

## УСТАНОВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОКАТКИ ПОВЕРХНОСТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА СИСТЕМЫ Ti-Al

Бердова-Бушура О. В.

### 1. Введение

Развитие авиационной техники, особенно турбиностроение, выдвигает постоянно растущие требования к конструкционным материалам. Поэтому разработка новых сплавов, способных работать при повышенных температурах, и поиск новых сочетаний элементов, обеспечивающих повышение жаростойкости и жаропрочности, до сих пор привлекает внимание исследователей.

Сегодня одним из актуальных направлений в области разработки новых металлических материалов с высоким уровнем механических свойств при температурах 600–800 °С является создание сплавов на основе системы Ti–Al ( $\gamma$ -TiAl сплавы). Интерес к этой группе материалов основывается на уникальном сочетании:

- высокой температуры плавления (1460 °С);
- низкой плотности (3,8–4,0 г/см<sup>3</sup>);
- высокой жаростойкости и сопротивлении ползучести при повышенных температурах;
- высокой стойкости к окислению.

Удельный модуль упругости этих сплавов выше, чем титановых и никелевых на 50–70 %, и эта разница сохраняется при повышенных температурах. По удельной прочности  $\gamma$ -TiAl сплавы в интервале температур  $T=600\text{--}850$  °С, в зависимости от структурного состояния, могут превосходить все существующие конструкционные материалы [1–4].

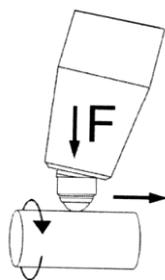
### 2. Объект исследования и его технологический аудит

*Объектом данного исследования* является процесс прокатки поверхности роликами, так как для интерметаллидных сплавов системы Ti–Al до сих пор полностью не изучено влияние такого метода упрочнения на механические свойства.

Прокатка поверхности роликами – это метод обработки поверхности материала, при котором возможно проявление следующие эффектов [5–7]:

- уменьшение шероховатости поверхности;
- возникновение остаточных напряжений 1-го рода;
- увеличение микротвердости.

Принципиальная схема прокатки поверхности роликами представлена на рис. 1 [8].



**Рис. 1.** Принципиальная схема действия прокатки поверхности роликами (F – усилие прокатки, H)

При такой обработке поверхности одновременно происходит наклеп, полирование и возникновение сдавливающих напряжений в верхнем слое. Совместно эти три физических эффекта повышают сопротивление усталости и понижают, либо полностью предотвращают образование трещин при коррозии под напряжением.

При прокатке поверхности ролики прижимаются к поверхности обрабатываемого материала, что приводит к пластической деформации в поверхностной зоне. В результате деформации происходит изменения структуры поверхностных слоев материала, что, в свою очередь, приводит к повышению механических характеристик [9].

Наиболее существенным недостатком интерметаллидных сплавов является их сравнительно низкая пластичность.

### **3. Цель и задачи исследования**

Цель исследования – установление влияния поверхностного упрочнения на усталостные свойства Ti-45Al-5Nb (ат. %) сплава.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Определить шероховатость поверхности Ti-45Al-5Nb (ат. %) сплава до и после обработки поверхности.
2. Провести усталостные испытания сплава в исходном состоянии и после обработки.
3. Установить место возникновения усталостных трещин.

### **4. Исследования существующих решений проблем**

В работах [2, 4, 10] проанализировано состояние исследований в области интерметаллидных сплавов. По данным авторов [10] применение алюминидов титана в конструкции авиационных турбин позволит снизить вес изделий на 40 % от исходной массы. Предполагается, что сплавы  $\gamma$ -TiAl могут заменить существующие материалы в конструкции компрессора низкого давления турбореактивного двигателя (ГТД) и за счет этого повысить качественно соотношение «тяга – вес» самолета [11, 12].

В последнее время большинство исследований в области  $\gamma$ -TiAl сосредоточены на разработке методов их упрочнения. При этом особое внимание уделяется установлению влияния методов поверхностной обработки на высокоцикловую и малоцикловую усталость [13]. Так, например, авторами работы [14] было предложено использовать прокатку поверхности стальными роликами и дробеструйную обработку для повышения усталостных характеристик сплава Ti-6 ат. % Al-4 ат. % V. Показано, что дробеструйная обработка повышает усталостную прочность сплава на 11 %. В работах [15–17] установлено, что дробеструйная обработка поверхности или прокатка поверхности роликами являются эффективными методами поверхностного упрочнения титановых сплавов. При этом упрочняющая обработка поверхности позволяет повысить механические свойства не только поверхностных слоев, но и всего материала. Автором работы [14] было предложено использовать такие методы поверхностного упрочнения для повышения механических свойств сплавов типа интерметаллидов. При исследованиях сплава Ti-45Al-9Nb-0,2C (ат. %) было установлено, что прокатка роликами с нагрузкой 165 Н увеличивает его усталостную прочность почти на 67 %. Очевидно, что эффект поверхностной обработки для сплавов другого состава и термической обработки отличается от этих результатов. Именно поэтому установление влияния упрочняющей поверхностной обработки в сочетании с термической обработкой на механические свойства нового интерметаллидного сплава Ti-45Al-5Nb ат. % является перспективным исследованием.

