



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.025



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В СЛОИСТОЙ АЛЮМИНИЙ-ТИТАНОВОЙ ЗАГОТОВКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ПОРОШКА

Анастасия Александровна Штырова ¹, Екатерина Александровна Носова ²

^{1,2} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

¹ 4103.ssau@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8401-5227>

² eanosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

Аннотация. Снижение пористости спечённых образцов из материалов системы Al-Ti позволяет повысить механические свойства. В статье предлагается для снижения пористости применять порошки различного гранулометрического состава. Получены слоистые алюминий-титановые заготовки в результате холодной прокатки и отжига с частицами титанового порошка в диапазоне 0,25...1,2 мм. Выявлено, что порошок титана с преимущественно мелкой фракцией 0,25...0,63 мм имеет довольно высокую неоднородность размера относительно среднего значения, что подтверждается увеличением показателей неоднородности и стандартного отклонения размера частиц по мере уменьшения их среднего размера. Уменьшение среднего размера частиц порошка титана от 0,9-1,5 мм до 0,25-0,63 мм внутри алюминиевой оболочки при последующей холодной прокатке приводит к повышению предела прочности на 7-10%, повышению относительного удлинения в среднем от 8 до 11 %, существенного изменения предела текучести при изменении размера частиц не наблюдается.

Ключевые слова: алюминий, титановый порошок, слоистые заготовки, холодная деформация, отжиг, прочностные характеристики, механические свойства, различный гранулометрический состав

Благодарности: авторы выражают признательность коллегам за помощь, благодарность за научную и техническую поддержку исследования.

Для цитирования: Штырова А. А., Носова Е. А., Исследование прочностных характеристик в слоистой алюминий-титановой заготовке в зависимости от размера частиц порошка // Ползуновский вестник. 2025. № 4. С. 152–156. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.025. EDN: <https://elibrary.ru/WQGJVB>.

Original article

STRENGTH PROPERTIES IN A LAMINATED ALUMINIUM-TITANIUM BLANK ACCORDING TO PARTICLE SIZE OF POWDER

Anastasia A. Shtyrova ¹, Ekaterina A. Nosova ²

^{1,2} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

¹ 4103.ssau@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8401-5227>

² eanosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

Abstract. Reducing the porosity of sintered samples from Al-Ti system materials allows to improve mechanical properties. The article proposes to reduce the porosity by using powders of different granulometric composition. Laminated aluminium-titanium blanks are obtained by cold rolling and annealing with titanium powder particles in the range of 0.25...1.2 mm. It was found that titanium powder with predominantly small fraction 0.25... 0.63 mm has a fairly high heterogeneity of size relative to the mean, which is confirmed by increasing the heterogeneity and standard deviation of particle size as their average size decreases. Reducing the average particle size of titanium powder from 0.9-1.5 mm to 0.25-0.63 mm inside the aluminum shell when cold rolling results in a strength increase of 7-10 %, an increase in relative elongation on average from 8 to 11 %, There is no significant change in the yield point when the particle size changes.

Keywords: aluminum, titanium powder, layered blanks, cold deformation, annealing, strength characteristics, mechanical properties, various granulometric composition

Acknowledgements: The authors express their appreciation to colleagues for their help, gratitude for scientific and technical support of the study.

For citation: Shtyrova, A. A. & Nosova, E.A. (2025). Strength properties in a laminated aluminium-titanium blank according to particle size of powder. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 152-156. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.025. EDN: <https://elibrary.ru/WQGJVB>.

© Штырова А. А., Носова Е. А., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В СЛОИСТОЙ АЛЮМИНИЙ-ТИТАНОВОЙ ЗАГОТОВКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ПОРОШКА

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко исследуются и находят применение многокомпонентные (многоэлементные, многофазные, конструкционные и т.д.) материалы. Среди них можно выделить материалы на основе системы Al-Ti, обладающие набором уникальных физико-механических, химических и эксплуатационных свойств. [1-12]. Титан-алюминиевые композиты широко применяются при создании материалов с высокими прочностью, жаро- и коррозионной стойкостью, температурой плавления и т.д. Одним из способов создания композиционных материалов являются методы порошковой металлургии. [13].

Основной проблемой при создании материалов с интерметаллидным упрочнением методами порошковой металлургии является пористость [14]. Этот дефект структуры приводит к снижению механических свойств получаемых материалов. Известно [14], что повышение плотности можно достичь увеличением давления или степени обжатия при компактировании. Однако избыточное давление может приводить к возникновению трещин и снижению прочности [15].

