

УДК 620.539.4: 621., P.A.C.S. 81.30.Hd: / 81.40.Jj

Coordination of structure characteristics and structural strength of titanium alloys of martensitic and transitional classes

Согласование характеристик структуры и конструкционной прочности титановых сплавов мартенситного и переходного классов

T. A. Murataev¹, A. B. Frolova², F. I. Murataev³
T. A. Муратаев¹, А. Б. Фролова², Ф. И. Муратаев³

¹ Kazan National Research Technological University, K. Marx Str. 68, Kazan, 420111, Russia

^{2,3} Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI, K. Marx Str. 10, Kazan, 420111, Russia

³ fmurataev@bk.ru

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 68

^{2,3} Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, Россия, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

³ fmurataev@bk.ru

ABSTRACT

Various structural states and characteristics of the structural strength of titanium alloys have been investigated in a wide range of properties. Relationships of the influence of microstructure indices of titanium alloys of martensitic and transitional classes on representative characteristics of structural strength are established. Among them: ultimate plasticity, uniform plasticity, Ilyushin's modulus, which comprehensively characterizes the degree of hardening of a material, its strength and plasticity margin, coefficient of strain hardening, resistance to separation and static crack resistance of high-strength titanium alloys in the following technological states: disk of a high-pressure stage of a GTE compressor, forging, stamping and samples after surface impact hardening by laser. The obtained dependences are characterized by an adequate and stable regression relationship between the sizes of the phases of the microstructure and properties, which makes it possible to choose alloys and substantiate effective technologies for their processing. As parameters of the structure, reflecting the essence of the influence of the composition of titanium alloys and processing technology (rolling, forging, stamping and heat treatment) on the performance of alloys, the ratio of the sizes of the initial and converted low-temperature component – α of the solid solution is proposed. The proposed direct (linear) and power-law dependences of properties on the parameters of the structure of titanium alloys make it possible to expedite the substantiation of the modes of their technologies, significantly reducing the amount of experimental confirmation of consistency and optimality.

KEYWORDS

Titanium alloys; structural strength; microstructure.

АННОТАЦИЯ

Исследованы различные структурные состояния и характеристики конструкционной прочности титановых сплавов в широком диапазоне свойств. Установлены соотношения влияния показателей микроструктуры титановых сплавов мартенситного и переходного классов на представительные характеристики конструкционной прочности. Среди них: предельная пластичность, равномерная пластичность, модуль Ильюшина – комплексно характеризующий степень упрочнения материала, его прочность и запас пластичности, коэффициент деформационного упрочнения, сопротивление отрыву и статической трещиностойкости высокопрочных титановых сплавов в вариантах технологических состояний: диск высоконапорной ступени компрессора ГТД, поковка, штамповки и образцы после поверхностного ударного упрочнения лазером. Полученные зависимости характеризуются адекватной и устойчивой регрессионной связью размеров фаз микроструктуры и свойств, позволяющей выбирать сплавы и обосновывать эффективные технологии их обработки. В качестве параметров структуры, отражающих существо влияния состава титановых сплавов

и технологии обработки (прокат, ковка, штамповка и термическая обработка) на работоспособность сплавов предложено соотношение размеров исходной и превращенной низкотемпературной составляющей – α -твердого раствора. Предложенные прямая (линейная) и степенные зависимости свойств от параметров структуры титановых сплавов позволяют ускоренно обосновывать режимы их технологий, существенно сокращая объем экспериментального подтверждения состоятельности и оптимальности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сплавы титана; конструкционная прочность; микроструктура.

Введение

Постоянно возрастающие требования повышения удельных мощностей, энергосбережения и ресурса транспортной и стационарной (энергетической) техники усложняет задачу обеспечения их безопасности и надежной эксплуатации [1–8]. Контроль качества материалов высоконагруженных элементов технических устройств выполняется по комплексу свойств, определяющих статическую прочность, ударную вязкость, трещиностойкость и циклическую долговечность. Для полного представления о несущей способности материалов оценку их качества необходимо проводить с учетом конструктивных и технологических особенностей деталей. Для массивных дисков компрессора характерно сочетание неоднородности структуры и свойств в различных зонах – полотно, ободной части и ступице [3–5]. Кроме того, такие участки могут существенно отличаться разной механической и тепловой нагруженностью, условиями напряженно-деформированного состояния и воздействием агрессивной среды [9–14]. В связи с этим становятся актуальными вопросы выбора таких характеристик структуры и механических свойств, которые могут позволить согласовывать их для установления закономерностей в системе условий работы, включая нагруженность материала – состав – технология – структура – свойства [13–21].

