

Могут ли композиты с металлической матрицей существенно улучшить характеристики газотурбинного двигателя?

С. Т. Милейко

Институт физики твёрдого тела РАН

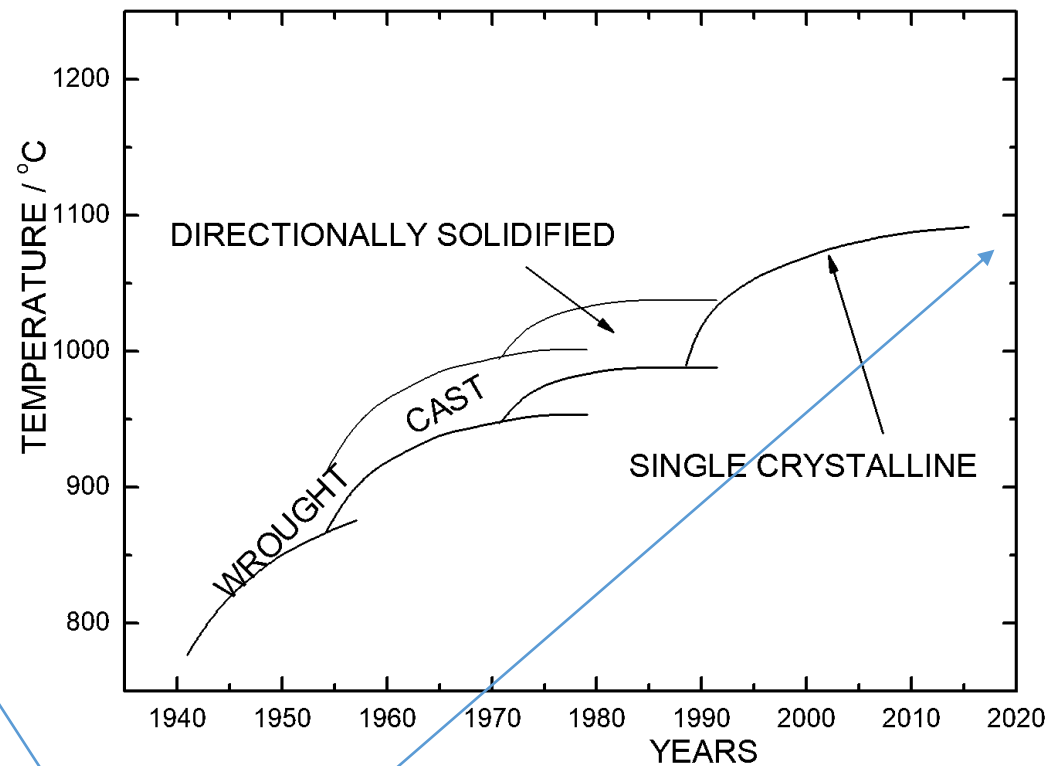
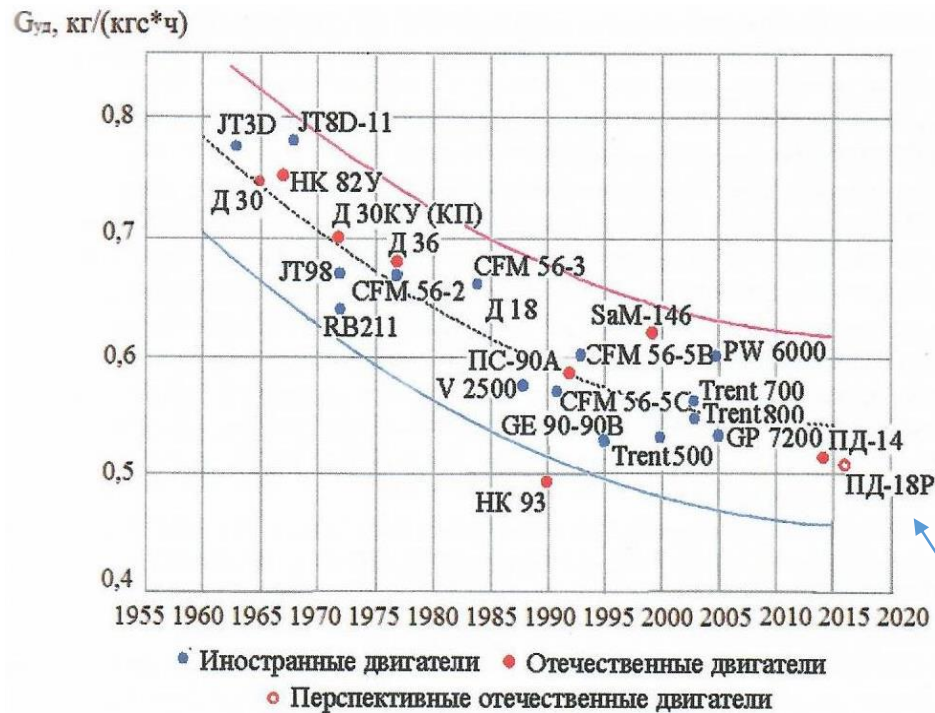
XIV Международной конференции

«Композитные материалы: производство, применение, тенденции рынка», Москва, 26-11-2020

Две из множества характеристик двигателя, во многом определяемые свойствами материалов

- Удельный расход топлива
- Удельная тяга (отношение тяги к весу)

Удельный расход топлива и максимальная температура никелевых сплавов

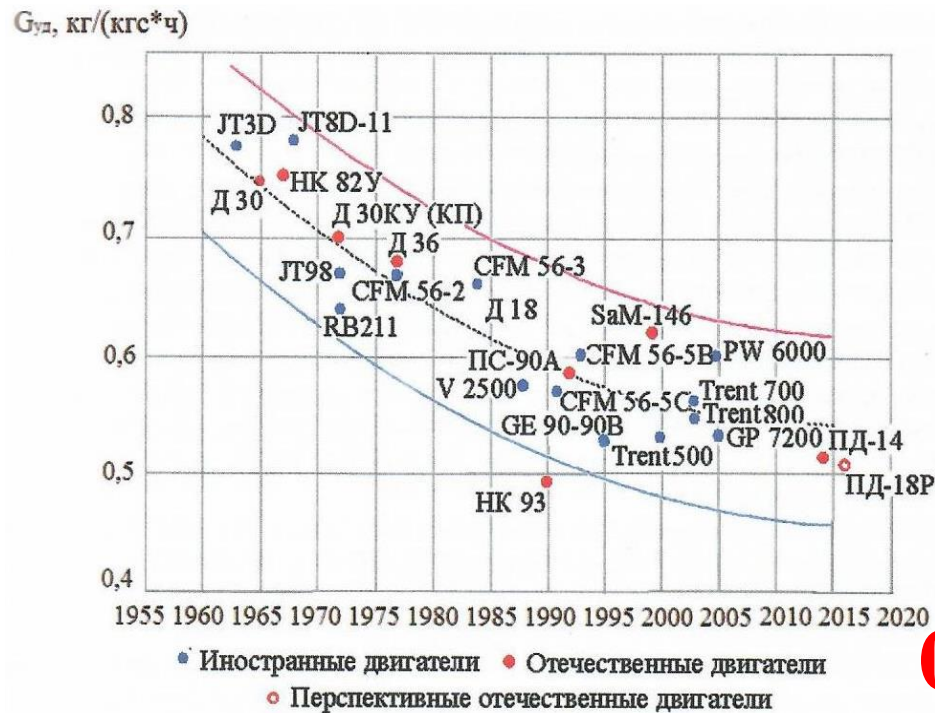


А.В. Логунов, Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин, Рыбинск, 2017