Анализ структурных изменений при спекающем отжиге для формирования интерметаллидов в системе Al-Ti показывает, что прессованные или катанные заготовки, обладающие довольно высокой плотностью и низкой пористостью, после отжига приобретают пористость, которая вызвана изменением объёмной доли структур в результате протекания химических реакций [15].

Пластическая деформация для получения интерметаллидов в системе Al-Ti позволяет нарушить сплошную оксидную плёнку самопассивирующихся алюминия титана, обеспечивая контакт чистых металлов и их взаимную диффузию, в то время как оксидные плёнки создают барьер для образования интерметаллидов. Известно [14], что высокая прессуемость металлов, т.е. вероятность образовывать плотные низкопористые брикеты, зависит как от пластичности уплотняемых материалов, так и от размера частиц. Установлено, что наилучшей прессуемостью обладают материалы с высокой пластичностью: алюминий, железо, медь. Однако при размере частиц менее 100 мкм их способность к образованию плотных конгломератов и структур практически полностью отсутствует [13-15]. Поэтому толщина интерметаллидных прослоек регламентирована и не может быть меньше определённой величины. Это касается не только порошковых, но и компактных материалов, для соединения которых пластическим деформированием применяются обжатия не менее 50% [16-18], но при толщине исходных заготовок менее 0,5 мм из пластичных алюминиевых сплавов необходимы очень высокие обжатия и усилия, которые реализовать на традиционном оборудовании практически невозможно.

В работе [19] исследованы титан-алюминиевые композиционные материалы, полученные одноосным прессованием при давлении 520 МПа смеси порошков титана (ПТМ-1) и алюминия (ПА-4) с размером частиц не более 100 мкм и последующим твердофазным спеканием на воздухе при температуре 600°C. Анализ микроструктуры образцов композита показал, что увеличение содержания алюминия от 5 до 50% приводит к снижению пористости от 15 до 4% за счёт большей пластичности алюминия, который при прессовании заполняет пространство между зёрнами титана. Однако такой подход не всегда применим при определённом стехиометрическом составе материала.

Одним из способов решения вопроса повышения

плотности изделий при требуемом химическом составе является заполнение пространства между частицами за счёт применения порошков определённого гранулометрического состава.

Цель настоящей работы - исследование влияния размера частиц титана в слоистой алюминий-титановой заготовке, после холодной прокатки и последующего твердофазного спекания на пористость и механические свойства получаемых образцов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Исходными материалами являлись трубные заготовки из технического алюминия диаметром 10 мм с толщиной стенки 1 мм и титановый порошок марки ПТК. Для обеспечения концентрации титана в конечном материале менее 30% и равномерного распределения частиц порошка трубки предварительно прокатывались в холодном состоянии до получения зазора между стенками 2 мм. Таким образом исходная толщина заготовок была около 4 мм. Для восстановления пластичности алюминиевые заготовки подвергались отжигу при температуре 480°C в течение 30 минут. Затем трубки были заполнены титановым порошком с разным гранулометрическим составом: 0,25-0,63 мм; 0,63-0,9 мм; 0,9-1,2 мм и подвергались холодной прокатке последовательно до толщины образцов 2 мм со степенью обжатия соответственно 50%. Гранулометрический состав определяли ситовым методом со стандартным набором сит. На основании результатов ситового анализа отделялись фракции порошка с преимущественным размером частиц. Неоднородность гранулометрического состава Δd рассчитывали по формуле: $\Delta d = (d_{\max} - d_{\min}) / d_{\text{cp}}$, где d_{\max} , d_{\min} , d_{cp} - соответственно размер ячейки сита с наиболее крупными частицами, наименее крупными частицами, среднеарифметическое значений для выбранного диапазона размера частиц. Кроме этого, для оценки неравномерности гранулометрического состава применяли показатель стандартного отклонения.

Для полученных образцов проведены испытания на одноосное растяжение при комнатной температуре по ГОСТ 1497-84. В результате проведенных испытаний были получены зависимости предела прочности, предела текучести и относительного удлинения от размеров частиц порошка титана.

Для изучения микроструктуры и равномерности распределения частиц по толщине образцов из них вырезались поперечные микрошлифы на расстоянии 100 мм. На полученных шлифах проводили измерение толщины прослойки из титана в 3 точках поперечного сечения: в центре и на расстоянии 1/2 от до края прослойки (рис. 1).

