

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА РАБОЧЕГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТУРБОНАДДУВА

Рахматуллин С.С.

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия
samatrakhmatullin@gmail.com

Зачастую с целью повышения эффективности транспортных средств, работающих на дизельных двигателях, на них устанавливаются турбонаддувы. Часть эффективности работы самих турбонаддувов зависит от оптимальных характеристик их рабочих колес, которые в свою очередь достигаются выбором подходящих материалов для изготовления импеллеров. Важным свойством материала турбинного колеса является жаростойкость к поступающим отработавшим газам, а компрессорного — стойкость к давлению воздуха, одновременно подающегося к нему и нагнетающегося им.

В исследовании вопрос повышения эффективности работы системы турбонаддува рассматривается в контексте сравнения трех материалов (никелевый и титановый сплавы, конструкционная сталь), предлагаемых для изготовления рабочего колеса компрессора, путем проектирования его модели с помощью компьютерных программных продуктов. Для этого замеры реальных элементов турбонаддува и их характеристики переносятся в CREO, где высчитываются нужные размеры и проводятся другие необходимые расчеты, которые далее импортируются в ANSYS с целью последующего исследования, включающего в себя тепловой и конструкционный анализы. Сравнение результатов анализов позволяют сделать вывод о преимуществе никелевого сплава над другими рассматриваемыми материалами в плане его минимальной подверженности деформированию и получения наименьшего суммарного теплового потока в компрессорном рабочем колесе и рекомендовать этот материал к применению в турбонаддуве или к последующему его сопоставлению и сравнению с ранее не рассмотренными материалами, что, как предполагается в исследовании, в совокупном итоге и в некоторой степени может способствовать повышению эффективности самого транспортного средства в целом.

Ключевые слова: турбонаддув, двигатель, компрессорное колесо, повышение эффективности, никелевый сплав, трехмерная модель.

Для цитирования: Рахматуллин С.С. Поиск оптимального материала рабочего колеса компрессора с целью повышения эффективности работы системы турбонаддува // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 3 (49). С. 87–94. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-87-94

Введение

С целью увеличения мощности дизельные двигатели зачастую применяются вместе с установленным турбонаддувом, например, с центробежным компрессором. Отдельно турбина и отдельно компрессор подразумевают наличие собственных рабочих колес, первое из которых преобразует энергию отработавших газов во вращение вала, на котором также закреплено второе колесо, нагнетающее благодаря этому вращению воздух в цилиндры двигателя. Изготовление турбинного колеса требует применения жаропрочных и стойких к давлению направляющегося газового потока материалов, а компрессорного — материалов, стойких к давлению поступающего на крыльчатку воздуха [1].

Выбор оптимального материала компрессорного колеса послужил целью экспериментов в рамках соответствующих исследований, где были выявлены свойства различных сплавов, одни из которых в конечном итоге позволили повысить эффективность работы турбонаддува [2], а рассмотрение других, например, инновационных материалов, таких как композитные материалы, ведется очень активно по сей день [3–9]. Часть же исследователей сосредоточена на рассмотрении традиционно применяющихся сплавов [10].

В работе проектируются модели компрессорных колес из сплава титана (СТ), сплава никеля (СН) и конструкционной стали (КС), характеристики которых (соответственно табл. 1,

табл. 2 и табл. 3) анализируются в специальной программе аппроксимационным методом, с целью их сравнения и выбора материала, характеризующегося наиболее оптимальными конструкционными и тепловыми показателями. Далее такой материал может быть рекомендован к применению в изготовлении рабочего колеса компрессора или к последующему сопоставлению и сравнению с ранее не рассмотренными в этом контексте материалами, что в совокупном итоге может способствовать повышению эффективности работы системы турбонаддува и в некоторой степени самого транспортного средства в целом [1].

Материалы и методы

В исследовании для получения модели колеса проводятся и переносятся в программу *CREO* замеры необходимого компонента реального турбонаддува (рис. 1), а также его характеристики, что в совокупности позволяет высчитать подходящие размеры моделей крыльчатки [11–15]. В работе используется обособленный анализ методом конечных элементов (МКЭ) для конструкционного и теплового анализов модели в *ANSYS* (рис. 2) [2, 3, 16–18]. Более точные результаты можно получить путем сеточного разделения колеса на элементы с гранями (рис. 3) [19, 20].

Таблица 1

Характеристики КС

Table 1. Structural steel characteristics

Характеристика	Значение
Плотность	7855 кг/м ³
Модуль упругости	2·10 ¹¹ Па
Коэффициент Пуассона	0,31

Таблица 2

Характеристики СТ

Table 2. Titanium alloy characteristics

Характеристика	Значение
Плотность	4429 кг/м ³
Модуль упругости	1,13·10 ¹¹ Па
Коэффициент Пуассона	0,33

Таблица 3

Характеристики СН

Table 3. Nickel alloy characteristics

Характеристика	Значение
Плотность	8192 кг/м ³
Модуль упругости	2,03·10 ¹¹ Па
Коэффициент Пуассона	0,286

С целью фиксации колеса задаются необходимые ограничения (рис. 4). Также для него устанавливаются скорость вращения (рис. 5) и давление (рис. 6).