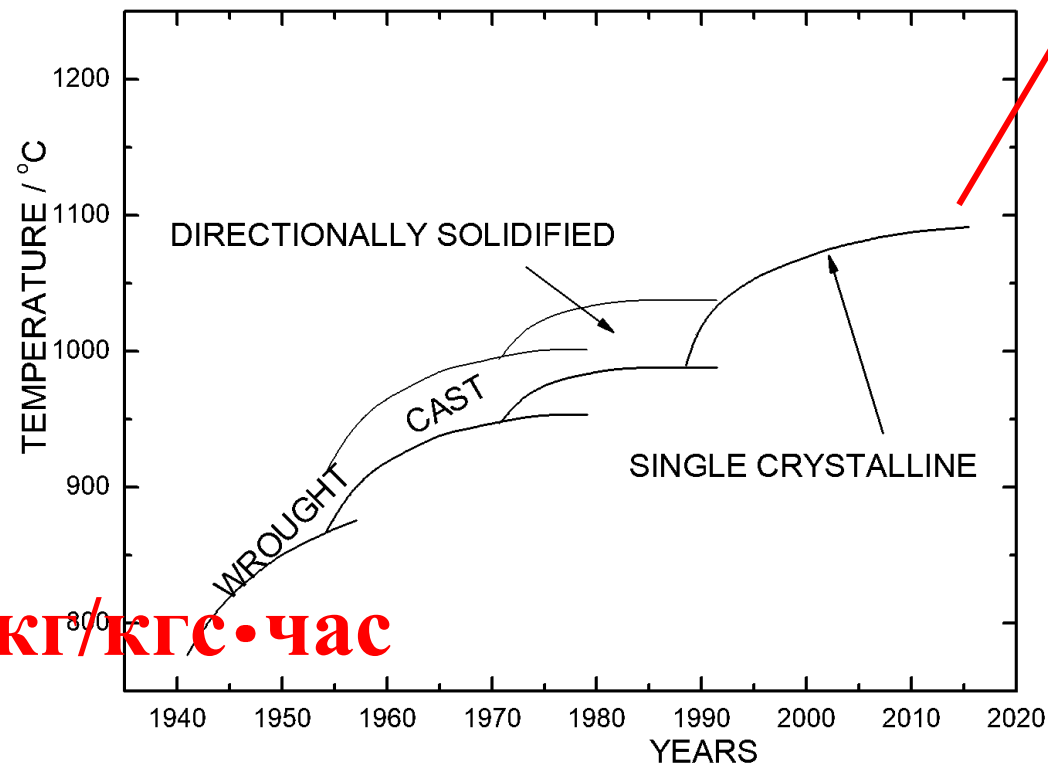
ВЫХОД НА ПЛАТО

Как существенно снизить удельный расход топлива?

$\geq 1300^{\circ}\text{C}$



0.4 кг/кгс·час



Как поднять температуру тела рабочей лопатки турбины?

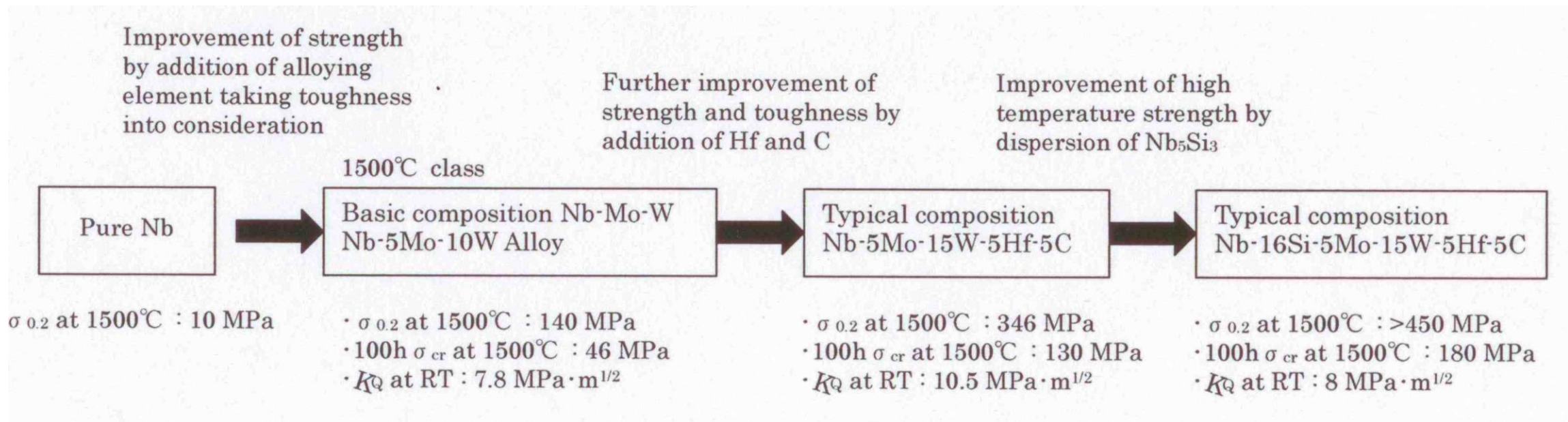
- Композиты с керамической матрицей – вряд ли: трещиностойкость ограничена
- Никелевые сплавы – нет!

- Сплавы на основе ниобия
- Сплавы а основе молибдена

- Композиты с тугоплавкой матрицей

Ниобий?

Крипостойкость – трещиностойкость



R. Tanaka, A. Kasama, M. Fujikura, I. Iwanaga, H. Tanaka and Y. Matsumura, Research and development of niobium-based superalloys for hot components of gas turbines, *Proc. of the Intern. Gas Turbine Congress 2003 Tokyo*, 1-5.

Ниобий? 1200°C?

E/γ

Все металлы: ≈ 25 (m/s)²
Nb: 9.6 (m/s)²
Be: 130 (m/s)²

Сплавы Nb-Si

Scopus публикации 2020 года

Всего 32

США 2

Китай и Россия 30

Молибден?

Некоторые свежие зарубежные проекты разработки сплавов Mo-Si-B

1. США:

1. Air Force Office of Scientific Research
2. Office of Naval Research (N00014-10-1-0913, N00014-17-1-2575).

2. Германия

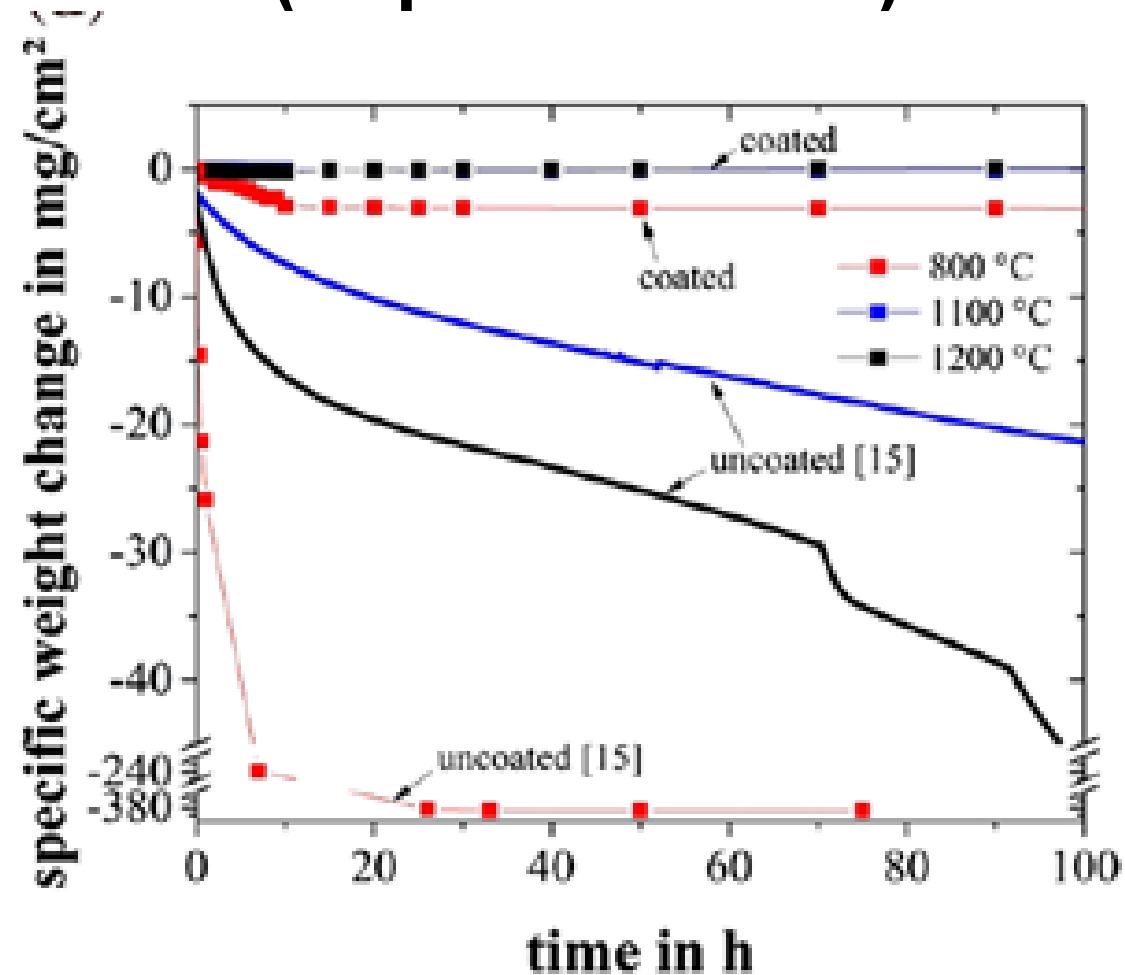
1. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Project LextrA: Siemens AG, Nanoval, Kochanek Entwicklungsgesellschaft, IfKorr+Fraunhofer ILT Aachen, Otto-von-Guericke University Magdeburg)
2. Deutsche Forschungsgemeinschaft (He 1872/33-1,)
3. Land Sachsen-Anhalt