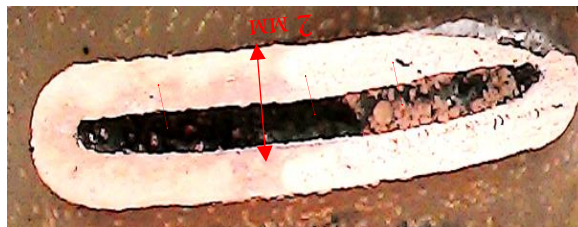


Рисунок 1 - Макроструктура области раздела титана и алюминия после прокатки и отжига с порошком 0,63-0,9 мм, стрелками показаны приблизительные места определения толщины прослойки

Figure 1 - Macrostructure of the titanium-aluminum interface after rolling and annealing with powder 0.63-0.9 mm

По полученным значениям толщины прослойки построены графики вероятности значений толщины в различных сечениях образцов и разнотолщинности прослойки в образцах с различным гранулометрическим составом (рис. 7, 8). Разнотолщинность Δt рассчитывалась по формуле: $\Delta t = \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{cp}}$, где t_{max} , t_{min} , t_{cp} – максимальное, минимальное и среднее значение толщины прослойки титана в образце.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 показаны зависимости предела прочности, предела текучести и относительного удлинения образцов от среднего размера частиц порошка титана.

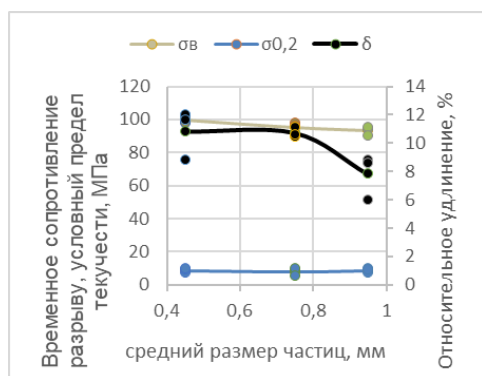


Рисунок 2 – Зависимости предела прочности, предела текучести и относительного удлинения образцов от среднего размера частиц

Figure 2 - Dependences of strength, limit of fluidity and relative lengthening of samples on the average size of particles

Анализ зависимостей показывает, что уменьшение среднего размера частиц от 0,9-1,5 мм до 0,25-0,63 приводит к незначительному, на 7-10 %, повышению предела прочности, повышению относительного удлинения в среднем от 8 до 11 %, существенного изменения предела текучести при изменении размера частиц не наблюдается.

Микроструктура образцов после деформирования с различным гранулометрическим составом и отжига при температуре 650°C в течение 1 часа представлена на рисунках 3-5.

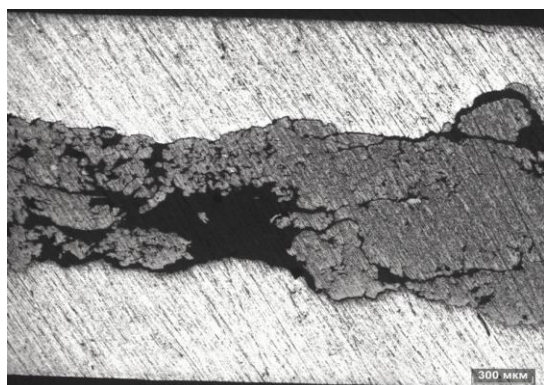


Рисунок 3 – Микроструктура области раздела титана и алюминия после прокатки и отжига с порошком 0,25-0,63мм

Figure 3 - Microstructure of the titanium-aluminum interface area after rolling and annealing with powder 0.25-0.63 mm

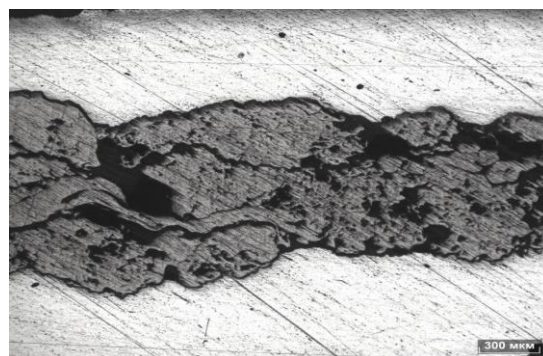


Рисунок 4 – Микроструктура области раздела титана и алюминия после прокатки и отжига с порошком 0,63-0,9 мм

Figure 4 – Microstructure of the titanium-aluminum interface area after rolling and annealing with powder 0.63-0.9 mm