Титановые сплавы мартенситного и переходного классов широко используются в производстве элементов авиационной техники, собственно деталей компрессора, реверса, а также других составляющих ГТД, благодаря

их высокой весовой отдаче и конструкционной прочности (КП) [13, 14, 22, 23]. Они обеспечивают достаточную работоспособность до уровней температур 500...550 °С в условиях комбинированного воздействия растяжения-сжатия в сочетании с изгибом [3–6], причем в ободной части и ступице дисков возникают условия сложного напряженно-деформированного состояния [3–6]. В высоконапорных ступенях компрессоров (с высокой степенью сжатия воздуха) возникает необходимость проработки массивных участков металла диска при ковке и штамповке, чему отвечает титановый сплав переходного класса ВТ22 [5, 13, 14].

Целью исследований является установление надежных закономерностей, структуры и свойств титановых сплавов мартенситного и переходного классов соответственно: ВТ6, ВТ8М и ВТ22 в вариантах их различных технологических состояний [5, 13, 14].

1. Методика исследований

Исследования проводятся на образцах и микрошлифах титановых сплавов ВТ22, ВТ6, ВТ8М, реализованных в широком диапазоне технологических и структурных состояний, обеспечивающих большие интервалы характеристик КП. Сплав ВТ22 представлен технологическими вариантами: диск, штамповки в 3, 5 и 8 переходов, остальные сплавы в вариантах поковок, штамповок, круга и плит.

Металлографические исследования выполняются на сканирующем электронном микроскопе Auriga Cross Beam с программным обеспечением Smart Sem [5, 6].

Определение механических свойств выполняется на базе «лаборатории проблем усталости» и «лаборатории контроля качества материалов и технологий» КНИТУ-КАИ. Лазерное ударное упрочнение сплавов осуществляется модулем импульсной лазерной наплавки на базе волоконного генератора ЛС-10 [23–25].

2. Результаты

Устанавливаются закономерности согласования характеристик структуры по соотношению фаз α/α_n (размеров исходной и превращенной низкотемпературной α_n -фазы) и показателей КП сплавов – трещиностойкости (K_{IC}) и истинной диаграммы деформирования: S_K – сопротивление отрыву, $m^{(0)}$ – коэффициент деформационного упрочнения, ψ и E_K – модуль Ильюшина – комплексно характеризующий степень упрочнения материала и его запас пластичности (рис. 1). Структура сплавов ВТ6 и ВТ8М определяется видом упрочнения и степенью рекристаллизации;

она состоит из низкотемпературной – с разной степенью рекристаллизации формы и размеров α -фазы и высокодисперсной α_n -фазы, превращенных α' и α'' -мартенситов разной дисперсности. Промежуточное состояние микроструктуры сплава ВТ6 ($\alpha + \alpha_n + \alpha' + \alpha''$) трансформируется в варианты, представленные на рис. 2.

В сплаве переходного класса ВТ22 структура определяется режимами мягкой закалки двойного или изотермического отжига, состоит из низкотемпературной с разной степенью рекристаллизации, формы и размеров α -фазы, высокодисперсной (превращенной) α_n -фазы, превращенного α' -мартенсита, α'' -мартенсита и превращенной β' -фазы разной дисперсности.

Характеристики сплавов меняются в широком интервале значений от вариантов состояний металла: α/α_n – до 5,5 раз, ψ – до 5,4 раз, модуля Ильюшина (E_K) – до 5 раз, критического коэффициента интенсивности напряжений (K_{IC}) – до 2-х раз (рис. 3).

