

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 (γ -TiAl сплавы). Интерес к этой группе материалов основывается на уникальном сочетании:

- высокой температуры плавления (1460 °С);
- низкой плотности (3,8–4,0 г/см³);
- 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 γ -TiAl сплавы в интервале температур $T=600$ –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].

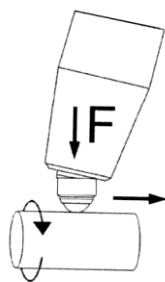


Рис. 1. Принципиальная схема действия прокатки поверхности роликами (F – усилие прокатки, H)

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 γ -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 γ -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).

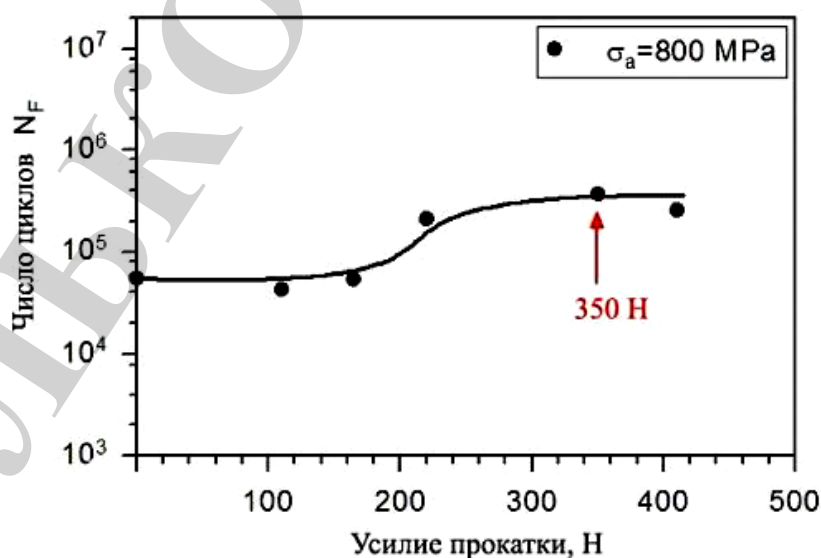


Рис. 2. Оптимизация параметров прокатки поверхности роликами для сплава Ti-45Al-5Nb ат. %.

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.

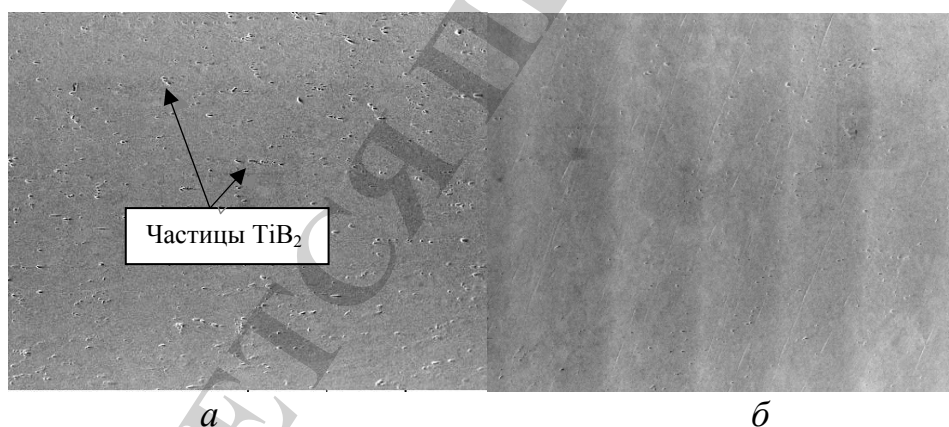


Рис. 3. Поверхности сплава Ti-45Al-5Nb ат. % :

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.

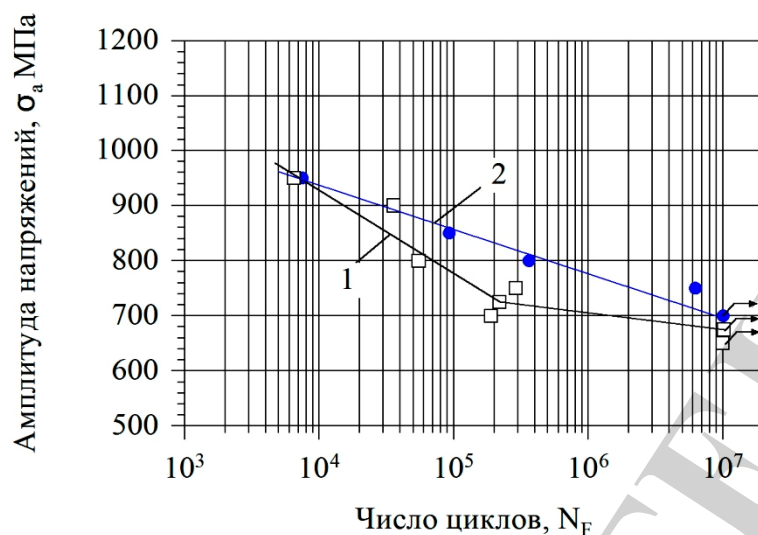


Рис. 4. Усталостные кривые сплава Ti-45Al-5Nb ат. %:
1 – в исходном состоянии; 2 – после прокатки роликами

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

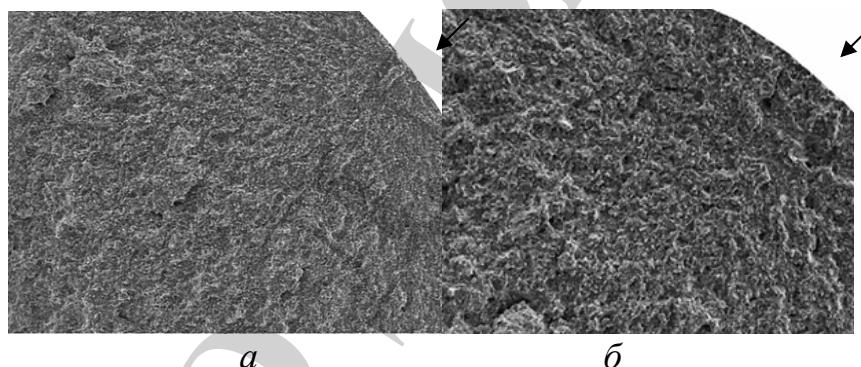


Рис. 5. Внешний вид изломов после испытаний на усталость:
a – в исходном состоянии; *б* – после прокатки роликами (x1 мм)

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 TiB₂. 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 γ -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

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 γ -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.