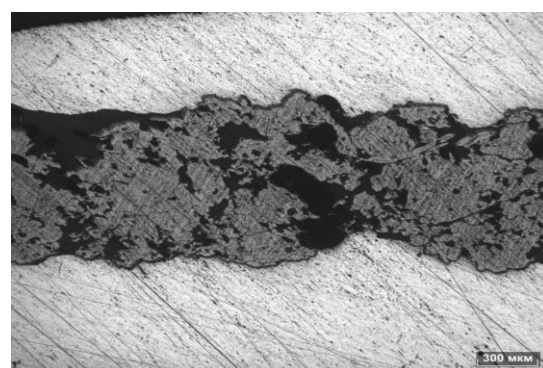


Рисунок 5 - Микроструктура области раздела титана и алюминия после прокатки и отжига с порошком ≥0,9 мм

Figure 5 - Microstructure of the titanium-aluminum interface area after rolling and annealing with powder ≥0.9 mm

Из анализа макро- и микроструктур видно, что при указанных режимах сохраняются индивидуальные структуры алюминия и титана, а также сохраняется равномерность распределения титановых частиц. На границе алюминия и титана наблюдается контактная поверхность материалов, в прослойке титана наблюдаются полости, частицы порошка деформированы. Особенно на рисунке 4 наблюдается сильное утонение одной из частиц, а на рисунке 3 видно, что полость образована из-за разрушения частицы порошка. Такая особенность структуры может влиять на изменение прочностных характеристик [17,19,20].

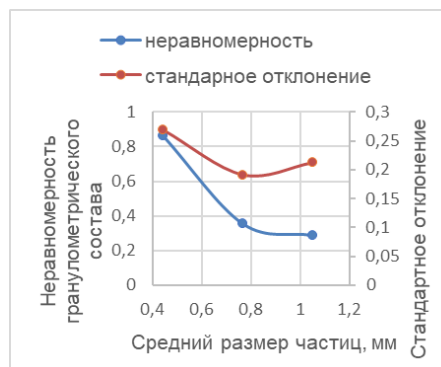


Рисунок 6– Неравномерность размера частиц исходного порошка

Figure 6 - Unevenness of the Size of Particles of Initial Powder

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В СЛОИСТОЙ АЛЮМИНИЙ-ТИТАНОВОЙ ЗАГОТОВКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ПОРОШКА

С одной стороны, пластическая деформация, приводящая к измельчению частиц, вызывает их измельчение, с другой стороны, микроразрушения и высокая доля упругой деформации титана вызывает появление полостей, снижающих плотность материала.

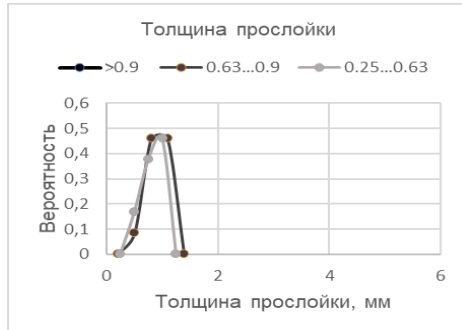


Рисунок 7 – Распределение вероятности значений толщины прослойки в образцах с разным исходным гранулометрическим составом порошка титана

Figure 7 – Distribution of probability of values of thickness of layer in samples with different original particle size distribution of powder of titanium

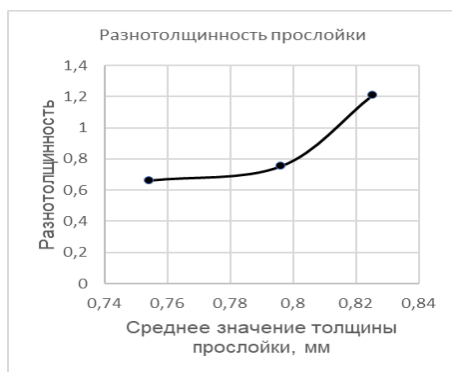


Рисунок 8 – Разнотолщинность прослойки в образцах с разным исходным гранулометрическим составом порошка титана

Figure 8 – Unevenness of layers in samples with different initial particle size distribution of powder of titanium

Анализ гранулометрического состава исходного порошка на основании рисунка 6, показывает, что порошок с преимущественно мелкой фракцией имеет довольно высокую неоднородность размера относительно среднего значения, что подтверждается увеличением показателей неоднородности и стандартного отклонения размера частиц по мере уменьшения их среднего размера.