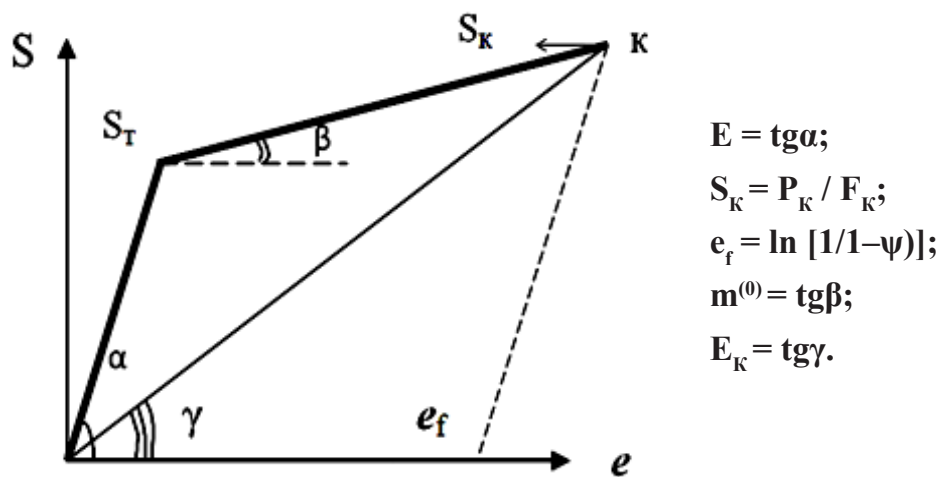


Рис. 1. Характеристики истинной диаграммы деформирования при растяжении

Fig. 1. Characteristics of the true tensile strain diagram

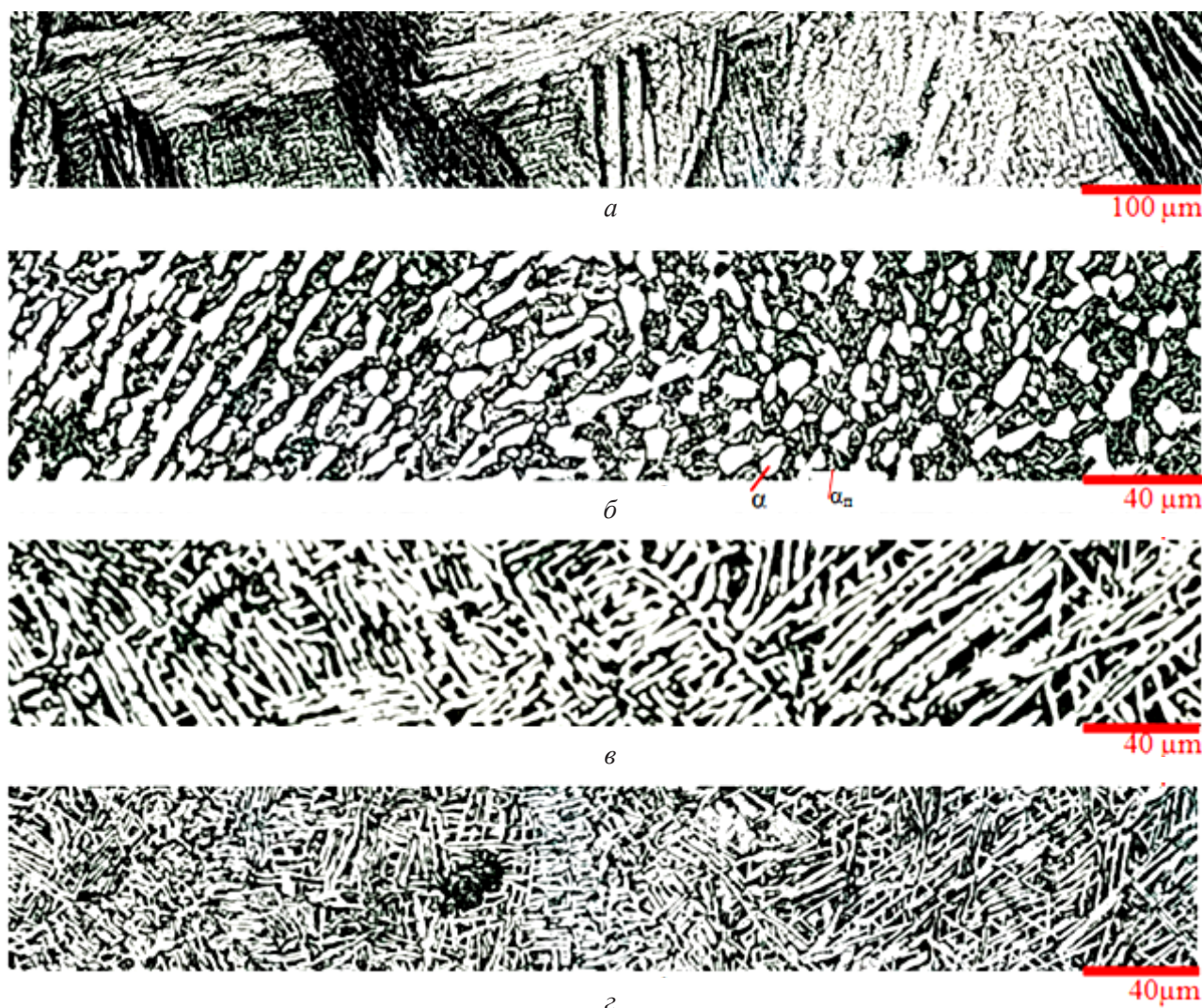


Рис. 2. Примеры микроструктуры сплава ВТ6 ($\alpha + \alpha_{п} + \alpha' + \alpha''$) в вариантах состояний: *а* – лазерное ударное упрочнение [4], закалка (из β -области) и старение без ВТМО; *б* – мягкая закалка (из $\alpha + \beta$ -области) и старение с ВТМО; *в* – жесткая закалка (из $\alpha + \beta$ -области) и старение; *г* – жесткая закалка (из $\alpha + \beta$ -области) и двойное старение, (*а* – $\times 500$...*б-г* – $\times 1300$)

Fig. 2. Examples of microstructure of alloy VT6 ($\alpha + \alpha_{п} + \alpha' + \alpha''$) in variants of states: *a* – laser impact hardening [4], quenching (from β -area) and aging without high-temperature thermomechanical treatment; *б* – soft quenching (from $\alpha + \beta$ -area) and aging with high-temperature thermomechanical treatment; *в* – hard quenching (from $\alpha + \beta$ -area) and aging; *г* – hard quenching (from $\alpha + \beta$ -area) and double aging, (*a* – $\times 500$...*б-г* – $\times 1300$)

Соотношение компонентов структуры $\alpha/\alpha_{п}$ в каждом случае технологического состояния различается, в том числе, их размеры, геометрия и взаимное расположение. Это существенно зависит как от технологических режимов формоизменения, так и от уровня температуры и других параметров термической обработки, например, скорости охлаждения сплава ВТ22 [1, 13, 14]. Поэтому каждому варианту структурного состояния (оно выра-

жено средним значением или интервалом значений соотношений параметров структуры – $\alpha/\alpha_{п}$) соответствует определенный комплекс характеристик КП.

Установлена линейная связь E_K от $\alpha/\alpha_{п}$ и степенные зависимости: сопротивления отрыву и коэффициента деформационного упрочнения – соответственно от $/S_{K^0}, m^{(0)}/$, K_{IC} и относительного сужения ψ или запаса пластичности (ϵ_f) – от $\alpha/\alpha_{п}$.