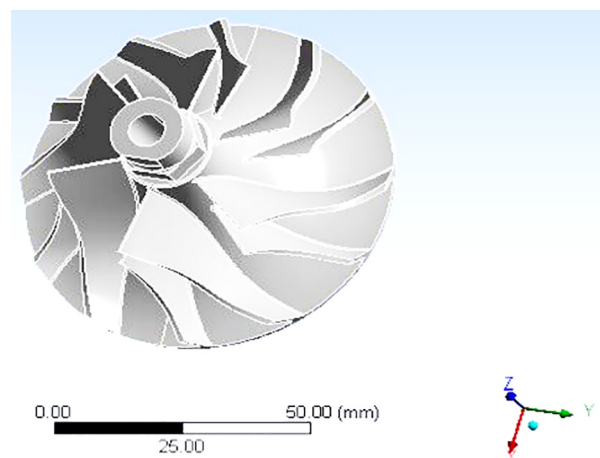


Рис. 2. Модель компрессорного колеса

Fig 2. Compressor wheel model

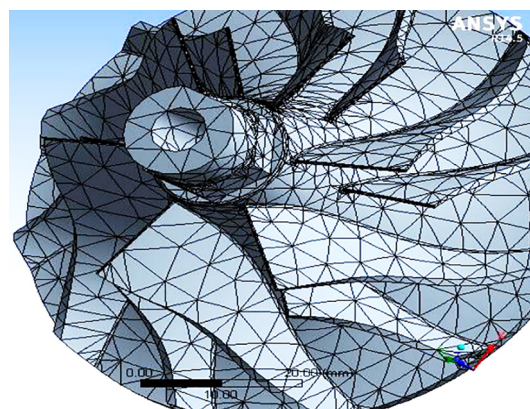


Рис. 3. Сетчатая модель компрессорного колеса

Fig. 3. Compressor wheel mesh model

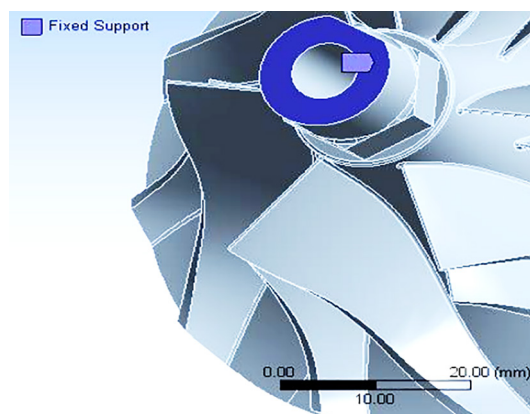


Рис. 4. Уставка фиксации колеса

Fig. 4. Wheel fixing setpoint

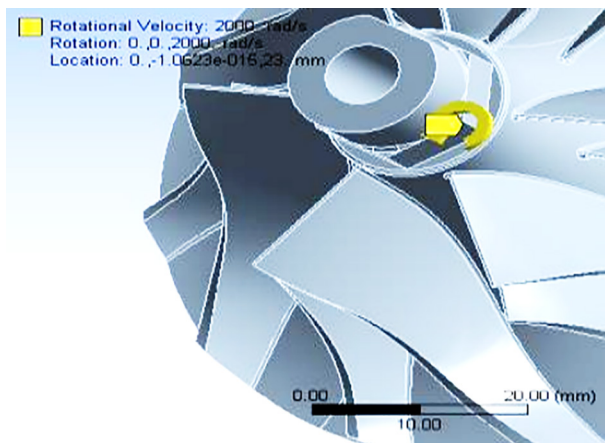


Рис. 5. Уставка скорости вращения (2000 рад/с)

Fig. 5. Rotation speed setting (2000 rad/s)

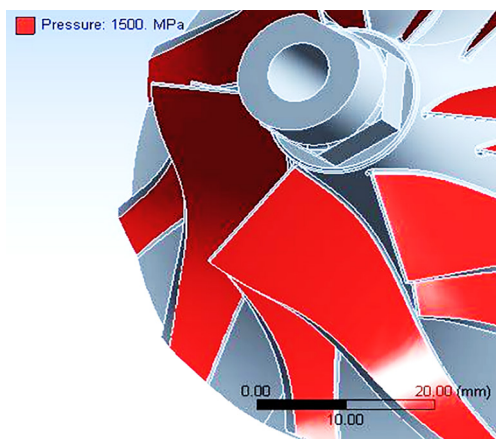


Рис. 6. Уставка максимального давления (1500 МПа)

Fig. 6. Maximum pressure setting (1500 MPa)

Результаты и обсуждение

Результаты исследования базируются на обобщенном анализе материалов МКЭ.

Анализ компрессорного колеса из СН

Важным являлось рассмотрение конструкционной и тепловой составляющих анализа. В рамках статического конструкционного анализа проведено исследование полного смещения (рис. 7), эквивалентного напряжения (рис. 8) и эквивалентной деформации (рис. 9) колеса из СН.

В рамках анализа теплового поля проведено исследование установившегося теплового потока (рис. 10) и направленного теплового потока (рис. 11) в рассматриваемом колесе из СН.

Анализ компрессорных колес из КС и СТ

Здесь учтены все уставки и процедура, которые применялись к анализу колеса из СН.

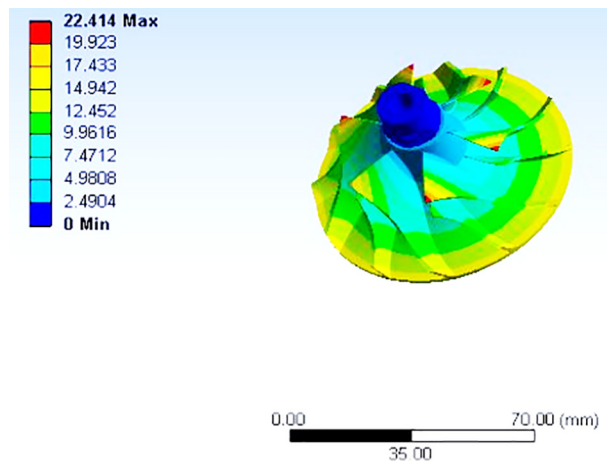


Рис. 7. Полное смещение колеса из СН

Fig. 7. Full displacement of the nickel alloy wheel

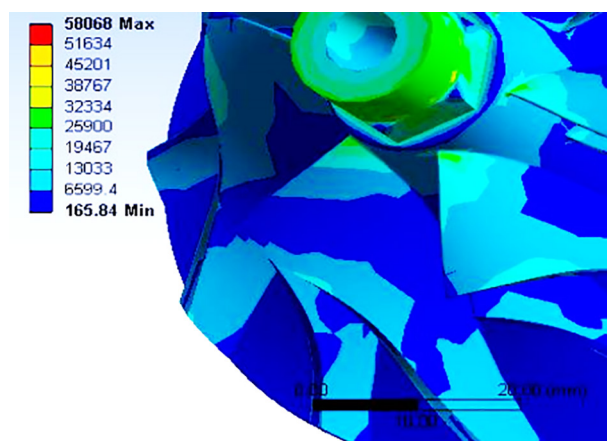


Рис. 8. Эквивалентное напряжение колеса из СН

Fig. 8. Equivalent voltage of the nickel alloy wheel

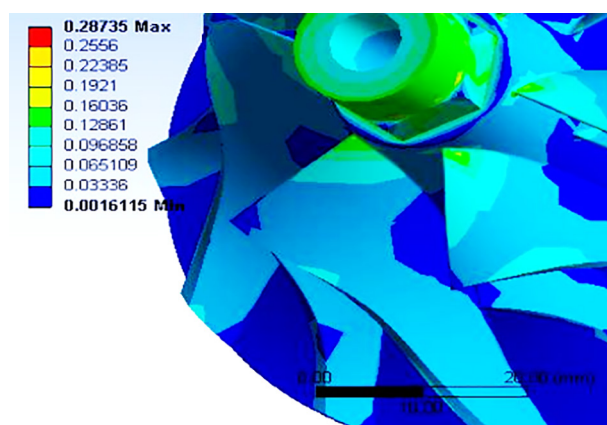


Рис. 9. Эквивалентная деформация колеса из СН

Fig. 9. Equivalent deformation of a nickel alloy wheel

В рамках статического конструкционного анализа также проведено исследование полного смещения колес из КС и СТ (рис. 12, а и 12, б соответственно), эквивалентного напряжения (рис. 13, а и 13, б соответственно) и эквива-

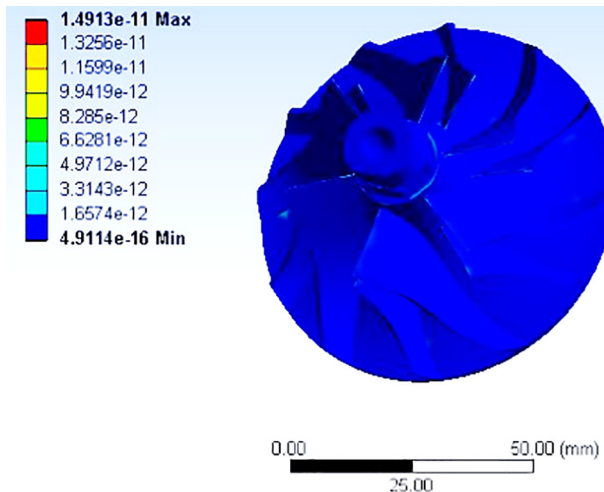


Рис. 10. Суммарный тепловой поток в колесе из СН
Fig. 10. Total heat flux in the nickel alloy wheel

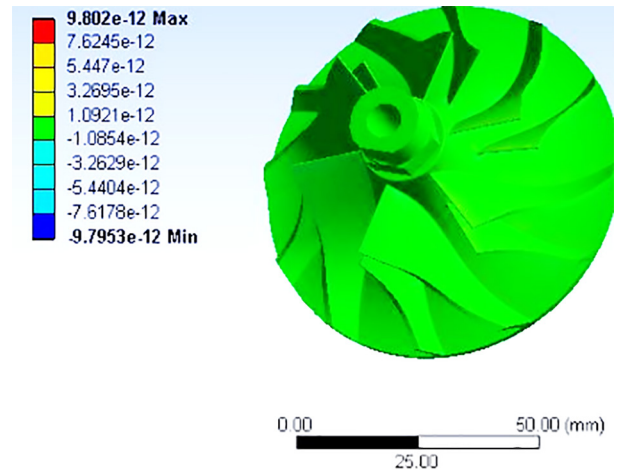


Рис. 11. Направленный тепловой поток в колесе из СН
Fig. 11. Directed heat flux in the nickel alloy wheel

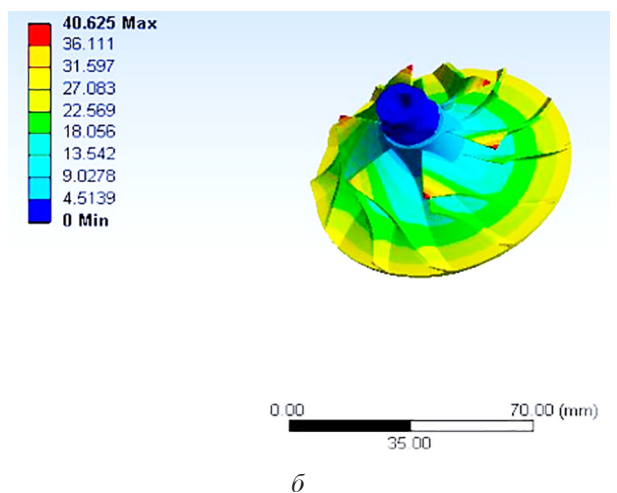
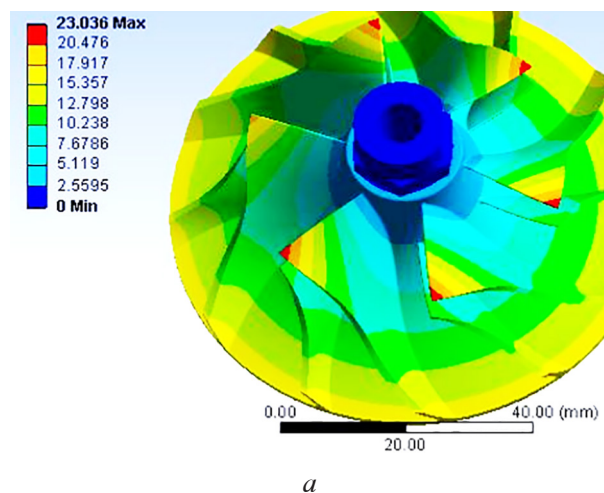


Рис. 12. Полное смещение:
а – колеса из КС; б – колеса из СТ

Fig. 12. Full displacement: а – structural steel wheel; б – nickel alloy wheel

лентной деформации (рис. 14, а и 14, б соответственно). В рамках анализа теплового поля также проведено исследование установившегося теплового потока (рис. 15, а и 15, б соответственно) и направленного теплового потока (рис. 16, а и 16, б соответственно) в рассматриваемых колесах из КС и СТ.

С целью сравнения свойств всех материалов результаты исследований в рамках рассматриваемых анализов приведены в табл. 4 и табл. 5, откуда можно наблюдать, что компрессорное колесо из никеля менее подвержено деформированию. Оно характеризуется наименьшим суммарным тепловым потоком и наибольшим направленным потоком тепла, по сравнению с рабочими колесами компрессора из ТС и КС.

Таблица 4
Результаты конструкционного анализа

Table 4. Structural analysis results

Характеристика	Значение
Плотность	8192 кг/м ³
Модуль упругости	2,03·10 ¹¹ Па
Коэффициент Пуассона	0,286

Таблица 5
Результаты анализа теплового поля
Table 5. Thermal field analysis results

Материал	Суммарный тепловой поток, Вт/мм ²	Направленный тепловой поток, Вт/мм ²
КС	5,88·10 ⁻¹¹	3,88·10 ⁻¹¹
СТ	3,25·10 ⁻¹¹	2,14·10 ⁻¹¹
СН	1,48·10 ⁻¹¹	9,82·10 ⁻¹¹

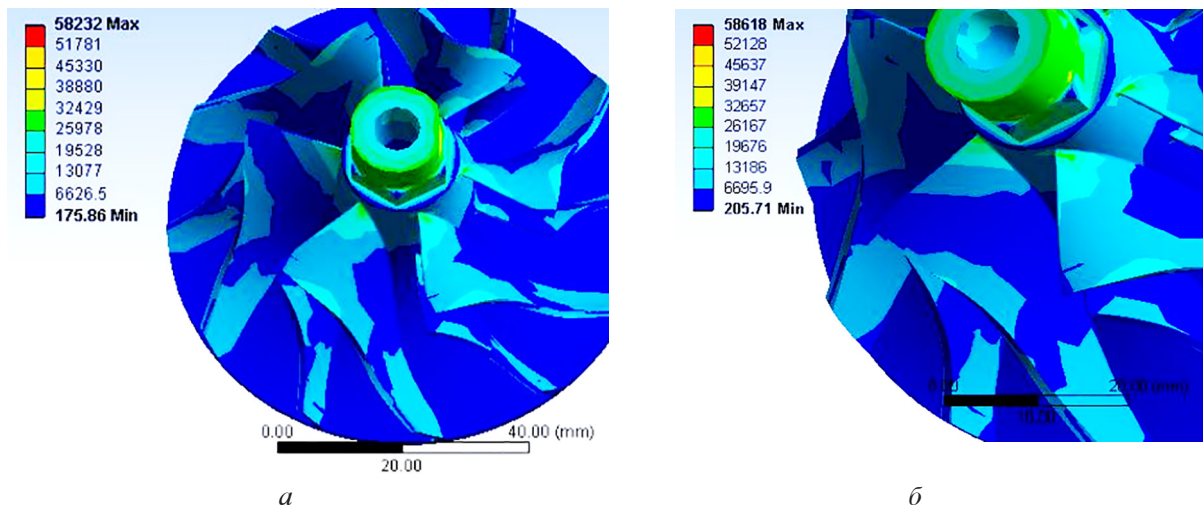


Рис. 13. Эквивалентное напряжение:
а – колеса из КС; б – колеса из СТ

Fig. 13. Equivalent voltage: a – structural steel wheel; b – nickel alloy wheel

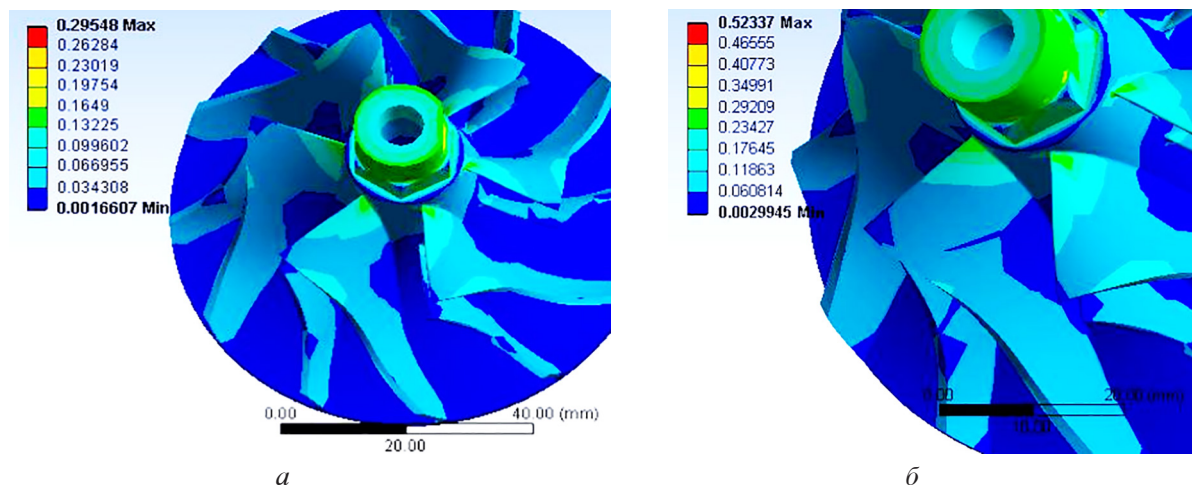


Рис. 14. Эквивалентная деформация:
а – колеса из КС; б – колеса из СТ

Fig. 14. Equivalent deformation: a – structural steel wheel; b – nickel alloy wheel

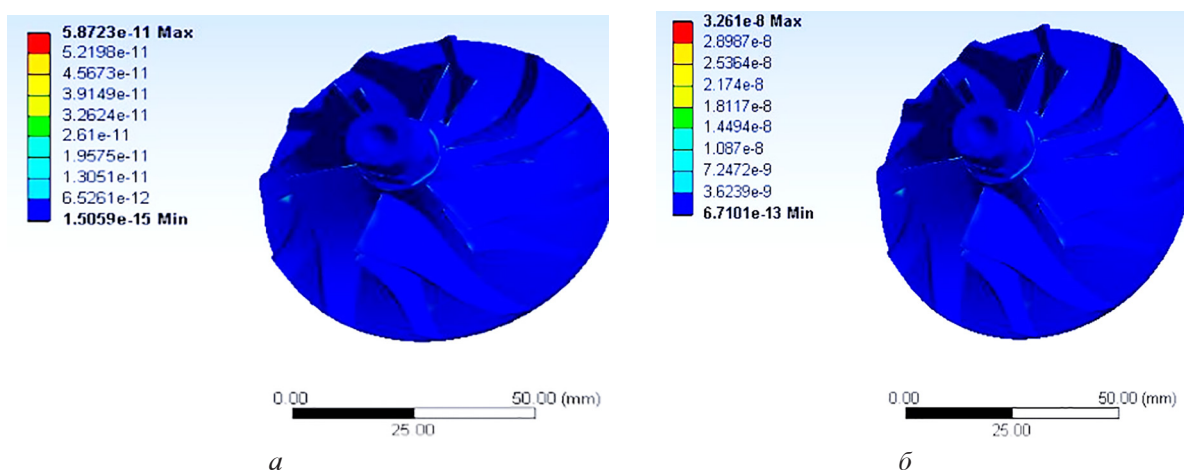


Рис. 15. Суммарный тепловой поток:
а – в колесе из КС; б – в колесе из СТ

Fig. 15. Total heat flux: a – structural steel wheel; b – nickel alloy wheel

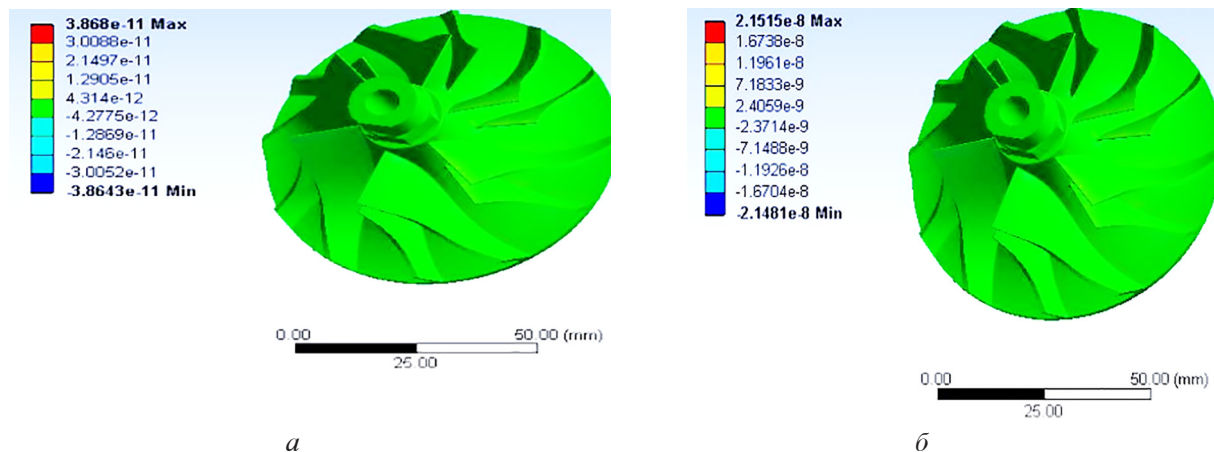


Рис. 16. Направленный тепловой поток:
а – в колесе из КС; б – в колесе из СТ

Fig. 16. Directional heat flow: a – structural steel wheel; b – nickel alloy wheel

Заклучение

Несмотря на ненадлежащие показатели направленного теплового потока в рабочем колесе компрессора из никелевого сплава, оно, в сравнении с крыльчатками из титана и конструкционной стали, менее всех подвержено деформированию и характеризуется минимальными показателями суммарного потока тепла, что позволяет рекомендовать этот тип материала к использованию в изготовлении компрессорного колеса с целью попытки повышения эффективности работы системы турбонаддува с центробежным компрессором.

Литература

1. Watson N., Janota M. Turbocharging the Internal Combustion Engine. New York: Wiley, 1982. 624 p.
2. Prasad A., Rao B., Babji A., Babu D. Static and Dynamic Analysis of a Centrifugal Pump Impeller // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2013. Vol. 4. No. 10. P. 966–971.
3. Martynyuk L., Afanasiev D., Bykov L., Ezhov A., Mezintsev M. The study of the applicability of polymer composite materials for the manufacture of the impeller of a centrifugal compressor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1060. No. 1. 012026 p. DOI: 10.1088/1757-899X/1060/1/012026
4. Lindberg Jr B., Papuka K., Kharazi A., Mueller N. Novel Compressor Using Woven/Wound Composite Impeller // Proceedings of the ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Chicago: Process Industries, 2006. P. 95–100. DOI: 10.1115/IMECE2006-13342
5. Нетрусов А.Н., Фомин В.М. Композиционные материалы для рабочих колес турбокомпрессоров автотракторных двигателей // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 8. С. 28–36.
6. Нетрусов А.Н., Фомин В.М. Исследование прочностных качеств рабочих колес из композитного материала агрегатов наддува дизелей // Тракторы и сельхозмашины. 2017 / № 2. С. 21–28.
7. Нетрусов А.Н., Фомин В.М. Оптимизация армирующего слоя компрессорного колеса из композиционного материала турбокомпрессора дизеля // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 2. С. 47–53.
8. Saravanan R., Malladi A., Ancesh V. Exploration of appropriateness of material for impeller of turbocharger—A numerical validation // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2283. No. 1. 020074 p. DOI: 10.1063/5.0025027
9. Fomin V., Apelinskiy D., Netrusov A. Study of the optimal reinforcing structure of the compressor wheel from composition material of the transport turbocharged engine // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 534. No. 1. 012031 p. DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012031
10. Emara A., Soliman M., Monieb H., Abdelrazek S. Material Selection for a Turbocharger Centrifugal Compressor Wheel. Egypt: SAE Technical Paper. 2020. 9 p. DOI: 10.4271/2020-01-5066
11. Pochini A. Design and virtual validation of a turbocharger for an internal combustion engine in a range extender application. Doctoral dissertation, Politecnico di Torino. Turin, 2021. 136 p.
12. Joy N. Design and Analysis of an Integrated Exhaust Manifold with Turbocharger for Considerable Reduction of Over Heating of Bearing System // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. 2018. Vol. 8. No. 2. P. 601–608.

13. Abhang S., Jadhav Y., Jadhav S. Correlation of test data with analysis of turbocharger hot bolted joint // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 5. No. 9. P. 1374–1380.
14. Venkatesh T., Kumar A., Shareef S., Kumar P. Structural Analysis of Centrifugal Compressor Impeller using ANSYS // *CVR Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 19. No. 1. P. 133–137. DOI: 10.32377/cvrjst1922
15. Subash K., Muthukumar K. Design and Analysis of Centrifugal Impeller // *Journal of Industrial Mechanics*. 2019. Vol. 4. No. 2. P. 5–14. DOI: 10.5281/zenodo.3266975
16. Liu S., Liu C., Hu Y., Gao S., Wang Y., Zhang H. Fatigue life assessment of centrifugal compressor impeller based on FEA // *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 60. No. 1. P. 383–390. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.035
17. Alsaeed A. Dynamic stability evaluation of an automotive turbocharger rotor-bearing system. Doctoral dissertation, Virginia Tech. Blacksburg, 2005. 88 p.
18. Terani B., Badarinarayan K., Prakasha A. Stability Analysis of Turbocharger Impeller: A Review // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 2. No. 2. P. 576–578.
19. Mane P. Design & Analysis of Centrifugal Pump Impeller by FEA // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol. 3. No. 1. P. 420–428.
20. Mane P., Firake P., Firake V. Finite Element Analysis of M.S. Impeller of centrifugal Pump // *International Journal of Innovations in Engineering and Science*. 2017. Vol. 2. No. 9. P. 1–4.
1. Watson N., Janota M. Turbocharging the Internal Combustion Engine. New York: Wiley, 1982. 624 p.
2. Prasad A., Rao B., Babji A., Babu D. Static and Dynamic Analysis of a Centrifugal Pump Impeller // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2013. Vol. 4. No. 10. P. 966–971.
3. Martynyuk L., Afanasiev D., Bykov L., Ezhov A., Mezintsev M. The study of the applicability of polymer composite materials for the manufacture of the impeller of a centrifugal compressor // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1060. No. 1. 012026 p. DOI: 10.1088/1757-899X/1060/1/012026
4. Lindberg Jr B., Papuka K., Kharazi A., Mueller N. Novel Compressor Using Woven/Wound Composite Impeller // *Proceedings of the ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Chicago: Process Industries, 2006. P. 95–100. DOI: 10.1115/IMECE2006-13342
5. Netrusov A.N., Fomin V.M. Composite materials for impellers of turbochargers of automotive engines. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2017. No 8, pp. 28–36 (in Russ.).
6. Netrusov A.N., Fomin V.M. Investigation of the strength properties of impellers made of composite material of diesel pressurization units. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2017. No 2, pp. 21–28 (in Russ.).
7. Netrusov A.N., Fomin V.M. Optimization of the reinforcing layer of a compressor wheel made of a composite material of a diesel turbocharger. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2018. No 2, pp. 47–53 (in Russ.).
8. Saravanan R., Malladi A., Aneesh V. Exploration of appropriateness of material for impeller of turbocharger – A numerical validation // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2283. No. 1. 020074 p. DOI: 10.1063/5.0025027
9. Fomin V., Apelinskiy D., Netrusov A. Study of the optimal reinforcing structure of the compressor wheel from composition material of the transport turbocharged engine // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 534. No. 1. 012031 p. DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012031
10. Emara A., Soliman M., Monieb H., Abdelrazek S. Material Selection for a Turbocharger Centrifugal Compressor Wheel. Egypt: SAE Technical Paper. 2020. 9 p. DOI: 10.4271/2020-01-5066
11. Pochini A. Design and virtual validation of a turbocharger for an internal combustion engine in a range extender application. Doctoral dissertation, Politecnico di Torino. Turin, 2021. 136 p.
12. Joy N. Design and Analysis of an Integrated Exhaust Manifold with Turbocharger for Considerable Reduction of Over Heating of Bearing System // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2018. Vol. 8. No. 2. P. 601–608.
13. Abhang S., Jadhav Y., Jadhav S. Correlation of test data with analysis of turbocharger hot bolted joint // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 5. No. 9. P. 1374–1380.
14. Venkatesh T., Kumar A., Shareef S., Kumar P. Structural Analysis of Centrifugal Compressor Impeller using ANSYS // *CVR Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 19. No. 1. P. 133–137. DOI: 10.32377/cvrjst1922
15. Subash K., Muthukumar K. Design and Analysis of Centrifugal Impeller // *Journal of Industrial Mechanics*. 2019. Vol. 4. No. 2. P. 5–14. DOI: 10.5281/zenodo.3266975

References

16. Liu S., Liu C., Hu Y., Gao S., Wang Y., Zhang H. Fatigue life assessment of centrifugal compressor impeller based on FEA // Engineering Failure Analysis. 2016. Vol. 60. No. 1. P. 383–390. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.035
17. Alsaeed A. Dynamic stability evaluation of an automotive turbocharger rotor-bearing system. Doctoral dissertation, Virginia Tech. Blacksburg, 2005. 88 p.
18. Terani B., Badarinarayan K., Prakasha A. Stability Analysis of Turbocharger Impeller: A Review // International Research Journal of Engineering and Technology. 2015. Vol. 2. No. 2. P. 576–578.
19. Mane P. Design & Analysis of Centrifugal Pump Impeller by FEA // International Research Journal of Engineering and Technology. 2016. Vol. 3. No. 1. P. 420–428.
20. Mane P., Firake P., Firake V. Finite Element Analysis of M.S. Impeller of centrifugal Pump // International Journal of Innovations in Engineering and Science. 2017. Vol. 2. No. 9. P. 1–4.

FINDING THE OPTIMAL COMPRESSOR IMPELLER MATERIAL TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE TURBOCHARGING SYSTEM

Rakhmatullin S.S.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
samatrakhmatullin@gmail.com

Vehicles powered by diesel engines are equipped with superchargers in order to improve the efficiency of vehicles. The efficiency of the turbochargers themselves partly depends on the optimum performance of their impellers, which in turn is achieved by choosing the right impeller materials. An important property of the material of the turbine wheel is heat resistance to the incoming exhaust gases, and for the compressor wheel it is the resistance to the pressure of the air simultaneously supplied to it and forced by it. In this paper, the issue of increasing the efficiency of the turbocharging system is considered in the context of comparing three materials (nickel and titanium alloys, structural steel), which are proposed for the manufacture of a compressor impeller by designing its model using computer software products. The measurements of real turbocharging elements and their characteristics are transferred to CREO, where the required dimensions are calculated and other necessary calculations are carried out, which are then imported into ANSYS for the purpose of subsequent research, including thermal and structural analyzes. Comparison of the analysis results allows us to conclude that the nickel alloy is superior to other materials under consideration in terms of its minimum susceptibility to deformation and obtaining the lowest total heat flux in the compressor impeller, and to recommend this material for use in turbocharging or for its subsequent comparison with previously not considered materials, which, as suggested in the study, to some extent can contribute to an increase in the efficiency of the vehicle.

Keywords: turbocharging, engine, compressor wheel, efficiency improvement, nickel alloy, 3D model.

Cite as: Rakhmatullin S.S. Finding the optimal compressor impeller material to improve the efficiency of the turbocharging system. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 3 (49), pp. 87–94 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-87-94