## 5. Методы исследования

Исследования проводились на сплаве Ti-45Al-5Nb ат. %. Дополнительно в составе сплава содержались 0,2 ат. % С и 0,2 ат. % В. Параметры прокатки поверхности были оптимизированы в ходе предварительных исследований. Установлено, что оптимальным усилием прокатки для данного сплава является 350 Н (рис. 2).

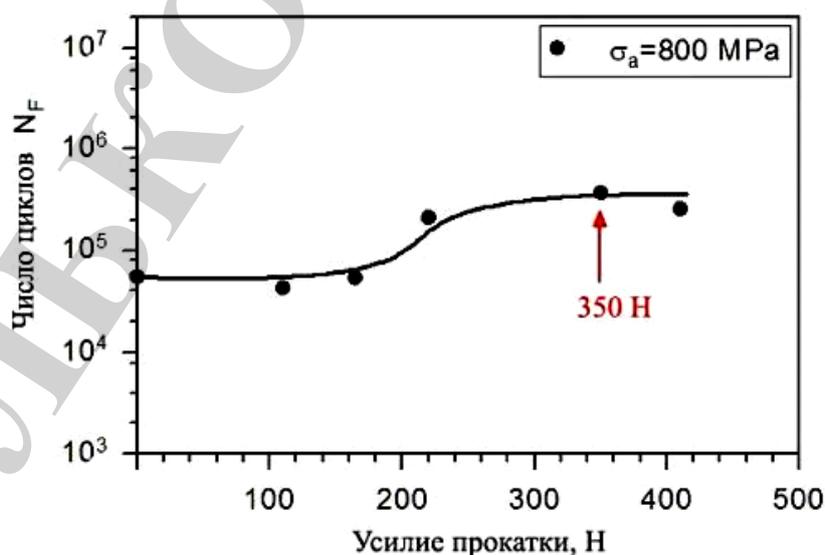


Рис. 2. Оптимизация параметров прокатки поверхности роликами для сплава Ti-45Al-5Nb ат. %.

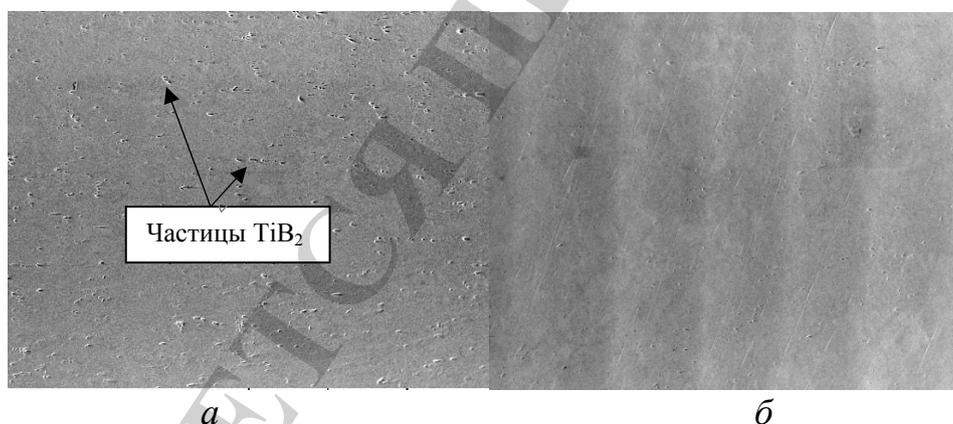
Перед началом испытаний поверхность образцов подвергалась электролитическому полированию. В результате такой обработки на поверхности отсутствовали царапины, а также поверхностные слои не содержали внутренних напряжений.

Усталостные испытания проводились на машине «PUPG» фирмы Шенк (Германия), при комнатной температуре и при частоте цикла 60 Гц. Для усталостных исследований были изготовлены образцы диаметром 8,5 мм и длиной 50 мм. Исследования состояния поверхности были проведены на растровом электронном микроскопе Tescan TS 5130SB (Чехия) при ускоряющем напряжении 15 кВ.

### 6. Результаты исследований

На рис. 3, *а*, *б* показаны изображения поверхности сплава Ti-45Al-5Nb ат. % в исходном состоянии и после прокатки роликами при нагрузке 350 Н. В состоянии после электролитического полирования максимальные значения шероховатости поверхности сплава составляли  $R_y=2,4$  мкм и на поверхности были видны частицы боридов (рис. 2, *а*).

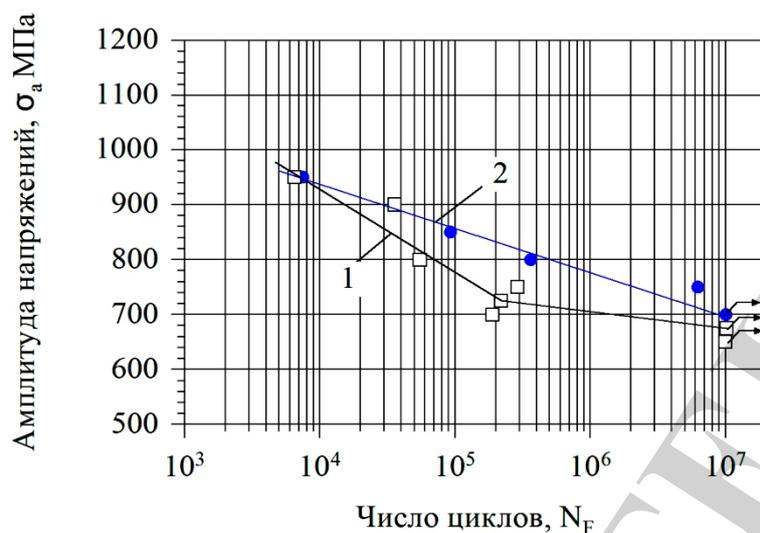
После прокатки поверхности максимальная шероховатость несколько уменьшилась  $R_y=2,0$  мкм. Однако средние значения шероховатости поверхности для обоих образцов были равны ( $R_a=0,2$  мкм). На поверхности образцов отчетливо видны полосы оставленные роликами. Количество боридных частиц на поверхности материала уменьшилось.



**Рис. 3.** Поверхности сплава Ti-45Al-5Nb ат. % :

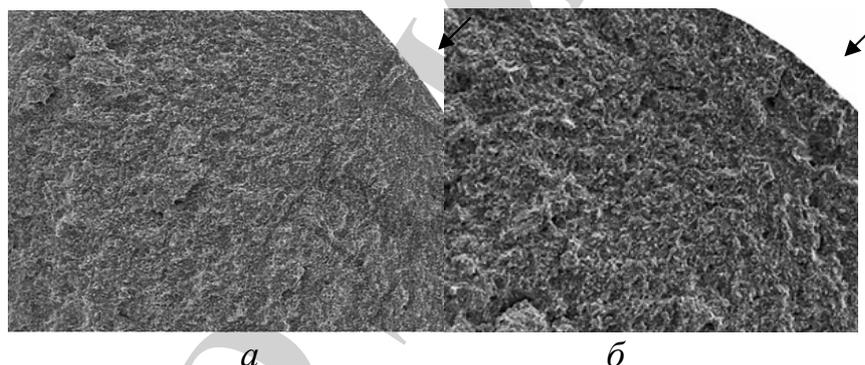
*а* – в исходном состоянии; *б* – после прокатки роликами (x50 мкм)

Результаты усталостных испытаний обобщены на рис. 4. В исходном состоянии усталость сплава Ti-45Al-5Nb ат. % при комнатной температуре равна 675 МПа. После прокатки поверхности усталость повысилась до 725 МПа, что свидетельствует о ее упрочняющем воздействии.



**Рис. 4.** Усталостные кривые сплава Ti-45Al-5Nb ат. %:  
1 – в исходном состоянии; 2 – после прокатки роликами

Анализ фраттограмм (рис. 5) изломов сплава показал, что в исходном состоянии усталостные трещины начинают развиваться на поверхности материала, где уровень остаточных напряжений относительно невелик.



**Рис. 5.** Внешний вид изломов после испытаний на усталость:  
*a* – в исходном состоянии; *б* – после прокатки роликами (x1 мм)

После прокатки усталостные трещины также развиваются от поверхности образца. Это свидетельствует о том, что такая поверхностная обработка не изменяет принципиально условия трещинообразования в интерметаллидных сплавах.

Автором работы [14] было установлено, что прокатка роликами с нагрузкой 165 Н увеличивает усталостную прочность интерметаллидного сплава Ti-45Al-9Nb-0,2C (ат. %) почти на 67 %. Полученные результаты значительно отличаются от результатов, приведенных авторами работы [14]. Очевидно, что эффект поверхностной обработки зависит не только от режима обработки, но и от состава сплавов и их термической обработки.