3. Китай

1. National Natural Science Foundation of China (51431003, U1435201, 51674196, 51601144, 51701162,...)

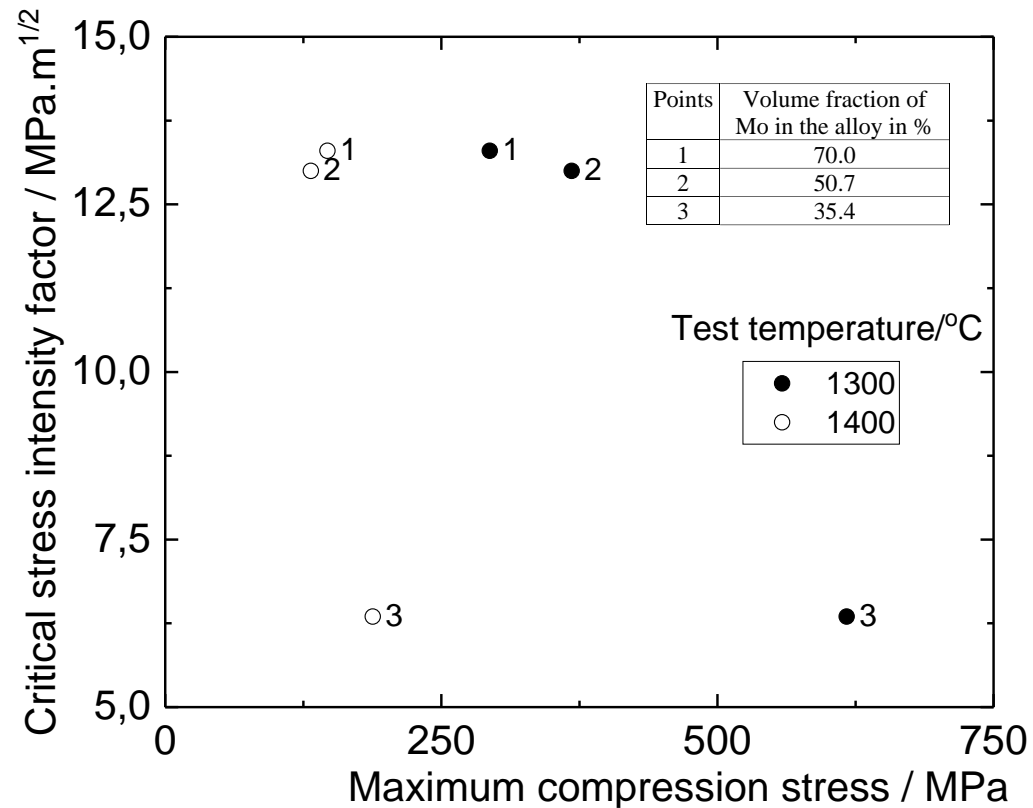
- 1. Institut fuer Werkstoff- und Fluegetechnik, Otto-von-Guericke-Universitat Magdeburg, Germany**
- 2. Forschungszentrum Juelich, IEK-2, 52425 Juelich, Germany**
- 3. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China**
- 4. Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China**
- 5. State key laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, PR China**
- 6. DLR – German Aerospace Center, Institute of Materials Research, D-51170 Cologne, Germany**
- 7. University of Wisconsin-Madison, Department of Materials Science and Engineering, 1509 University Ave., Madison, WI 53706, USA**
- 8. Oak Ridge National Laboratory, Materials Science and Technology Division, Oak Ridge, TN 37831, USA**
- 9. Air Force Research Laboratory, Wright-Patterson AFB, OH 45433, USA**
- 10. Fraunhofer - Institute for Laser Technology, Aachen, Germany**
- 11. NANOVAL GmbH & Co.KG, Berlin, Germany**
- 12. Dr. Kochanek Entwicklungsgesellschaft, Neustadt a. d. Weinstraße, Germany**
- 13. Institute of Energy and Climate Research (IEK-2), Jülich, Germany**
- 14. Siemens AG, Berlin, Germany**
- 15. Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan**
- 16. Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan**
- 17. Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan**

Молибденовые сплавы $\text{Mo-Mo}_5\text{SiB}_2\text{-Mo}_3\text{Si}$ (жаростойкость)



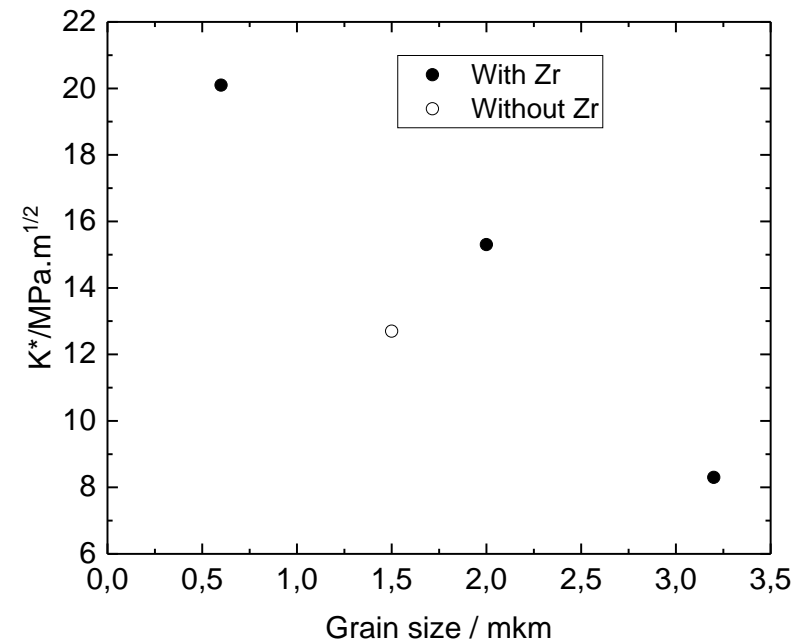
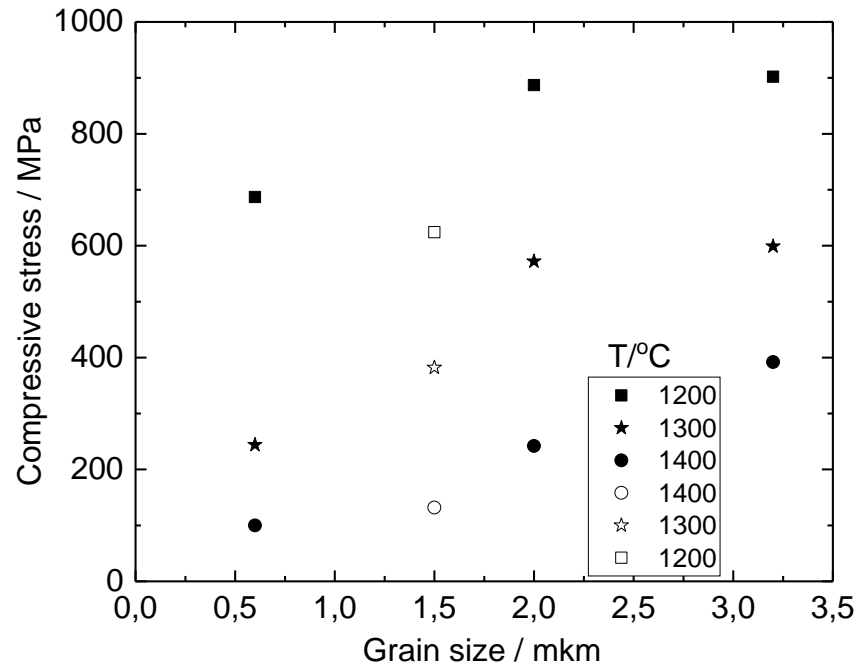
[Perepezko, J.H., Sakidja, R., Oxidation-resistant coatings for ultra-high-temperature refractory Mo-based alloys, *JOM* 62 \(2010\) #10 13-19](#)

Молибденовые сплавы Mo-Mo₅SiB₂-Mo₃Si (прочность - трещиностойкость)



Krüger M, Jain P, Kumar K S, Heilmaier M 2014
Intermetallics **48** 10

Молибденовые сплавы Mo-Mo₅SiB₂-Mo₃Si (прочность - трещиностойкость)



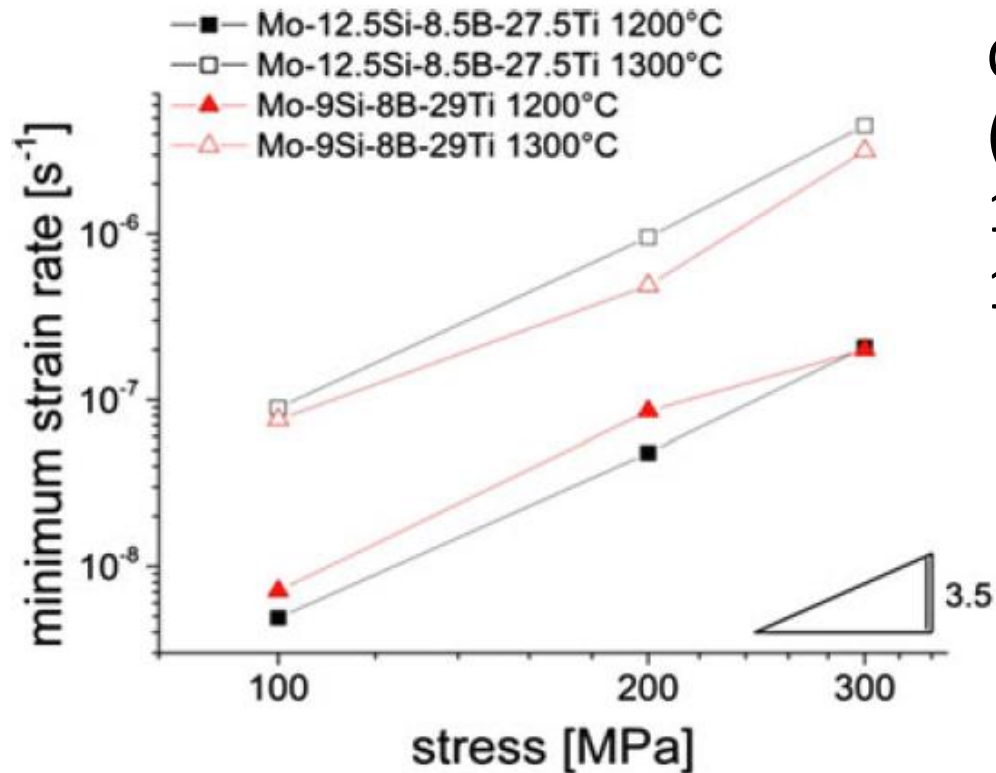
M. Krüger, O. Kauss, K. Naumenko, C. Burmeister, E. Wessel, J. Schmelzer, The potential of mechanical alloying to improve the strength and ductility of Mo-9Si-8B-1Zr alloys – experiments and simulation, *Intermetallics* **113** (2019) 106558

Конфликт прочность – трещиностойкость

S.T. Mileiko, *Metal and Ceramic Based Composites*, Elsevier, Amsterdam, 1997;

R.O. Ritchie, The conflicts between strength and toughness, *Nature Materials*, **10** (2011) 817-822

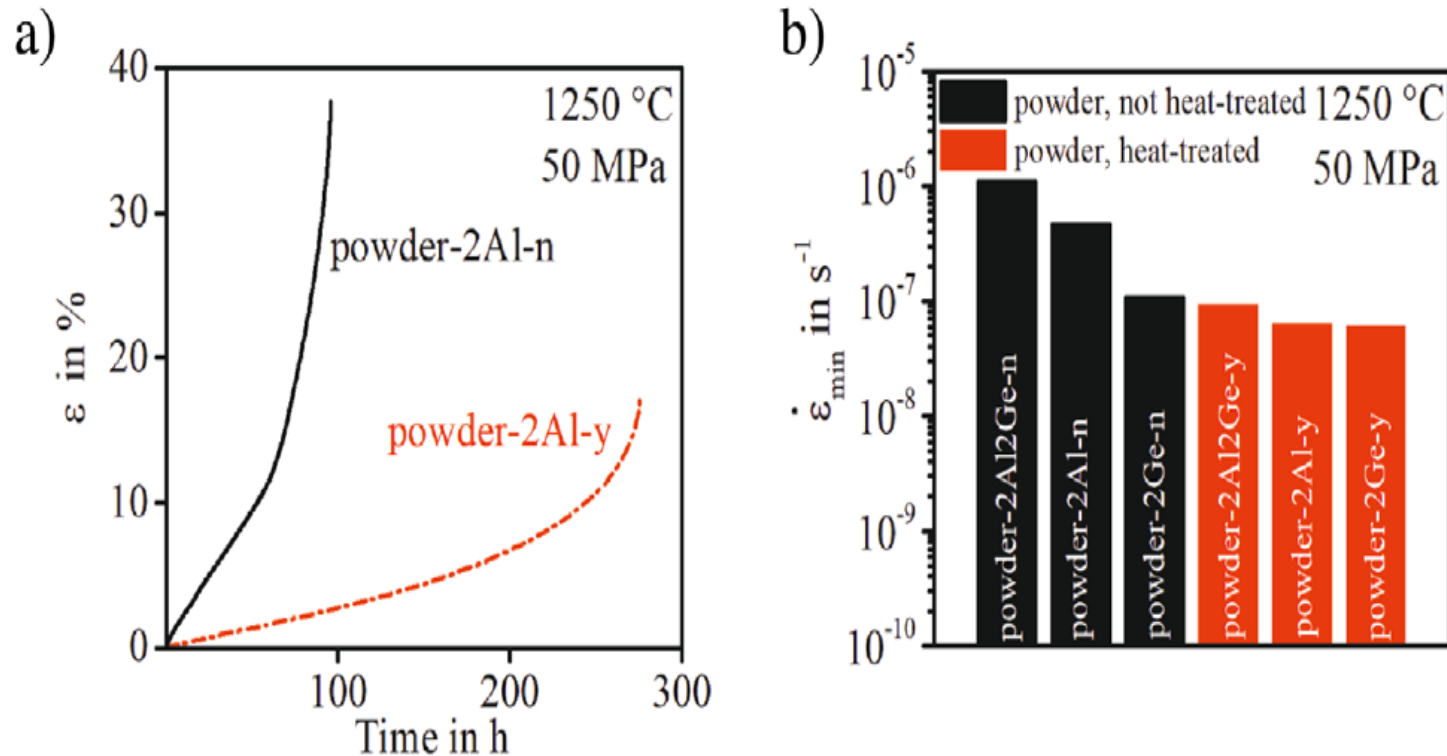
Молибденовые сплавы Mo-Mo₅SiB₂-Mo₃Si (крипостойкость)



Сопротивление ползучести
(1% деформации ползучести за 100 час)
1200°C: 150 МПа
1300°C: 50 МПа

D. Schliephake, M. Azim, K. Klinski-Wetzel, B. Gorr, H.-J. Christ, H. Bei, E.P. George, M. Heilmaier, High-Temperature Creep and Oxidation Behavior of Mo-Si-B Alloys with High Ti Contents, *Metallurgical and Materials Transactions*, 2014, **45A**, 1102-1111

Молибденовые сплавы $\text{Mo-Mo}_5\text{SiB}_2\text{-Mo}_3\text{Si}$ (крипостойкость)

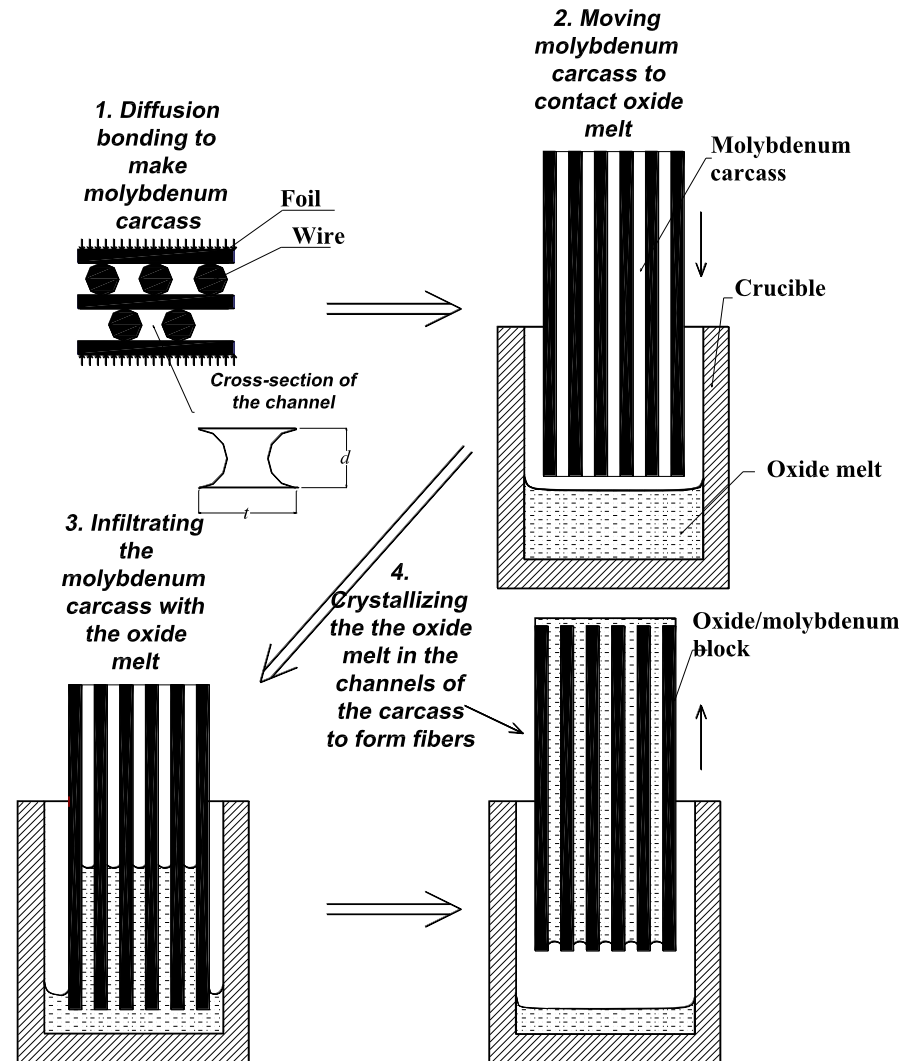


P. M. Kellner, R. Völkl, U. Glatzel, Influence of Ingot and Powder Metallurgy Production Route on the Tensile Creep Behavior of Mo–9Si–8B Alloys with Additions of Al and Ge, *Adv. Eng. Mater.* 2018, **20**, 1700751

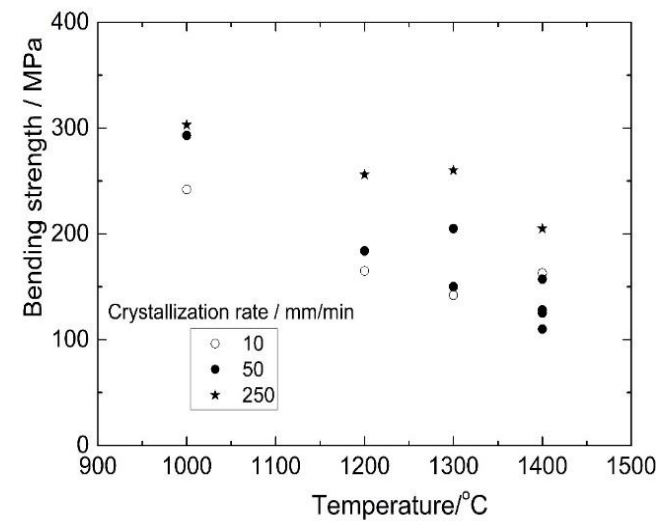
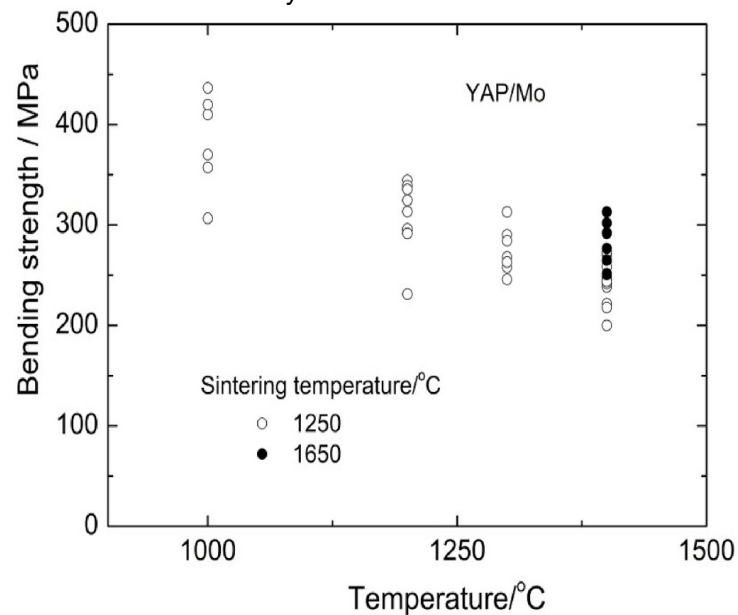
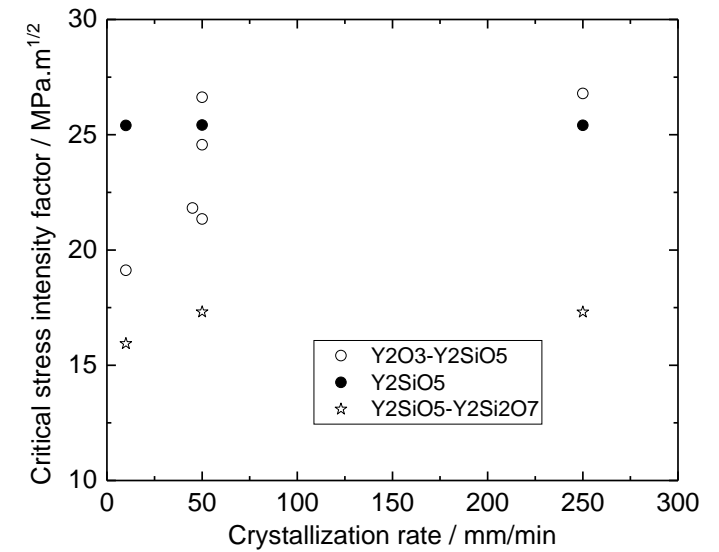
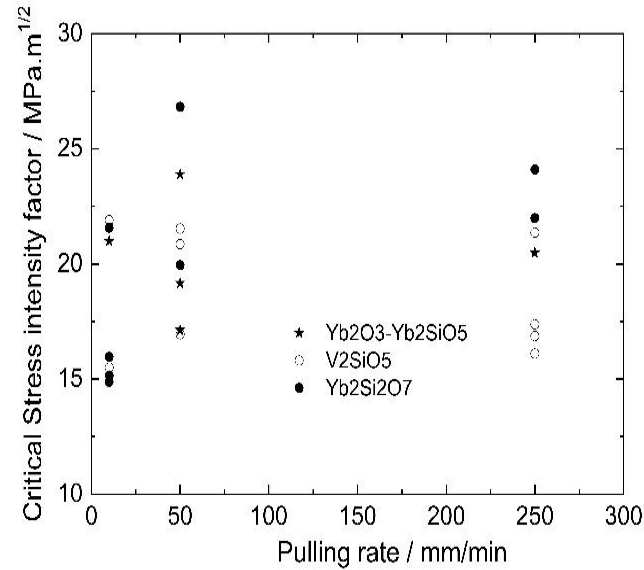
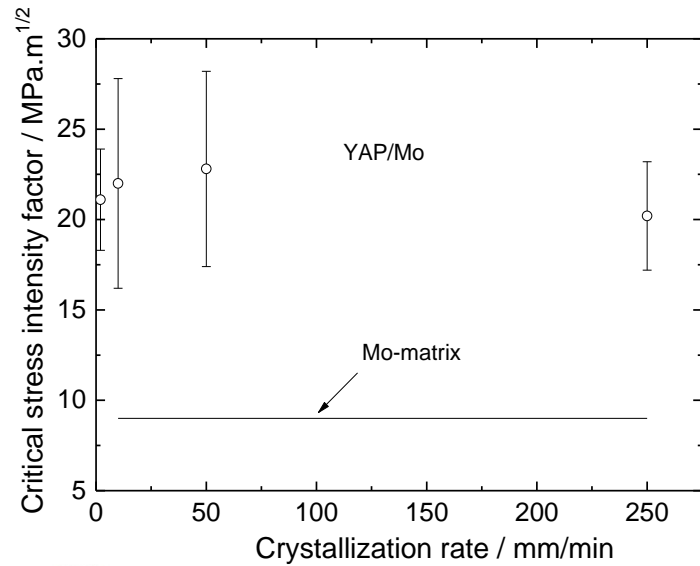
Молибденовые сплавы $\text{Mo-Mo}_5\text{SiB}_2\text{-Mo}_3\text{Si}$

- Жаростойкость +
- Трещиностойкость -
- Сопротивление ползучести -

Оксид-молибденовые композиты (получение)

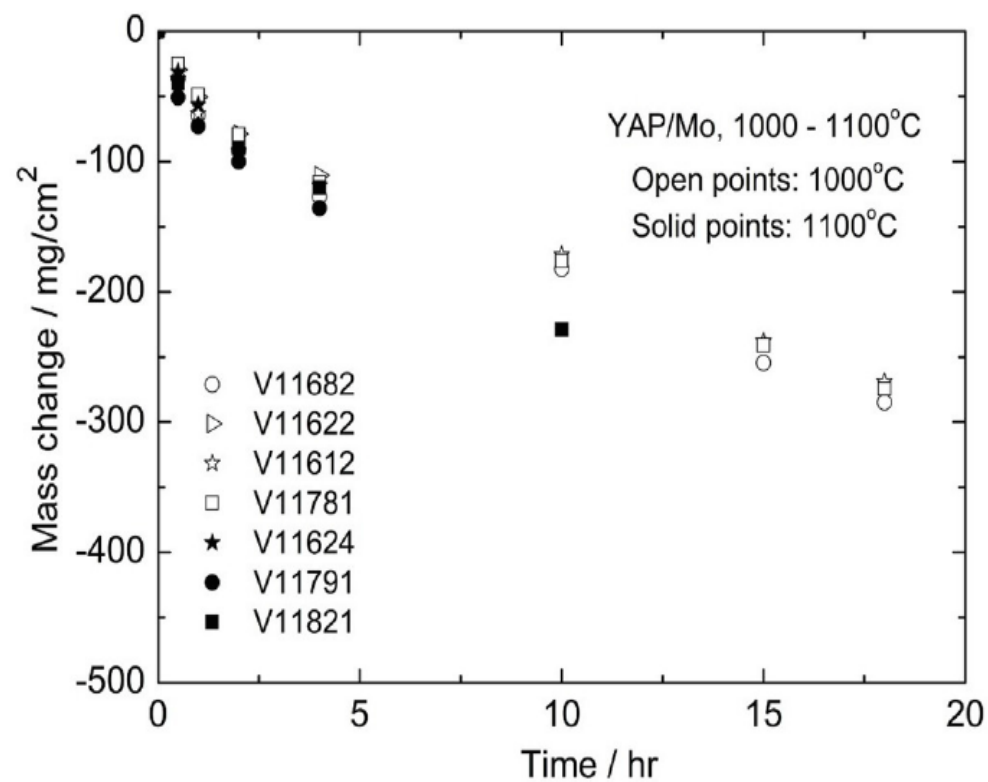
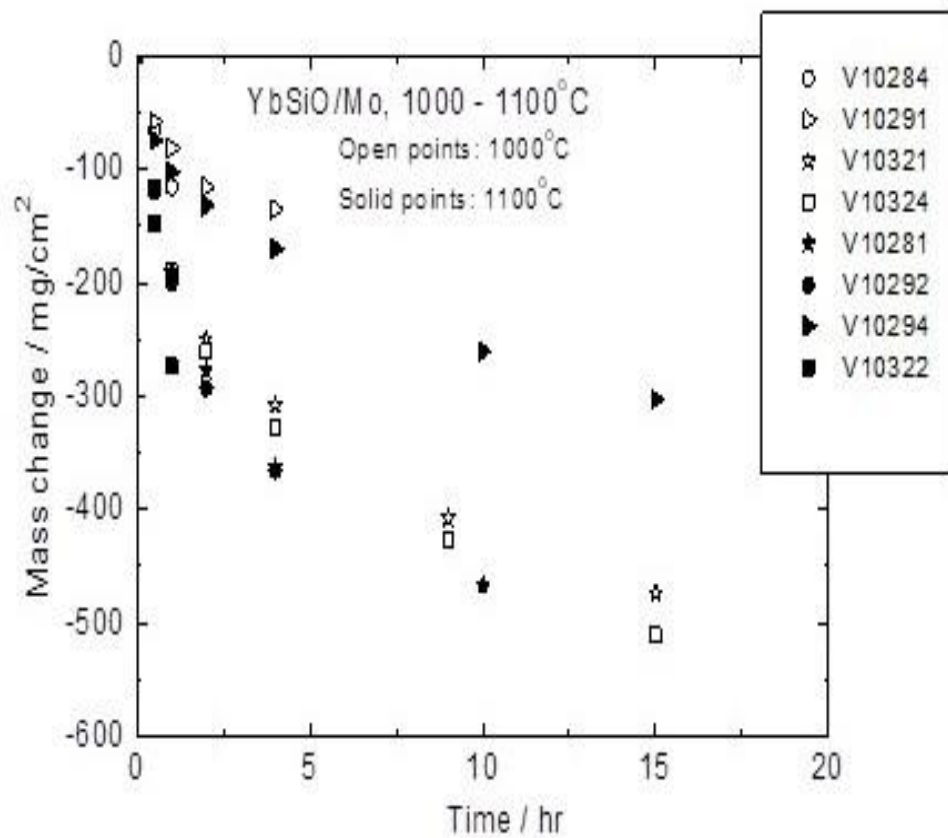


Оксид-молибденовые композиты (прочность - трещиностойкость) – некоторые примеры



Yb₂SiO₅+(Yb₂O₃ включения)

Оксид-молибденовые композиты (жаростойкость)



Молибденовые сплавы $\text{Mo-Mo}_5\text{SiB}_2\text{-Mo}_3\text{Si}$

- Жаростойкость +
- Трещиностойкость –
- Сопротивление ползучести –

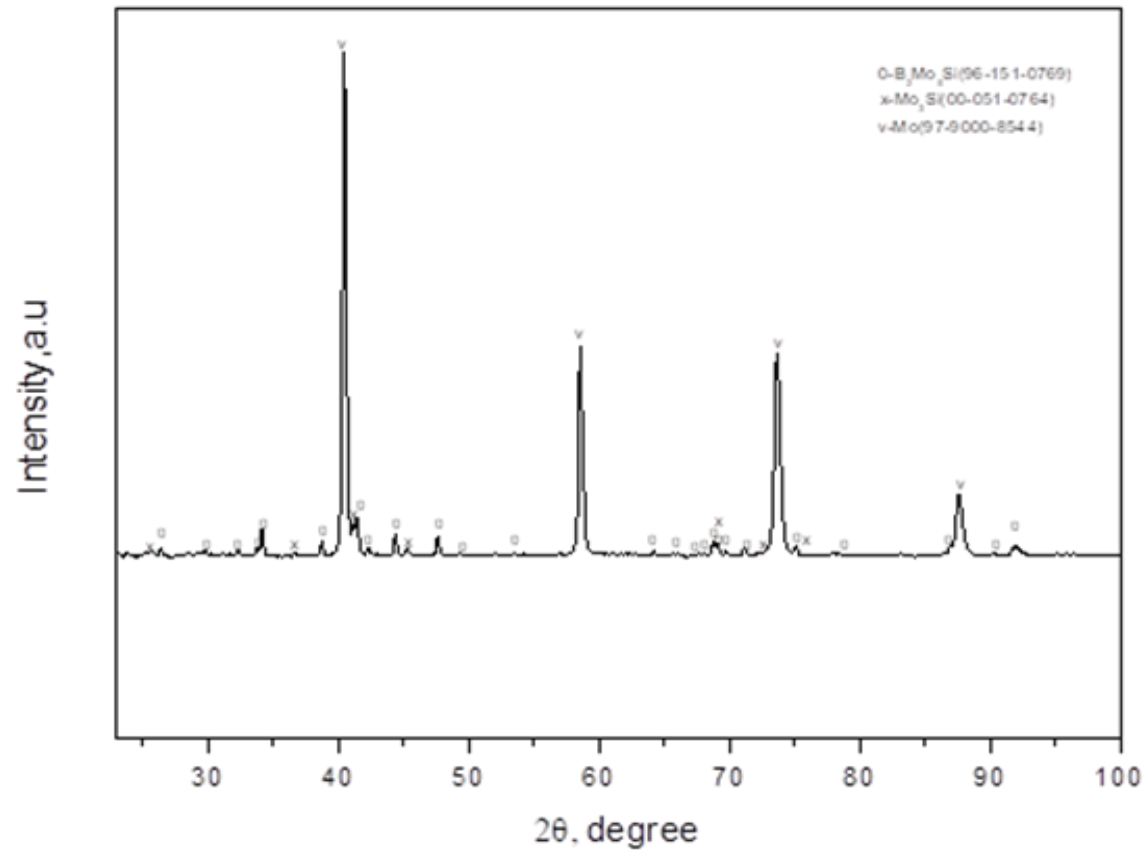
Композиты молибден (чистый) – оксидное волокно

- Жаростойкость +/-
- Трещиностойкость +
- Сопротивление ползучести +/-

**Армировать
молибденовые сплавы $\text{Mo-Mo}_5\text{SiB}_2\text{-Mo}_3\text{Si}$
оксидными волокнами!**

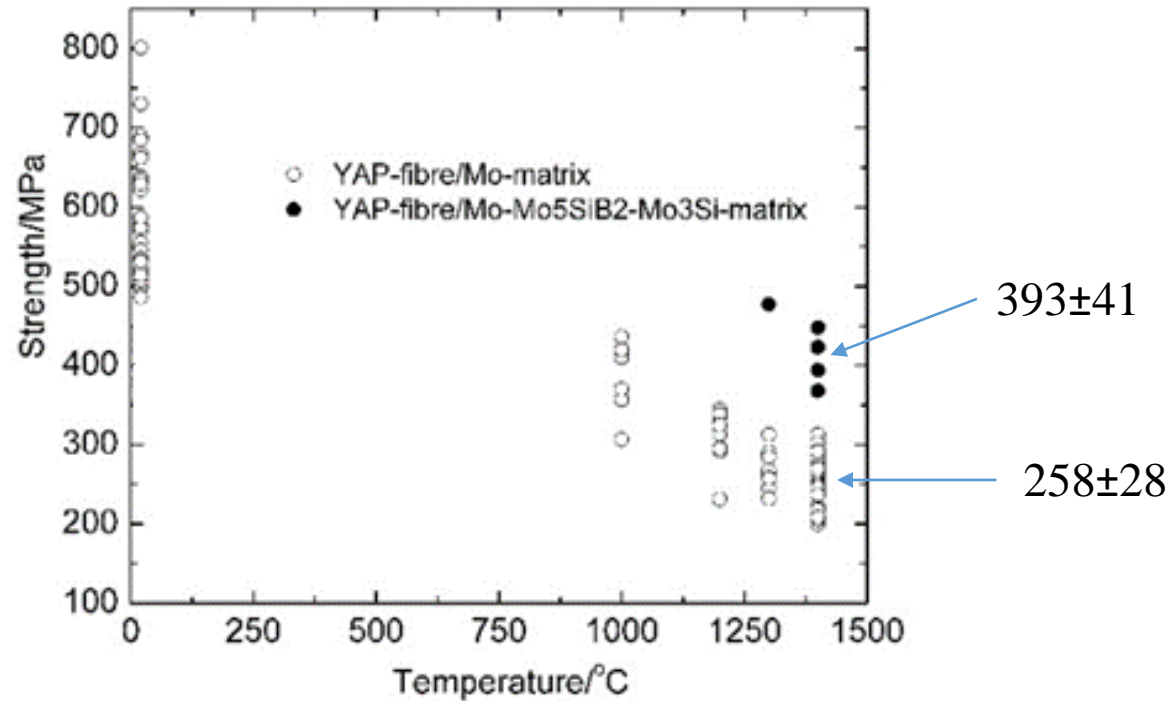
Милейко СТ, Колчин АА и др. Высокотемпературные композиты с молибденовой матрицей и способ их получения, Патент РФ № 27112333, Приоритет 29 марта 2019

