–17 (in Russ.).
- [9] Fahrman M., Srivastava S.K. Nitridation of HAYNES® NS-163® alloy: Thermodynamics and kinetics. *JOM*, 2012, vol. 64, no. 2, pp. 280–287. DOI: 10.1007/s11837-012-0239-y
- [10] Krupp U., Christ H.-J. Internal nitridation of nickel-base alloys. Part II. Behavior of quaternary Ni-Cr-Al-Ti alloys and computer-based description. *Oxidation of Metals*, 1999, vol. 52, no. 3, pp. 299–320. DOI: 10.1023/A:1018895628849
- [11] Latyshev V.B. Zharoprochnye deformiruemye svarivaemye splavy dlya kamer sgoraniya [Heat-resistant wrought weld alloys for fire tube]. *Aviatsionnye materialy na rubezhe XX-XXI vekov* [Aircraft Materials at the Turn of XXI Century]. Moscow, VIAM Publ., 1994. pp. 273–278 (in Russ.).
- [12] Lomborg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. High-temperature Ni-base alloys for GTE components. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 5, pp. 52–57 (in Russ.).
- [13] Krupp U., Christ H.-J. Internal nitridation of nickel-base alloys. Part I. Behavior of binary and ternary alloys of the Ni-Cr-Al-Ti system. *Oxidation of Metals*, 1999, vol. 52, pp. 277–298. DOI: 10.1023/A:1018843612011
- [14] Abraimov N.V., Shkretov Yu.P., Minakov A.I. High-temperature oxidation of nickel alloy with nitride strengthening. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2013, no. 2, pp. 19–24 (in Russ.).

**Kozlova O.Yu.** — student of Materials Science Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Ovsepyan S.V.** — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Nickel-Based Superalloys, Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Pomelnikova A.S.** — Dr. Sci. (Eng.), Professor Materials Science Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Akhmedzyanov M.V.** — second rank engineer, Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Kozlova O.Yu., Ovsepyan S.V., Pomelnikova A.S., Akhmedzyanov M.V. High Temperature Nitriding Effect on Structure and Properties of Welded Nickel Superalloys. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 6, pp. 33–42. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-33-42