Из рисунка 7, выбор порошка с крупными частицами 0,9...1,2 мм приводит к получению прослойки с преимущественной толщиной 1,1...1,2 мм и самым высоким показателем разнотолщинности 1,2. Наполнение образца порошком с меньшим гранулометрическим составом 0,25...0,63 позволяет получить меньшую толщину прослойки в среднем около 0,755 мм и разнотолщинность около 0,65. Отметим, что заполнение заготовки порошком с промежуточными значениями гранулометрического состава 0,63...0,9 мм приводит к получению средней толщины прослойки 0,795 мм и разнотолщинности 0,755. Таким образом, формируется прослойка, состоящая из нескольких частиц по толщине зазора, которые в результате прокатки уплотняются и деформируются.

Из графика на рисунке 8, наибольшее выравнивание толщины прослойки наблюдается при уменьшении гранулометрического состава от 0,9...1,2 до 0,63...0,9 мм. Дальнейшее уменьшение частиц не вызывает существенно повышения разнотолщинности, а соответственно равномерности распределения частиц порошка.

Технический алюминий марок АД0 и АД1 в отожжённом состоянии в зависимости от вида полуфабриката имеет временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 60...110$ МПа, относительное удлинение $\delta = 20...28$ %; предел текучести не регламентируется, но представленная в [21], позволяет оценить условный предел текучести на уровне $\sigma_{0,2} = 25...40$ МПа. Обжатие алюминия в холодном состоянии со степенью около 50% приводит, как правило к повышению предела прочности в 1,5...2 раза в зависимости от степени чистоты, похожие изменения происходят с пределом текучести, а относительное удлинение уменьшается в 8...10 раз. Сопоставление полученных результатов с указанными механическими свойствами чистого алюминия показывает, что добавление частиц титана и холодная прокатка приводят к незначительному росту временного сопротивления разрыву полученного материала по сравнению с нагартовкой. Причиной такого изменения свойств могут служить неровности внутренней поверхности алюминиевой оболочки, выступающие концентраторами напряжений и инициаторами последующего образования микроразрушений. Несомненно, на первых проходах прокатки образца происходит уплотнение порошка титана, и только затем пластическая деформация затрагивает алюминиевую оболочку. Выбор более мелкой фракции порошка со средним размером 0,25...0,63 мм позволяет уменьшить высоту неровностей поверхности алюминиевой оболочки, что позволяет повысить показатели прочности, а также получить относительно высокие показатели относительного удлинения 10...11%, характерные для алюминия после нагартовки со степенью деформации 7...10 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено исследование структуры и свойств образцов из технического чистого алюминия, заполненных порошком титана различного гранулометрического состава.

Выявлено, что порошок титана с преимущественно мелкой фракцией 0,25...0,63 мм имеет довольно высокую неоднородность размера относительно среднего значения, что подтверждается увеличением показателей неоднородности и стандартного отклонения размера частиц по мере уменьшения их среднего размера.

Применение порошка с крупными частицами 0,9...1,2 мм приводит к получению прослойки с преимущественной толщиной 1,1...1,2 мм и самым высоким показателем разнотолщинности 1,2. Наполнение образца порошком с меньшим гранулометрическим составом 0,25...0,63 позволяет получить меньшую толщину прослойки в среднем около 0,755 мм и разнотолщинность около 0,65. Заполнение заготовки порошком с промежуточными значениями гранулометрического состава 0,63...0,9 мм приводит к получению средней толщины прослойки 0,795 мм и разнотолщинности 0,755. Следовательно, формируется прослойка, состоящая из нескольких частиц по толщине зазора, которые в результате прокатки уплотняются и деформируются.

Наибольшее выравнивание толщины прослойки

наблюдается при уменьшении гранулометрического состава от 0,9...1,2 до 0,63...0,9 мм. Дальнейшее уменьшение размера частиц не вызывает существенного повышения разнотолщинности, а соответственно равномерности распределения частиц порошка.