Фазовый состав матрицы



Состав матрицы близок к сплавам системы Mo-Si-B, разрабатываемым в многочисленных зарубежных лабораториях

Прочность оксид-молибденовых композитов



Крипостойкость

Композит: Stress to cause 1% creep strain for 100 h = 85 – 90 МПа при температуре 1300°C

Трещиностойкость композитов с матрицей молибденового сплава: 2-ая серия экспериментов

Номер образца	L	h	w	c	Q	K*
	мм				кгс	МПа·м ^{1/2}
Z0080	52	14.17	3.95	6.56	208	37.8
Z0077	52	14.84	4.24	7.09	166.5	27.5
Z0075	52	14.85	4.26	7.33	98.3	17.0
Z0072	52	14.95	3.85	7.31	173.3	32.3
Z0071	40	14.1	4.49	4.20	205	16.2
Z0070	40	15.17	4.36	5.72	491	44.0

Полученные нами в последние два года и взрослеющие вместе с нами оксид-молибденовые композиты характеризуются плюсами по основным характеристикам (трещиностойкость, крипостойкость, жаростойкость)+ плотность

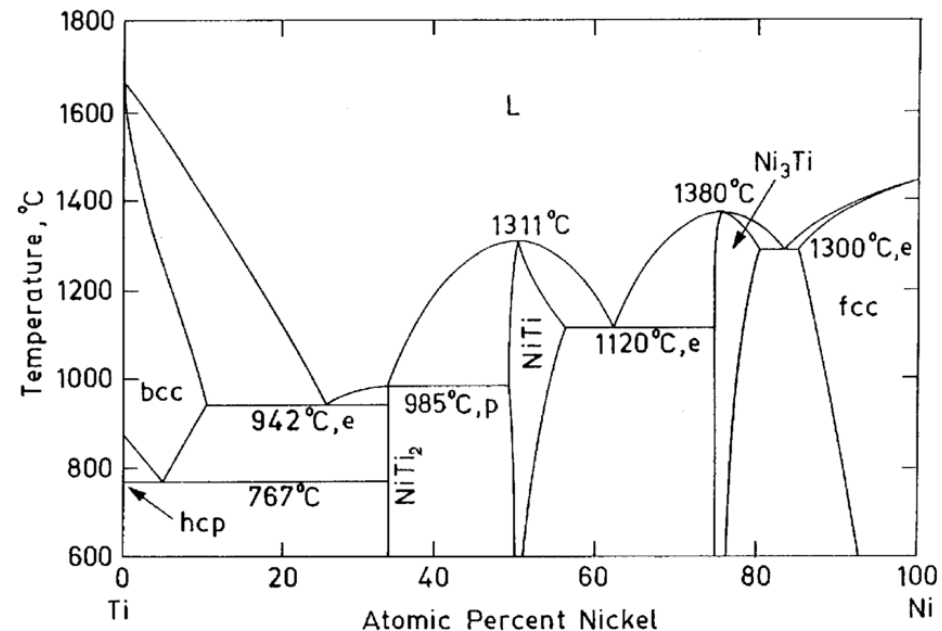
Сегодня мы видим пути качественного совершенствования лабораторной технологии и перехода к промышленной технологии получения турбинной лопатки, работающей при температурах до 1400°C с соответствующим сокращением удельного расхода топлива

Для этого необходимо объединить усилия ОДК, ЦИАМ, ИФТТ РАН

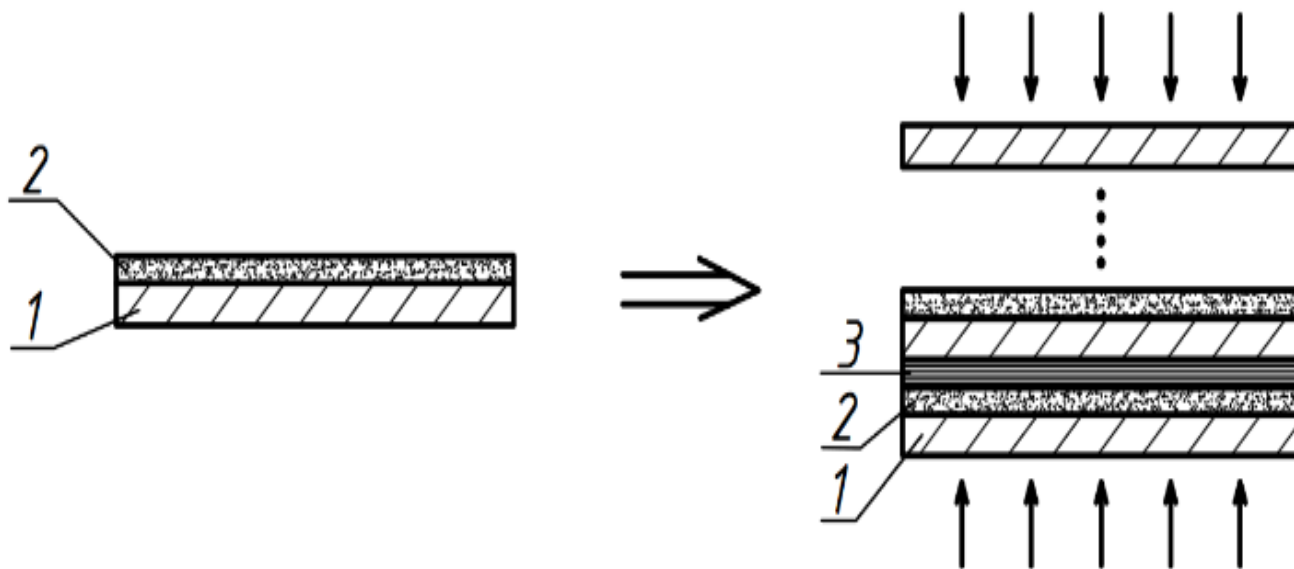
Удельная тяга ?

Угле-титановые композиты

Угле-титановый композит с промежуточной матрицей



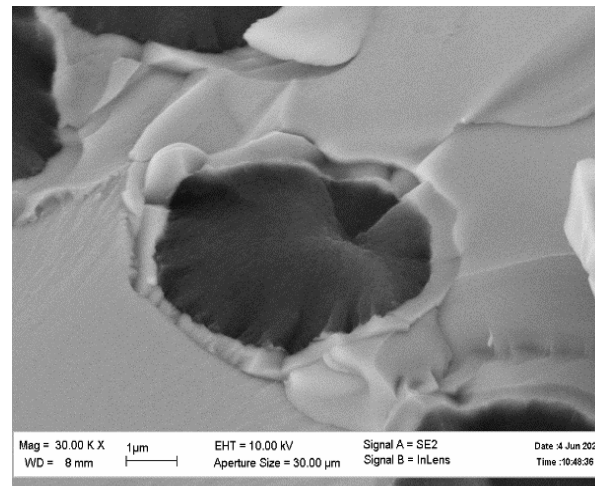
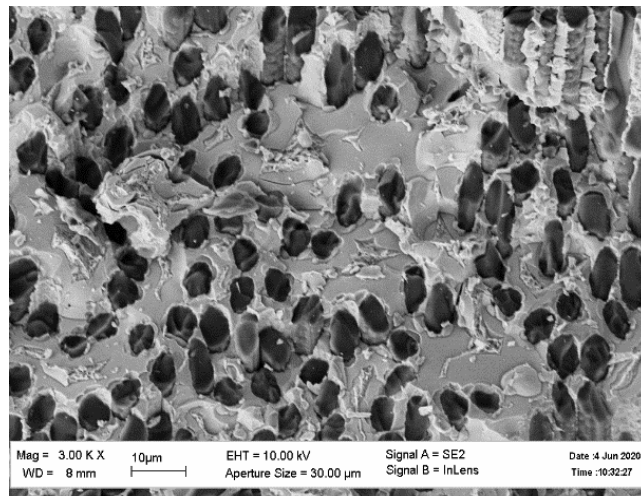
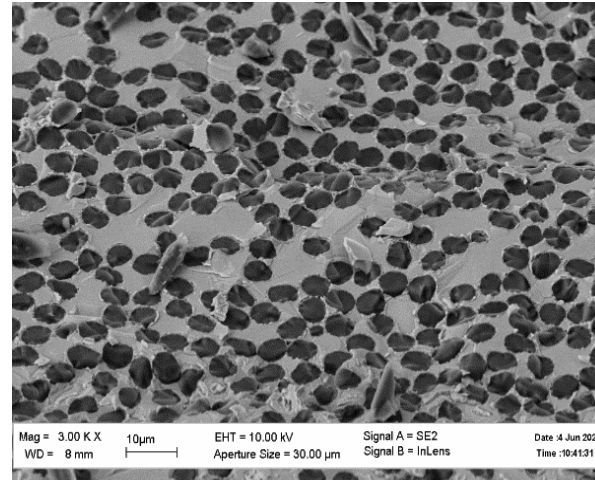
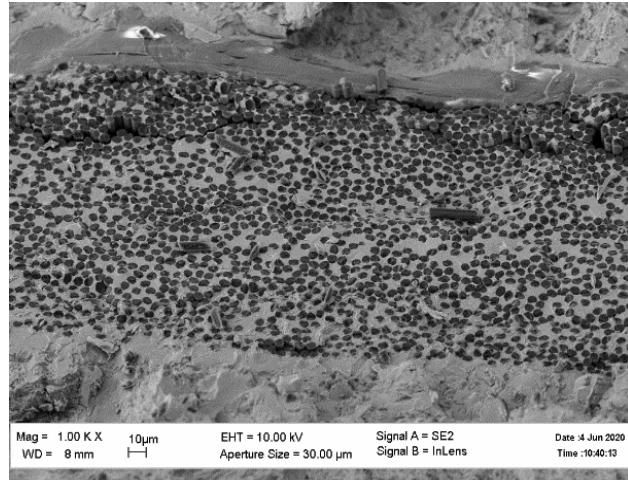
Вариант технологии (Патент ИФТТ RU [2 731 699](#))



- 1: Слой основной титановой матрицы;
- 2: Слой, генерирующий промежуточную матрицу (например, Ti-Ni);
- 3: Слой углеволокна.

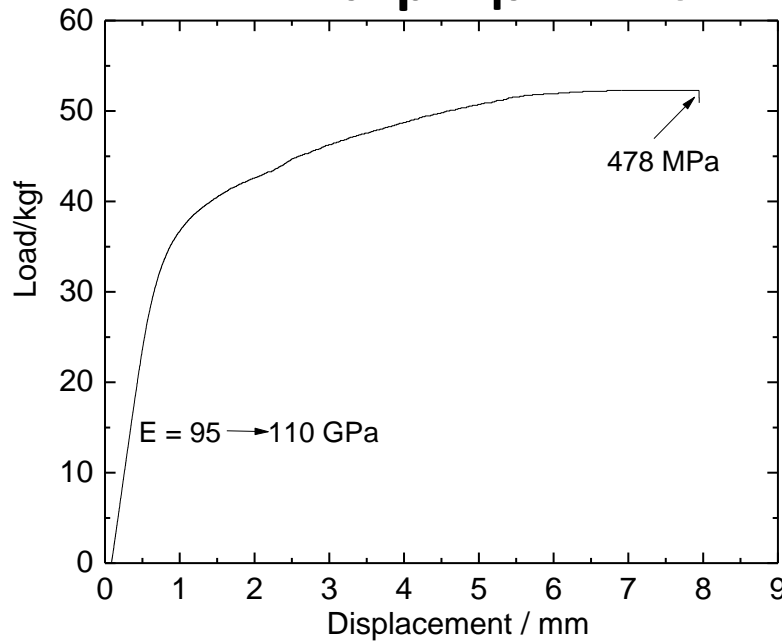
$$T \approx 1000^\circ\text{C}, t \approx 1 \text{ мин } q \approx 0.1 \text{ кгс/см}^2$$

Угле-титановый композит с промежуточной матрицей: микроструктура (пример)

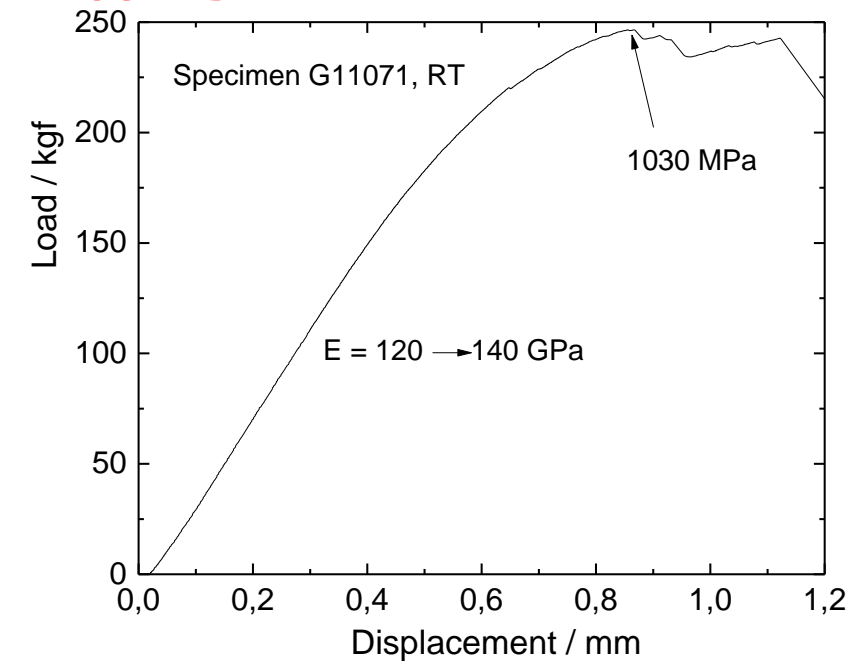
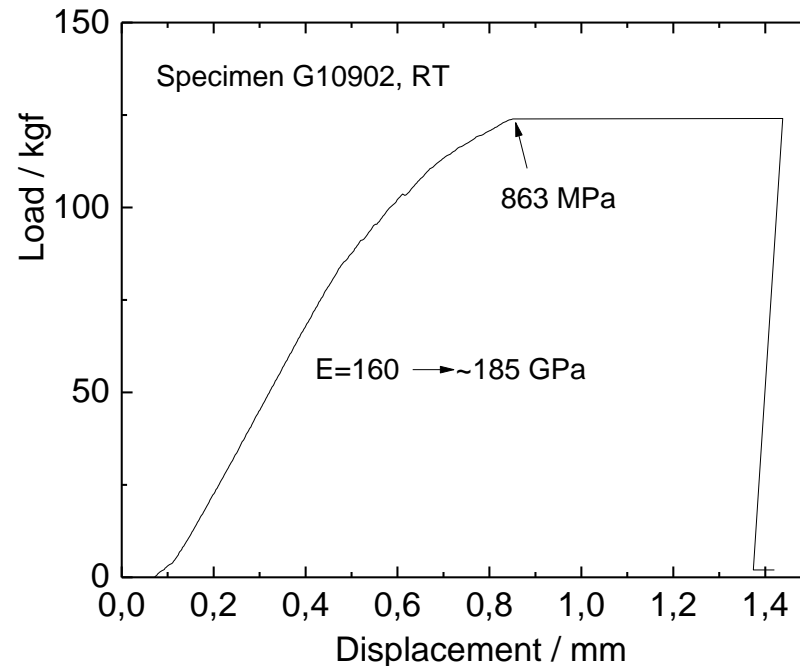


Угле-титановый композит с промежуточной матрицей: Механические свойства (Серия экспериментов с основной матрицей BT1-0)

Матрица BT1-0



Композиты



Принципиальные отличия угле-титана от углепластиков:

1. Предельная температура до 500°C , замена титана на никель – $\sim 700^{\circ}\text{C}$
2. Малая анизотропия механических характеристик
3. Высокая трещиностойкость
4. «Гибкость» структуры: возможность подстройки под конкретные применения

«Гибкость» структуры:

Есть низко-прочные структуры (500 МПа) с высоким модулем Юнга (210 ГПа) и плотностью 3.22 г/см³

Трещиностойкость композитов:

$$K^* = 20 \dots 40 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$$

Замена ВТ1-0 на высокопрочные сплавы даст композиты с прочностью до 2000 МПа

Применение угле-титана и угле-никеля позволит уменьшить вес компрессора и увеличить удельную тягу

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда,
проект 16-19-10624П

Могут ли композиты с металлической матрицей существенно улучшить характеристики газотурбинного двигателя?

МОГУТ И ДОЛЖНЫ!

Ваш

С. Милейко

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'S. Mileiko', written over a light blue grid background.