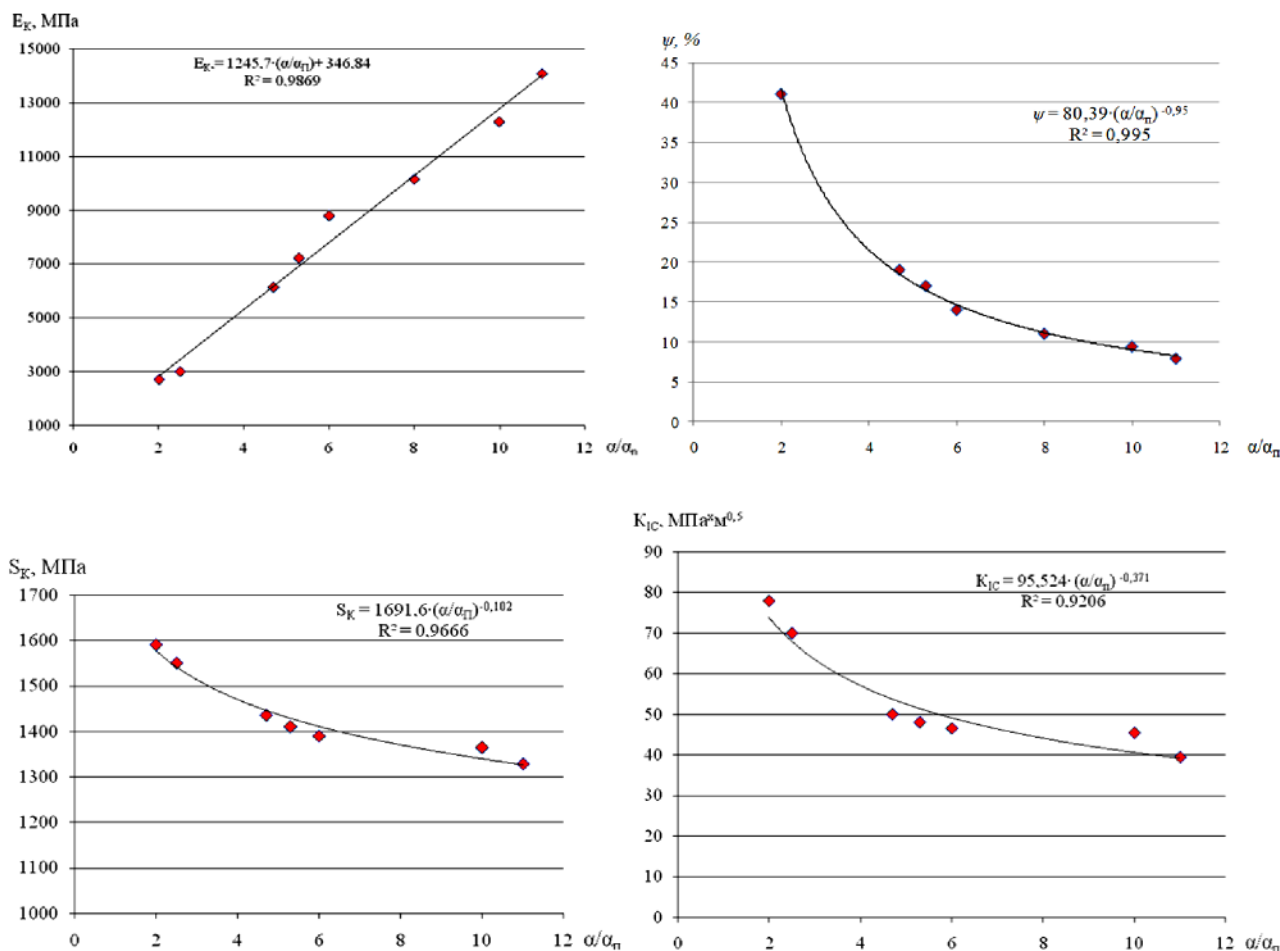


Рис. 3. Влияние структурных составляющих сплавов BT6 и BT22 по вариантам технологических состояний на характеристики конструкционной прочности

Fig. 3. Influence of structural components of BT6 and BT22 alloys by variants of technological states on the characteristics of structural strength

Как отмечалось выше в диапазон рассмотренных структурных состояний массивных заготовок можно включать состояния металла элементов изделий, существенно отличающихся от рассмотренных (компрессоры авиационных двигателей и наземных установок) своими габаритами, функциональной принадлежностью и используемыми технологиями локального упрочнения титановых сплавов (например, лазером).

Выводы

1. В качестве критериев конструкционной прочности используются характеристики истинной диаграммы деформирования сплавов.
2. Установлена иерархия свойств прочности, пластичности, ударной вязкости, трещиностойкости, деформационного упрочне-

ния сплавов мартенситного и переходного классов для обоснования технологий.

3. В широком диапазоне технологических и структурных состояний титановых сплавов BT6, BT8 и BT22 установлены тесные зависимости значений важнейших характеристик конструкционной прочности – относительного сужения, критического значения коэффициента интенсивности напряжений, сопротивления отрыву и конечного модуля (Ильюшина) от соотношения размеров исходной и превращенной α_n -фазы.

4. Полученные зависимости позволяют улучшить служебные свойства титановых сплавов, обосновать эффективную технологию их переработки, способствуют сокращению времени совершенствования и экспериментального подтверждения технологических решений, сроков доводки узлов ГТД.

Список литературы

1. Polmear I. J. *Light Alloys From Traditional Alloys to Nanocrystals*. England: Elsevier Ltd., 2006. P. 436.
2. Arthur J. McEvily *Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Preventions*. New York: JohnWiley-ISP, 2002. P. 380.
3. Муратаев Ф. И., Муратаев А. Ф. Исследование повреждаемости металла дисков компрессора ГТУ // *Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева*. 2016. Т. 72, № 4. С. 31–35.
4. Муратаев Ф. И., Махмутянов А. Н., Муратаев Т. А. Превращения титановых сплавов в лазерном пятне при ударном упрочнении // *Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева*. 2020. Т. 76, № 2. С. 57–62.
5. Муратаев Ф. И., Мухамадеев И. М. Закономерности структурных состояний и характеристик конструкционной прочности штамповок титанового сплава // *Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева*. 2020. Т. 76, № 2. С. 46–52.
6. Шканов И. Н., Брауде Н. З., Муратаев Ф. И. Модель оптимизации исходных механических свойств по критериям статической и усталостной прочности при сложном напряженном состоянии // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 1982. № 1. С. 107–111.
7. Mc Cann, M. L. and Fanning J. *Designing with Titanium Alloys. Handbook of Mechanical Design* / G. E. Totten, L. Xie, K. Funatani (ed.). New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. P. 539.
8. Albrecht P., Wright W. *Fatigue and Fracture of Steel Bridges* // *Fracture Mechanics: Applications and Challenges* / M. Fuentes (ed.) et al. Oxford: ESIS Publication and Elsevier, 2000. V. 26. P. 211–234.
9. Ruiz C., Nowell D. *Designing Against Fretting in Aeroengines* // *Fracture Mechanics Applications and Challenges* / M. Fuentes (ed.) et al. Oxford: ESIS Publication and Elsevier, 2000. V. 26. P. 73–95. DOI: 10.1016/S1566-1369(00)80043-6.
10. Cahn R. W., Haasen P., Kramer E. J. *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment. Structure and Properties of Composites* / T. W. Chou (ed.). VCH Weinheim, 1993. P. 625. DOI: 10.1002/010450113.
11. Ashby M. F. *Materials selection in mechanical design*. Oxford: Pergamon Press, 1992. P. 367.
12. Cahn R. W., Haasen P., Kramer E. J. *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment. Structure and Properties of Nonferrous Alloys* / K. H. Matucha (ed.). Wiley-VCH: Verlag GmbH, 1996. V. 8. P. 837.
13. Муратаев Ф. И., Жаржаназы М. А. Обеспечение конструкционной прочности титановых сплавов по критериям предельной пластичности и сопротивления усталости // *Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева*. 2013. № 1. С. 50–53.
14. Муратаев Ф. И., Хакимов С. Ш. Обоснование соотношений микроструктуры и свойств титановых сплавов для задач прогнозирования сопротивления усталости // *Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева*. 2014. № 4. С. 110–114.
15. Cahn R. W., Haasen P. *Physical Metallurgy - 4th Edition*. North Holland: Print Book & E-Book, 1996. P. 2740.
16. Tundermann J. H., Tien J. K., Howson T. E. *Nickel and nickel alloys* // *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. New York: Wiley, 1996. P. 1–17. DOI: 10.1002/0471238961.1409031120211404.a01.pub2.
17. Муратаев Ф. И., Шканов И. Н. Обоснование технологии обработки дисков компрессоров по характеристикам статического и циклического деформирования // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 1999. № 1. С. 43–47.
18. Муратаев Ф. И., Муратаев А. Ф. Определение причин разрушения планетарного редуктора экскаватора HYUNDAI-R170 // *КГТУ им. А. Н. Туполева*. 2016. Т. 72, № 3. С. 87–90.
19. Муратаев Ф. И., Муратаев А. Ф. Адаптация состава, структуры, свойств металла и сварных соединений теплообменников к сопротивлению высокотемпературной газовой коррозии // *Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева*. 2015. Т. 71, № 3. С. 119–125.
20. Муратаев Ф. И., Клабуков М. А., Муратаев А. Ф. Дegradaция состава и структуры сталей и сварных соединений змеевиков парообразования в условиях химической и электрохимической коррозии // *Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева*. 2016. Т. 72, № 4. С. 44–48.

21. Муратаев Ф. И., Муратаев А. Ф. Структура и свойства конструкционной стали после длительного перегрева // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2016. Т. 72, № 3. С. 82–86.
22. Cao X., Jahazi M. Effect of Welding Speed on Butt Join Quality of Ti-6Al-4v Alloy Welded Using a High-Power Nd: YAG laser // Optics and Lasers in Engineering. 2009. V. 47, Iss. 11. P. 1231–1241. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.05.010.
23. Murataev F. I., Galimov E. R. Development of a technology for hardening the working surfaces of microsurgical tools from titanium alloy // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2020. V. 915. Article number 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/915/1/012042.
24. Murataev F. I., Galimov E. R., Galimova N. Ya. Ranking Materials Technologies by Limiting Characteristics of Heat-Resistant Alloys and Their Longevity in the Problems of Import Substitution // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2019. V. 570. Article number 012070. DOI: 10.1088/1757-899X/570/1/012070.
25. Murataev F. I., Galimov E. R., Galimova N. Ya. Substantiation of Domestic Material and Welding Technology for Improving Properties and Competitiveness of Pyrolysis Furnace Coils // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2018. V. 570. Article number 012071. DOI: 10.1088/1757-899X/570/1/012071.