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

*Strengths.* Наиболее сильной стороной представленного исследования является установленная возможность упрочнения интерметаллидных материалов

за счет деформации их поверхности. Такая принципиальная возможность доказана на примере сплава Ti-45Al-5Nb ат. % и может быть распространена на более широкую группу сплавов.

Повышение усталости сплавов системы Ti-Al позволит в определенной степени увеличить срок службы лопаток газотурбинного двигателя. В конструкциях существующих лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) секции низкого давления изготавливаются из никелевых сплавов типа Inconel (система Ni-Fe-Cr). Плотность таких материалов, например Inconel 718, составляет  $8,19 \text{ г/см}^3$ . Это почти 2 раза больше, чем для исследованного сплава. Соответственно, общий вес секции компрессора низкого давления может быть уменьшен примерно на 40 %. Следует отметить, что рабочие температуры для интерметаллидных сплавов системы Ti-Al также будут выше, чем для системы Ni-Fe-Cr, что позволит повысить КПД двигателя.

*Weaknesses.* Слабой стороной представленного исследования является отсутствие четко установленной зависимости между степенью деформации, как всего материала, так и поверхности, и плотностью дислокаций. Хорошо известно, что пластическая деформация металлов и сплавов приводит к повышению плотности дислокаций. Однако для интерметаллидных материалов такие данные выявить не удалось. Поэтому дальнейшие усилия авторов могут быть направлены именно на установление взаимосвязи степени деформации сплавов Ti-Al с плотностью дислокаций.

*Opportunities.* Одновременно с пластической деформацией поверхности материалов за счет прокатки роликами известны и другие варианты поверхностного упрочнения. К ним относятся: дробеструйная обработка, ультразвуковая обработка или их комбинации. Сочетание поверхностного упрочнения с термической обработкой также не полностью изучено. Поэтому одним из направлений будущих исследований является использование дробеструйной обработки с использованием металлической и керамической дроби для поверхностного упрочнения сплавов системы Ti-Al.

В самом общем случае замена никелевых сплавов в конструкции компрессора низкого давления ГТД на интерметаллидные позволит снизить общий вес турбины и всего самолета. Такое снижение однозначно приведет к снижению расхода топлива и, соответственно, позволит увеличить дальность перелетов и повлияет на стоимость перевозок. Аналогичная ситуация и с автомобильным транспортом. Снижение веса автомобиля на каждые 100 кг приведет к уменьшению расхода топлива в среднем на 0,6 л/100 км.

*Threats.* Широкое промышленное применение сплавов системы Ti-Al ограничивается несколькими факторами. Первый из них – сложность выплавки и литья фасонных изделий из них. Это связано с большой разницей в температурах плавления Ti ( $1668 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Al ( $660,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и Nb ( $2469 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и необходимостью предварительного приготовления лигатур, что удорожает всю технологию. При этом для плавки таких сплавов необходимо использование вакуумных печей, производительность которых меньше чем обычных, а сложность в обслуживании выше.

Вторым фактором является необходимость использования вакуумных установок для прессования турбинных лопаток. Такие устройства еще не доста-

точно распространены и имеют высокую стоимость. Аналогичная ситуация существует и в области термической обработки сплавов Ti-Al.

## 8. Выводы

1. Установлено, что максимальная шероховатость поверхности сплава Ti-45Al-5Nb (ат. %) до обработки поверхности составляла 2,4 мкм и на поверхности были видны частицы, микрорентгеноспектральный анализ которых показал одновременное присутствие пиков Ti и В. Это позволяет их идентифицировать как TiB<sub>2</sub>. После прокатки поверхности роликами шероховатость поверхности снизилась до 2,0 мкм. Количество видимых боридных частиц уменьшилось.

2. Усталостные испытания сплава Ti-45Al-5Nb (ат. %) в состоянии после электролитического полирования поверхности и прокатки роликами показали, что деформация поверхности способствует повышению усталости с 675 МПа до 725 МПа.

3. При исследованиях поверхностей изломов сплава до и после поверхностного упрочнения было установлено, что прокатка роликами принципиально не изменяет место зарождения трещин. Как в исходном сплаве, так и после обработки, усталостные трещины зарождаются на поверхности образца.

## Литература

1. Dimiduk, D. M. Gamma titanium aluminide alloys – an assessment within the competition of aerospace structural materials [Text] / D. M. Dimiduk // Materials Science and Engineering: A. – 1999. – Vol. 263, № 2. – P. 281–288. doi:10.1016/s0921-5093(98)01158-7

2. Peters, M. Titan und Titanlegierung [Text] / ed. by M. Peters, C. Leyens. – Wiley, 2002. – 528 p. doi:10.1002/9783527611089

3. Appel, F. Gamma Titanium Aluminide Alloys [Text] / F. Appel, J. D. H. Paul, M. Oehring. – Wiley, 2011. – 745 p. doi:10.1002/9783527636204

4. Imayev, V. M. Current status of  $\gamma$ -TiAl intermetallic alloys investigations and prospects for the technology developments [Text] / V. M. Imayev, R. M. Imayev, T. I. Oleneva // Letters On Materials. – 2011. – Vol. 1. – P. 25–31.

5. Hoffmeister, J. Beschreibung des Eigenspannungsabbaus in kugelgestrahltem Inconel 718 bei thermischer, quasistatischer und zyklischer Beanspruchung [Electronic resource]: Dissertation / J. Hoffmeister. – Karlsruher Institut für Technologie, 2009. – Available at: \www/URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000014996/1336083>

6. Tehnologii shot peening i peen forming [Electronic resource] // Blastservis. – Available at: \www/URL: <http://blastservis.ru/kat/kabiny-drobestruynnye/kabiny/kabiny-naklep-iuprochnenie/tehnolo-gii-shot-peening-i-peen-forming8143/>

7. OSK-Kiefer GmbH Oberflächen- & Strahltechnik [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://osk-kiefer.de/>

8. Lindemann, J. Influence of Mechanical Surface Treatments on the Fatigue Performance of the Gamma TiAl Alloy Ti-45Al-9Nb-0.2C [Text] / J. Lindemann, A. Kutzsche, M. Oehring, F. Appel // Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 539–543. – P. 1553–1558. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.539-543.1553

9. LLC «Transet» [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://www.transet-tool.com/>

10. Nochovnaia, N. A. Zakonomernosti formirovaniia strukturno-fazovogo sostoianiia splavov na osnoveorto- i gamma-aluminidov titana v protsesse termomehanicheskoi obrabotki [Electronic resource] / N. A. Nochovnaia, P. V. Panin, E. B. Alekseev, A. V. Novak // Vesnik Rossiiskogo fonda fundamental'nyh issledovani. – 2015. – № 1. – Available at: \www/URL: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/bulletin/o\\_1932892](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/bulletin/o_1932892)

11. Kulykovskiy, R. A. Prospects for industrial use titanium aluminide in aeroengine [Text] / R. A. Kulykovskiy, S. N. Pakholka, D. V. Pavlenko // Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Starodubovskie chteniia. – 2015. – Vol. 80. – P. 369–372.

12. Nathal, M. V. Second International Symposium on Structural Intermetallics [Text] / M. V. Nathal, R. Darolia, C. T. Liu, P. L. Martin, D. B. Miracle. – Warrendale PA: Minerals Metals and Materials Society, 1997. – 952 p.

13. Hénaff, G. Fatigue properties of TiAl alloys [Text] / G. Hénaff, A.-L. Gloanec // Intermetallics. – 2005. – Vol. 13, № 5. – P. 543–558. doi:10.1016/j.intermet.2004.09.007

14. Steinert, R. Surface effects on mechanical properties of materials for elevated temperature applications [Electronic resource] / R. Steinert, J. Lindemann, O. Berdova, M. Glavatskikh, C. Leyens. – Cottbus: Brandenburg University of Technology. – Available at: \www/URL: <http://www.extremat.org/ib/site/documents/media/6cb655a4-c1e9-0d9a-25b4-6651c3edec1a.pdf/STEINERT.pdf>

15. Berg, A. Elevated Temperature Fatigue Behavior of Timetal 1100 [Text] / A. Berg, J. Lindemann, L. Wagner // Fatigue '96. – 1996. – P. 879–884. doi:10.1016/b978-008042268-8/50025-3

16. Glavatskikh, M. Improvement of fatigue behavior of  $\gamma$ -TiAl-Alloys by means of mechanical surface treatment [Electronic resource]: Doctoral Thesis / M. Glavatskikh. – 2011. – Available at: \www/URL: <https://opus4.kobv.de/opus4-btu/frontdoor/index/index/docId/%202207>

17. Lindemann, J. Influence of Mechanical Surface Treatments on the High Cycle Fatigue Performance of Gamma Titanium Aluminides [Text] / J. Lindemann, M. Glavatskikh, C. Leyens, M. Oehring, F. Appel // Ti-2007 Science and Technology. – The Japan Institute of Metals, 2007. – Vol. II. – P. 1703.