Уменьшение среднего размера частиц порошка титана от 0,9-1,5 мм до 0,25-0,63 внутри алюминиевой оболочки при последующей холодной прокатке приводит к повышению предела прочности на 7-10%, повышению относительного удлинения в среднем от 8 до 11 %, существенного изменения предела текучести при изменении размера частиц не наблюдается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности деформирования и кинетика диффузии в сваренном взрывом титано-алюминиевом композите / Трыков Ю.П. [и др.]. // Физика и химия обработанных материалов. 2004. №3. С.50.
2. Пячин С.А., Бурков А.А., Комарова В.С. Формирование и исследование электроискровых покрытий на основе алюминидов титана // Поверхности. Рентгеновские, синхротронные и нейронные исследования. 2013. №6. С.16.
3. Максимова С.В. Формирование паяных соединений алюминидов титана // Автоматическая сварка. 2009. №3. С.7.
4. Формирование наноразмерных интерметаллидных фаз в условиях имплантации ионами алюминия титановых мишеней / Курзина И.А. [и др.]. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т.76, № 11. С.1384.
5. Прибытков, Г.А., Андреева, И.А., Коржова, В.В. Структурные превращения на поверхности Al-Ti катодов под воздействием вакуумной дуги // Физика и химия обработанных материалов. 2011. № 1. С.18.
6. Структурообразование при спекании порошковых смесей Ti-Cu / Прибытков Г.А. [и др.]. // Изв. вузов Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. № 4. С. 16.
7. Фирсина И.А. Разработка способов получения порошковых катодов Ti-Al, Ti-Al-Si для ионно-плазменного синтеза нитридных покрытий: автореферат диссертации кандидата технических наук. Томск: ИФПМ СО РАН, 2012.
8. Состав, структура и свойства свс-прессованных катодов системы Ti-C-Al-Si и полученных из них вакуумно-дуговых покрытий / Амосов А.П. [и др.]. // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. № 1. С.46.
9. Veprek, S., Veprek-Heijman, M. G. J., Karvankova, P., & Prochazka, J. (2005). Different approaches to superhard coatings and nanocomposites. *Thin Solid Films*, 476(1), 1–29. doi:10.1016/j.tsf.2004.10.053
10. PalDey, S., & Deevi, S. (2003). Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al) N: a review. *Materials Science and Engineering: A*, 342(1-2), 58–79. doi:10.1016/s0921-5093(02)00259-9/.
11. Ионно-плазменные покрытия Ti-Al-N на режущем твердосплавном инструменте, работающем в условиях постоянных и знакопеременных нагрузок / Аникин В.Н. [и др.]. // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2009. № 1. С.44.
12. Панькин Н.А. (Ti, Al) – композиционные материалы, полученные прессованием с последующим спеканием на воздухе. Структура и свойства // Изв. высш. учебн. завед. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2015. №1 (33). С. 156-167.
13. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия: Учебник для техникумов. Изд. 3, перераб. 1991. 432 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.

14. Штырова А.А., Носова Е.А. Исследование микротвердости структур в слоистой алюминий-титановой заготовке, полученной в результате прокатки и отжига. // В сборнике: металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXII международной научно-практической конференции. в 2-х частях. под общей редакцией А.Б. Юрьева. Новокузнецк, 2021. с. 281-285.

15. Колесников А.Г., Кузнецов Д.А., Гриша Д.К. Исследование прокатываемости биметаллического листа из сталь-титана // в сборнике: Маштех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении. Сборник трудов международной научно-технической конференции. Москва: МГТУ, 2022. С. 180-182.

16. Колесников А.Г., Салманов Э.А. Исследование силовых параметров прокатки многослойных материалов // в сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов двенадцатой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). 2019. с. 419-420.

17. Формирование структурно-фазового состояния многослойного композита Al-Ti, полученного сваркой взрывом, при многостадийном отжиге / Лесков М.Б. [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. Т. 16. № 2. С. 249-255.

18. Исследование структуры (Ti, Al)-композитов, полученных холодным прессованием порошков и твердофазным спеканием / Панькин Н.А. [и др.]. // Тугоплавкие, керамические и композиционные материалы. // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. №1. С.27-31.

19. Рекристаллизационное поведение при горячей деформации технически чистого титана, модифицированного бором / Гайсин Р.А. [и др.]. // Физика металлов и металловедение. 2015.

20. Влияние исходного структурного состояния технического титана ВТ1-0 на изменение микроструктуры и микротвердости его поверхностного слоя в процессе ультразвуковой обработки / Р. Р. Хайруллин ; науч. рук. А. В. Панин // Инженерия для освоения космоса : сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного форума с международным участием, г. Томск, 12-14 апреля 2016 г. Томск : Изд-во ТПУ, 2016. [С. 109-112].

21. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.

Информация об авторах

А. А. Штырова – аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Е. А. Носова — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Information about the authors

A. A. Shtyrova – postgraduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science of the Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev.

E. A. Nosova - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science of the Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev.