

Научная статья / Original Article

УДК 621.785.3

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-5-609-617>

CC BY 4.0

Исследование теплопередачи оригинальной конструкции электронагревателей, применяемых для технологических операций изготовления деталей из сплава ВТ6

Николай Юрьевич Степаненко^{1,2} , Алия Дамировна Степаненко^{1,2} , Мария Вячеславовна Демченко¹ , Карина Вадимовна Ким^{1,2*} 

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

² Научно-производственная ассоциация «Технопарк Авиационных технологий», Уфа, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: vadimovnakk@gmail.com

АННОТАЦИЯ



Введение. В работе рассматривается оригинальная конструкция высокотемпературного трубчатого электрического нагревателя патронного типа, предназначенного для нагрева промышленной оснастки, используемой для производства деталей из сплава ВТ6. Технологический процесс требует поддержания стабильных высоких температур, превышающих 1000 °С. В отсутствие надлежащей термообработки после операций сварки в деталях образуются трещины, что может привести к их последующему разрушению, особенно это становится критично при сильной неоднородности структуры в зоне шва и основного металла от нанодиапазона до крупнозернистой структуры. Кроме того, нежелательное термическое воздействие на элементы оснастки требует дополнительных затрат на их охлаждение и контроль. **Цель работы** – оценка теплопередачи оригинальной конструкции электронагревателей, применяемых в производстве деталей из сплава ВТ6. **Методы и материалы.** Исследование теплопередачи предложенной конструкции нагревателей выполнено методом конечных элементов в программном комплексе “Ansys”, расчетном модуле “Transient thermal”. Для валидации полученных расчетных значений разработан испытательный стенд, воспроизводящий результаты моделирования. Качественный анализ полей температур подтвердил гипотезу равномерности работы предложенного конструктива нагревателя. **Результаты и обсуждение.** Количественный анализ отразил режим нагрева сплава ВТ6. Экспериментально подтвержден результат моделирования температуры в контрольных точках оснастки, достижение целевой температуры в 1000 °С в локализованной зоне обеспечено. Погрешность составила $\pm \approx 70$ °С. После термообработки исследована микроструктура образцов титанового сплава ВТ6 в различных зонах. **Выводы.** На основе проведенных исследований предложены рекомендации по выбору оптимальных режимов эксплуатации высокотемпературных трубчатых электрических нагревателей патронного типа данной конструкции, а также описаны возможные сферы их применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трубчатый нагревательный элемент, титановый сплав ВТ6, моделирование, конечно-элементный анализ, наноструктура

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Степаненко Н.Ю., Степаненко А.Д., Демченко М.В., Ким К.В. Исследование теплопередачи оригинальной конструкции электронагревателей, применяемых для технологических операций изготовления деталей из сплава ВТ6. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(5):609–617. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-5-609-617>. – EDN: IRXSFB.

Study of heat transfer in the original design of electric heaters used for technological operations in the manufacturing of parts from VT6 alloy

Nikolai Yu. Stepanenko^{1,2} , Aliya D. Stepanenko^{1,2} , Maria V. Demchenko¹ , Karina V. Kim^{1,2*} 

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

² Scientific and Production Association “Technopark of Aviation Technologies”, Ufa, Russia

* Corresponding author: e-mail: vadimovnakk@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. This paper examines the original design of a high-temperature tubular electric heater cartridge designed for heating industrial tooling used in the production of VT6 alloy parts. The process requires maintaining stable high temperatures exceeding 1000 °C. Without proper heat treatment after welding, cracks form in the components, which can lead to subsequent failure. This becomes especially critical when the structure of the weld and base metal is highly heterogeneous, ranging from nanoscale to coarse-grained. Furthermore, undesirable thermal effects on tooling components require additional costs for cooling and monitoring. **The aim of the research** is to evaluate the heat transfer of the original design of electric heaters used in the production of parts from VT6 alloy. **Methods and Materials.** The heat transfer study of the proposed heater design was performed using the finite element method in the Ansys software package, using the Transient Thermal calculation module. To validate the calculated values, a test rig was developed that reproduced the simulation results. A qualitative analysis of the temperature fields confirmed the hypothesis of uniform operation of the proposed heater design. **Results and discussion.** A quantitative analysis reflected the heating conditions of the VT6 alloy. The temperature modeling results at tooling control points were experimentally confirmed, ensuring that the target temperature of 1000 °C was achieved in a localized zone. The error was $\pm \approx 70$ °C. The microstructure of VT6 titanium alloy samples was examined in various zones after heat treatment. **Conclusion.** Based on the conducted research, recommendations are proposed for selecting optimal operating conditions for high-temperature tubular electric cartridge heaters of this design, and their potential applications are described.

KEYWORDS: tubular heating element, titanium alloy VT6, modeling, finite element analysis, nanostructure

FOR CITATION:

Stepanenko N.Yu., Stepanenko A.D., Demchenko M.V., Kim K.V. Study of heat transfer in the original design of electric heaters used for technological operations in the manufacturing of parts from VT6 alloy. *Nanotechnologies in construction*. 2025;17(5):609–617. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-5-609-617>. – EDN: IRXSFB.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее универсальный и широко применяемый источник электрического тепла для промышленности является трубчатый электронагреватель (ТЭН). Отличительной особенностью патронных или пальчиковых электронагревателей (Electric Cartridge Tubular Heaters) является возможность создания значительного теплового потока с их поверхности. Они применяются в машинах для термической формовки, для сварки, пайки или крепятся к резервуарам и трубам, а также в подогреваемых пресс-формах, в комбинированных нагревателях воздуха и жидкости, в печах. Трубчатые электронагреватели обладают следующими рабочими характеристиками: напряжение от 12 В до 380 В, мощность от 100 Вт до 25 кВт, температура до 1200 °C в зависимости от материала оболочки, диаметр от 6 мм до 22 мм, возможны нестандартные диаметры,

длина может достигать от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Для улучшения эксплуатационных характеристик трубчатых нагревателей в известных технических решениях используют различные конструктивные приемы, способствующие повышению теплоотдачи без увеличения затрат энергии: корпус нагревателя специальной формы либо с внешним оребрением, например, металлической лентой, ребрами, спиралью, пластинами [1–8], корпус с двойными стенками, промежуток между которыми заполнен веществом, обеспечивающим поддержание заданной температуры (применение двух слоев изоляционных материалов способствует работе при высоком напряжении, в качестве материального исполнения внутреннего элемента корпуса встречается кварц [3], медь [4], политетрафторэтилен или полиэфирэфиркетон и металлическая втулка [6, 7]), нагревательные элементы различной формы (двойная спираль, плоская

спираль), выполненные из различных материалов с высоким удельным сопротивлением, помещенные в различную среду [9–14]. Для достижения желаемого сопротивления требуется малый диаметр нагревательного провода или значительная длина спирали. Уменьшение диаметра проволочного нагревателя понижает сопротивление коррозии и увеличивает поверхностную нагрузку, необходимую для эффективного излучения тепловой энергии. Увеличение длины спирали приводит к повышению стоимости и проблемам с упаковкой. В [14] применялись спирали с изолирующей оксидной пленкой на поверхности. В [13] предложен электрический нагревательный элемент волнообразной формы. Растягивающийся элемент может эффективно снижать и поглощать механическую нагрузку, вызванную переменным тепловым напряжением, за счет деформации.

Неисправность многих картриджных нагревателей связана с плохим соединением между катушкой нагревателя и контактными штырями. В [15] электрический контакт между электрическим нагревательным элементом и проводниками питающего кабеля осуществляется через соединительный штифт. В патенте [16] в электрическом нагревателе картриджного типа соединения между концами нагревательной катушки и контактными штырями выполняются с помощью коротких полосок проводящей ленты.

Основным параметром при расчете нагревательного элемента (спирали) является удельная мощность. От удельной мощности элемента будет зависеть температура оболочки нагревателя и температура спирали. При определении оптимальной удельной мощности необходимо принять во внимание несколько моментов. Перегрев поверхности может быть недопустим для многих материалов, так как это может привести к их деформации или плавлению. Поскольку газы, включая воздух, плохо проводят тепло, важно обеспечить эффективный отвод тепла от поверхности корпуса нагревателя. Это поможет предотвратить перегрев при работе на номинальной мощности, который может ухудшить теплопроводные свойства корпуса трубчатого нагревателя и сократить его срок службы. Если нагревательный элемент используется в агрессивной среде, его корпус может окисляться или покрываться налетом, что приведет к снижению эффективности работы. Также немаловажен допуск по сопротивлению. Согласно ГОСТ 13268–83 [17], отклонение мощности при рабочей температуре должно быть не более плюс 5% – минус 10% от номинальной мощности для ТЭНов с активным сопротивлением свыше 10 Ом и $\pm 10\%$ – для ТЭНов с активным сопротивлением 10 Ом и менее. При выборе подходящей удельной мощности учитываются факторы: перегрев поверхности может

вызвать деформацию или расплавление материалов; необходимо обеспечивать достаточный теплоотвод от поверхности корпуса нагревателя (газы, в том числе воздух, плохо проводят тепло); агрессивная среда приводит к окислению или образованию налета на корпусе.

Предлагаемые в работе технология и устройство, включающие в себя трубчатые нагреватели, позволяют обойтись без стандартной печной термообработки (ТО) в цикле производства крупногабаритных металлоконструкций в электропечи, так как она позволяет целенаправленно снижать остаточные механические напряжения в металле, возникающие в ходе технологических операций. Так, при сварке возникающие в металле деформации связаны с неоднородностью формирующейся структуры в околошовной зоне [18, 19]. Для титановых сплавов в узкой зоне шва в результате быстрого охлаждения формируется тонкодисперсная структура со средней толщиной пластин вплоть до наноструктурного диапазона [20], тогда как вокруг шва сохраняется исходная крупнозернистая структура. В результате неоднородности структуры величина деформации может превосходить предельно допустимые значения и, в отсутствие надлежащей термообработки, приводит к трещинообразованию и последующему разрушению конструкции. В этом случае возникает также проблема нежелательного термического воздействия на элементы оснастки, что требует дополнительных затрат на их охлаждение и контроль.

Целью исследования является оценка теплопередачи оригинальной конструкции электронагревателей, применяемых для технологических операций изготовления деталей из сплава ВТ6.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследовательская часть работы была выполнена на образцах из сплава ВТ6 (ГОСТ 19807-91) размером 135×60×15 мм (рис. 1). Сплав ВТ6 является типичным представителем класса двухфазных титановых сплавов, и результаты, полученные на нем, могут быть с достаточной степенью достоверности использованы для других сплавов.

Исходная микроструктура сплава ВТ6 представлена на рис. 2. Микроструктура смешанного типа состоит из равноосных зерен α -фазы и превращенной пластинчатой β -фазы. Объемная доля α -фазы составляет $7\pm 1\%$, размер зерен α -фазы $3\pm 0,5$ мкм.

Для проведения металлографических исследований готовились микрошлифы. Микрошлифы были вырезаны из трех зон образца титанового сплава в соответствии с рис. 1. Травление для выявления структуры образцов сплава ВТ6 проводили химическим способом в водном растворе плавиковой

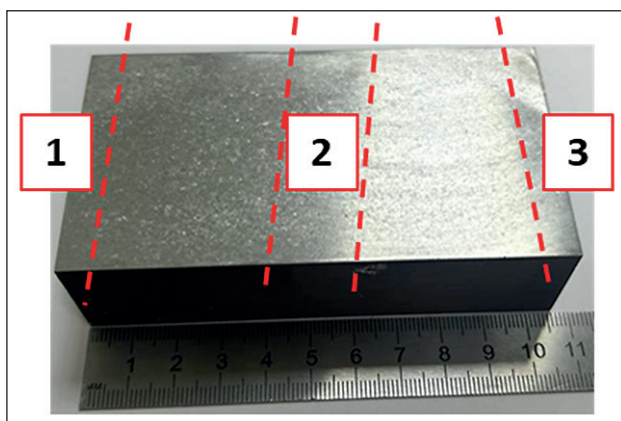


Рис. 1. Внешний вид образца из сплава ВТ6 и зоны вырезки на микрошлифы

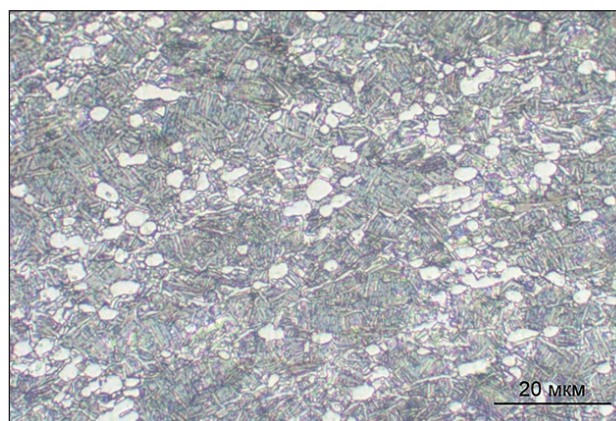


Рис. 2. Микроструктура сплава ВТ6 в состоянии поставки

и азотной кислот в течение 10–15 секунд методом окунания [21]. Исследование микроструктуры проводили с использованием оптического микроскопа «Olympus GX51».

В работе использовалась пара трубчатых нагревателей с односторонним выводом токоподводящих контактов Г-образной конструкции с номинальной мощностью 1390 Вт каждый (рис. 3). Корпус нагревателя изготовлен из стали 12Х18Н10Т, спираль — из сплава Х23Ю5Т, наполнителем служит порошок нитрида бора NB.

Особенностью предлагаемой конструкции является его угловая форма. Длина ненагреваемых областей на концах нагреваемого колена определяется длиной токоподводящих контактов. Длина ненагреваемого колена определяется исходя из габаритов оснастки и конструкции оснастки и оборудования, в которое нагреватели устанавливаются. Поперечное сечение резистивного нагревательного элемента

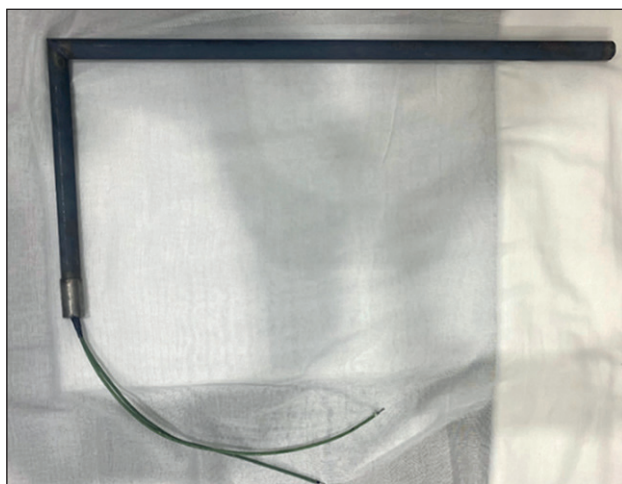


Рис. 3. Трубчатый нагреватель предлагаемой конструкции

определяется исходя из удельной мощности, допустимой для материала при данных условиях эксплуатации. Токоподводящие контакты представляют собой угловые стержни. Корпус нагревателя выполнен путем сварки и включает в себя две части. Благодаря этому токоподводящие элементы нагревателя можно поместить в зону охлаждения, где они не будут нагреваться. Токоподводящие контакты в месте соединения с электрическими проводами изолируют с помощью высокотемпературного герметика. Он защищает от поглощения влаги и высыпания диэлектрического теплопроводящего материала.

Для моделирования процесса термической обработки используется метод конечных элементов (МКЭ). Для исследования переходного процесса передачи тепла от трубчатых нагревателей к оснастке, а затем к образцу целесообразно применять метод переходного теплового анализа (Transient Thermal Analysis).

На этапе моделирования были заданы свойства материалов элементов испытательного стенда, построена сетка трехмерной модели установки (рис. 4).

В качестве граничных условий был задан тепловой поток для каждого трубчатого нагревателя (указан синими стрелками на внутренней поверхности корпусов нагревателей на рис. 5а), а также заданы параметры решателя (время протекания процесса). Регистрация параметров протекания процесса (температур в разных частях образца) осуществлялась на четырех поверхностях: на верхней части медной пластины № 4, в центре нижней части образца № 1, в центре образца № 2, в правом верхнем углу образца № 3 (указаны цифрами на рис. 5б).

Для валидации расчетов, выполненных с использованием программного комплекса «ANSYS», был спроектирован и изготовлен испытательный стенд для ТО плоского образца (рис. 6). Он представляет собой установку с внутренним коробом габаритами

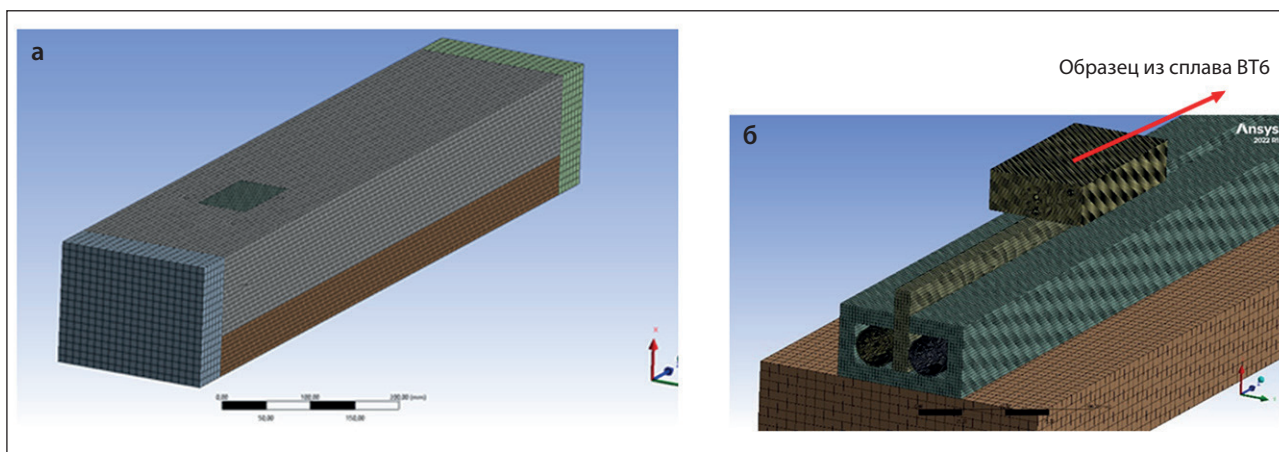


Рис. 4. Трехмерная модель установки контактной ТО образца из сплава ВТ6: а – общий вид; б – вид без верхних покрывных теплоизоляционных материалов

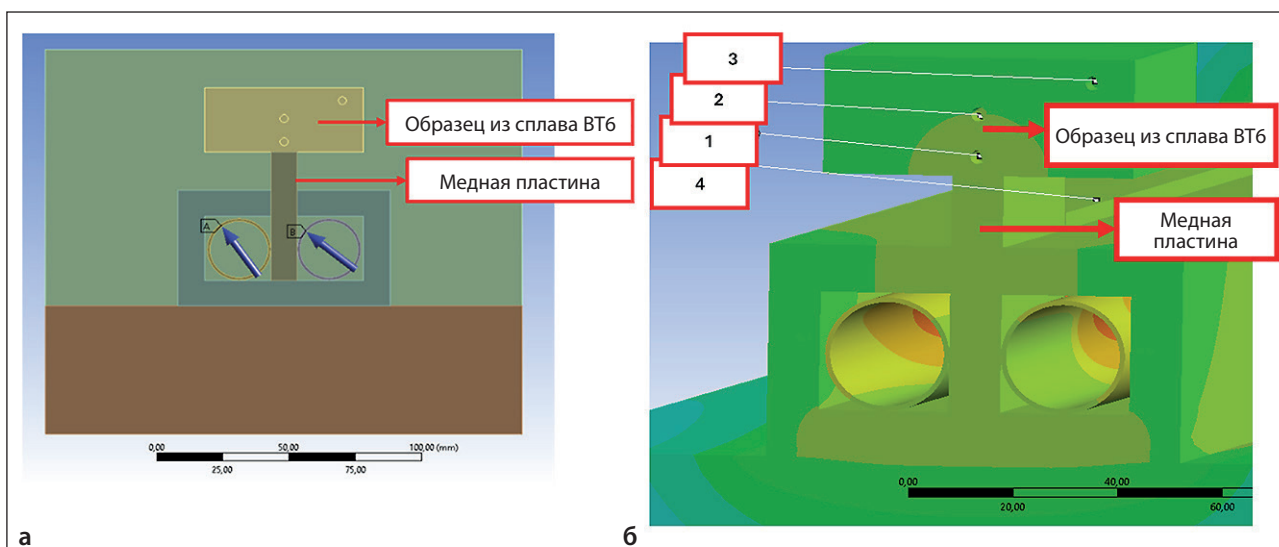


Рис. 5. Граничные условия: а – контролируемые точки; б – задание теплового потока

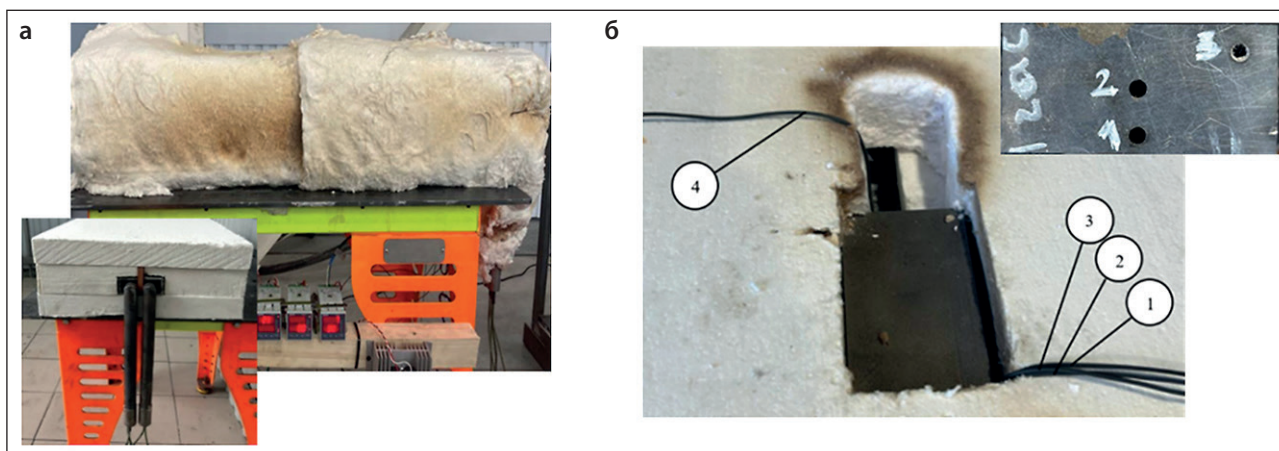


Рис. 6. Испытательный стенд: а – общий вид стенда; б – расположение отверстий в образце под термопары

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

827×80×45, изготовленным из стали 12Х18Н10Т, внутри которого расположены электронагреватели с длиной нагреваемой части 580 мм. Между трубчатыми нагревателями располагалась медная пластина, которая передает нагрев от ТЭНов к образцу сплава ВТ6, находящемуся над ТЭНами. Вся конструкция укрывалась теплоизоляционным материалом (в основании и по торцам теплоизоляционные плиты), для передней и задней части стенда был применен волокнистый теплоизоляционный укрывной материал толщиной 20 мм (в два слоя 40 мм).

На образце из сплава ВТ6 просверлены отверстия диаметром 4 мм, в них закреплены три термопары (№ 1–3) по краю и в середине (рис. 6). Термопара № 4 была закреплена на медной пластине. На поверхности одного из нагревателей была установлена задающая термопара. В нижней части было установлено четыре терморегулятора, один из которых

управлял процессом нагрева, а три других считывали температуру контрольных термопар. Значения температур термопар и нагревателей фиксировались в «Scada»-системе.

Погрешность измерения терморегулятора составляет ± 0,5% (диапазон от –200 до +1300 °С).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 7а представлены результаты моделирования поля температур, на рис. 7б – распределения теплового потока.

Максимальная температура зафиксирована на поверхности нагревателей и составила 1164 °С. Качественный анализ карт распределения температур и теплового потока характеризует равномерность работы предложенного конструктива нагревателя. Длинное колено содержит резистивный нагреватель-

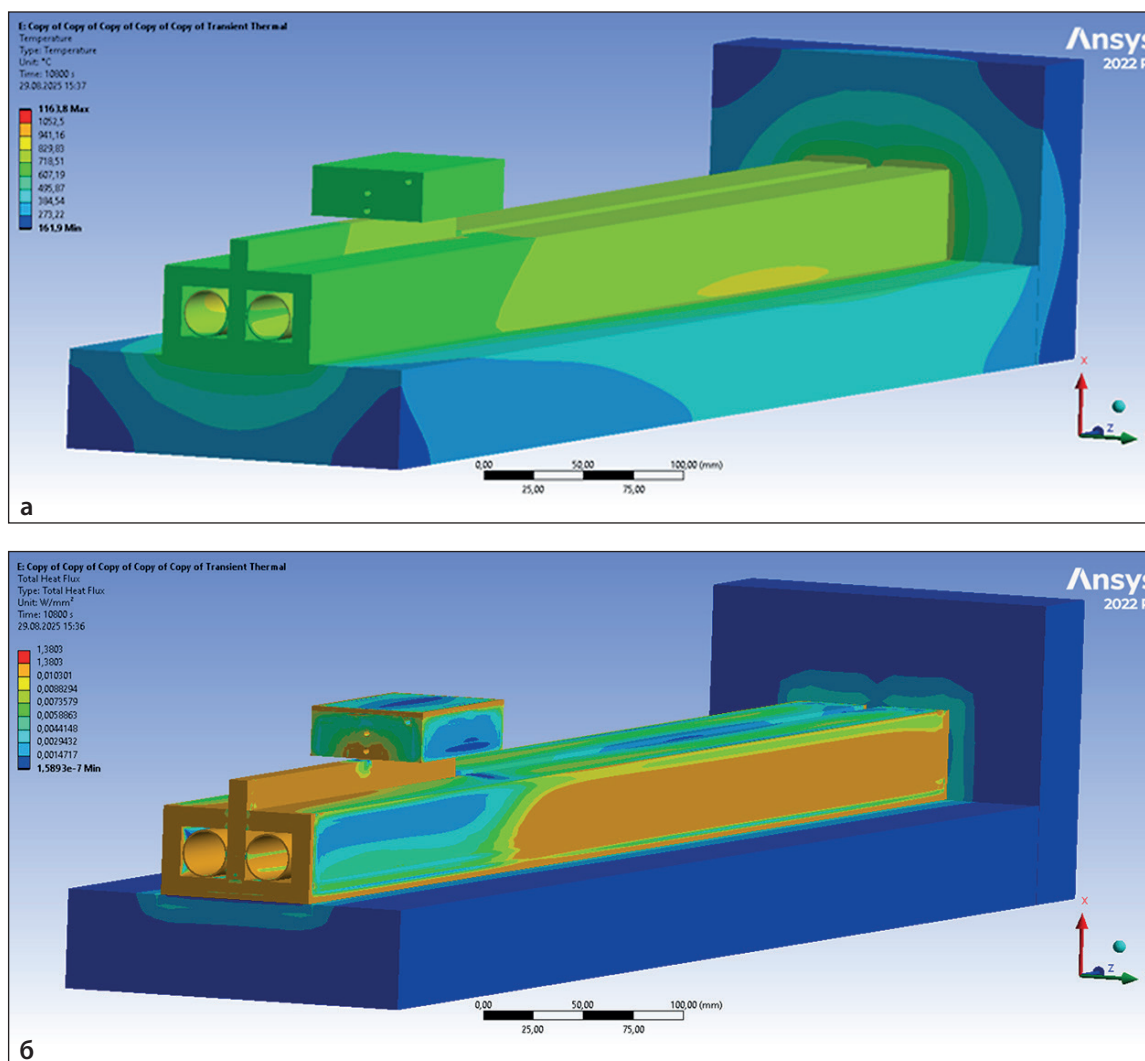


Рис. 7. Карта распределения (вид без укрывной теплоизоляции): а – поля температур, °С; б – теплового потока, W/mm²

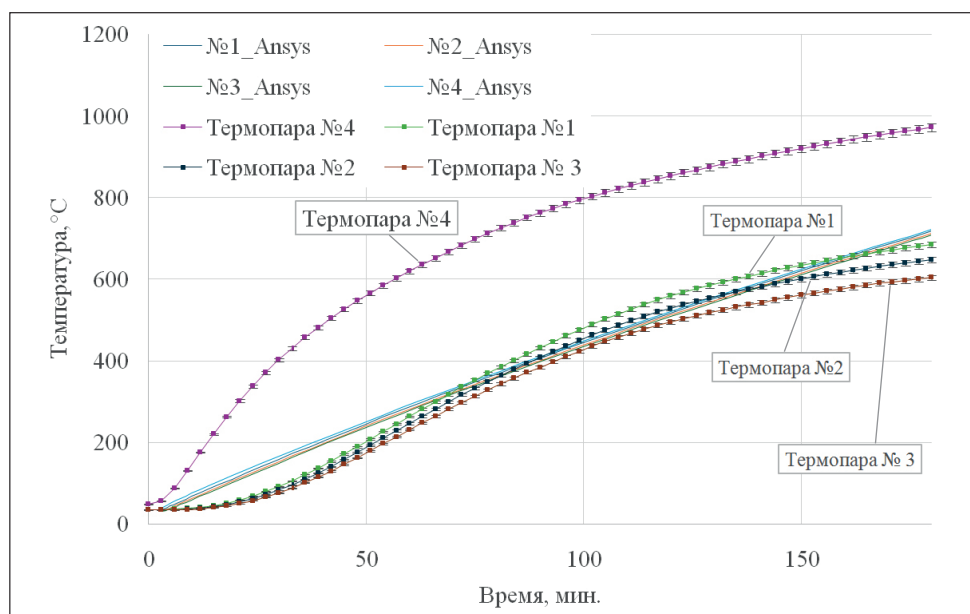


Рис. 8. Графики расчетных и экспериментальных значений температуры в четырех измерительных термопарах

ный элемент и нагревается, а короткое колено позволяет отвести токоподводящие провода от горячей зоны нагреваемой оснастки.

Результаты моделирования и экспериментального исследования температур в четырех контрольных точках представлены на рис. 8.

Моделирование режима нагрева в Ansys показало равномерный линейный нагрев во всех исследуемых точках образца из сплава ВТ6. Максимальное экспериментальное значение температуры нагрева составило $T_{нагр} = 972\text{ }^{\circ}\text{C}$ на термопаре № 4 (медная пластина) при времени нагрева $t = 180$ минут. Отличие экспериментальных значений температуры на медной пластине (термопара № 4) от расчетного (№ 4_Ansys) свидетельствует о допущениях в моделировании данного материала. Максимальную температуру на поверхности образца из сплава ВТ6 зафиксировала термопара №1 $T_{нагр} = 685\text{ }^{\circ}\text{C}$. В центральной части образца температура фиксировалась термопарой № 2 и составила $T_{нагр} = 648\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наименьшая температура нагрева зафиксирована термопарой № 3 в правом верхнем углу образца $T_{нагр} = 604\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Нагрев во всех точках образца из сплава ВТ6 имеет одинаковый характер. Экспериментальное значение температуры ниже теоретического на $\approx 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, что объясняется свойствами пористого диэлектрика [22], которые не были учтены при моделировании.

Результаты исследования микроструктуры сплава ВТ6 после термической обработки в различных зонах показаны на рис. 9. Максимальная температура на поверхности образца, как было отмечено выше, составила $685\text{ }^{\circ}\text{C}$, что значительно ниже температуры начала полиморфного превращения для титанового сплава ВТ6. При нагреве до этой температуры значительных изменений не происходит (рис. 9), что подтверждается и результатами количественной металлографии (табл.). Структура по-прежнему смешанного типа и она однородна во всех зонах образца, что подтверждает равномерность нагрева.

Таким образом, внедрение данной технологии локальной термической обработки и конструктивного исполнения нагревателей и оснастки в производственный процесс позволит снизить риск возникновения дефектов вследствие улучшения их качества, что

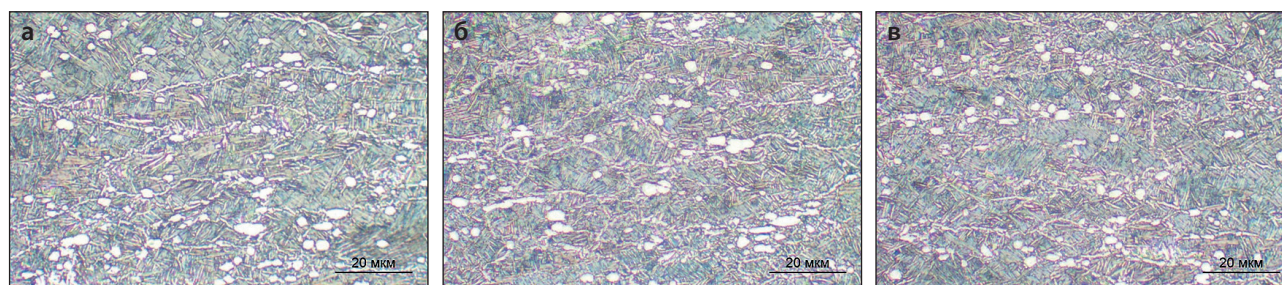


Рис. 9. Микроструктура сплава ВТ6: а – зона 1; б – зона 2; в – зона 3

Таблица. Результаты количественного анализа микроструктуры сплава ВТ6

Зона	Объемная доля α -фазы, %	Средний размер α -фазы, мкм
1	6	$3 \pm 0,5$
2	7	$3 \pm 0,5$
3	7	$3 \pm 0,5$

особенно важно в случае крупногабаритных конструкций. При этом достигается более равномерное распределение тепла и уменьшение вероятности перегрева металла, в результате чего обеспечивается требуемая прочность изделия вследствие сведения к минимуму нежелательных изменений структуры материала.

Стоит предположить, что данная технология термического воздействия может представлять интерес в качестве постобработки сварных швов деталей, полученных деформационными видами сварки. При соединении деталей из двухфазных титановых сплавов линейной сваркой трением узкая зона сформированного шва за счет последующего ускоренного охлаждения претерпевает фазовые превращения с образованием тонкодисперсной структуры мартенситного типа α' . Толщина пластин α' -фазы может до-

стигать нанодисперсного диапазона [23, 24, 25]. Для получения однородной структуры по всему объему соединяемых деталей как раз и актуально внедрение локальной технологии, описанной в данной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты моделирования теплового потока позволили оценить эффективность теплопередачи конструктивного исполнения оснастки, позволяющей имитировать желаемый результат процесса термической обработки;

2. Экспериментальные исследования на испытательном стенде подтвердили гипотезу равномерности нагрева предложенной конструкцией ТЭН при термической обработке образца из титанового сплава (сходимость порядка 2% относительно целевой температуры при протекании предполагаемого времени).

3. Результаты металлографического исследования образца сплава ВТ6 подтвердили равномерность нагрева предложенной конструкции ТЭНа.

Рассматриваемая технология термического воздействия и конструкция трубчатого электрического нагревателя могут представлять интерес в качестве локального нагрева промышленной оснастки производства деталей из сплава ВТ6.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грепан С.Е. *Трубчатый электронагреватель*. Патент RU2002132950A. 2004.
2. Hotset Heizpatronen und Zubehoer GmbH. Electric radiator for injection molding tools. Patent DE4242505A1; 1994.
3. Гаврилин В.А., Горелкин М.В. *Блок трубчатых электронагревателей*. Патент WO2021054857A1. 2021.
4. General Electric Co. Electric heating unit. Patent US2767288A; 1956.
5. Zhang Zezeo. The water-storage electric heater that a kind of water power separates fully. Patent CN205946215, IPC H05B1/0291. № 02227149; 2002.
6. Zhao Yuewei, Wei Ke, Zhao Haijiang. Extra-high pressure tubular electrical heating element. Patent CN204069385U; 2014.
7. Leng Quanfang, Xu Qiubao, Leng Jingtao. High-voltage tubular electric heating element. Patent CN218514537U; 2022.
8. Leng Quanfang, Xu Qiubao, Leng Jingtao. A high voltage tubular electric heating element. Patent CN115442931A; 2022.
9. Bertie F. Hall, Jr. Tubular heating element with insulating core. Patent US5453599A; 1995.
10. Henri Galliou, Olivier Moine. Sheathed heating element with positive temperature coefficient. Patent US20040084439A1; 2004.
11. Louis P., Steinhauser A., Konrad J. Molded polymer composite heater. Patent CN103155696, IPC H05B1/0291; 2001.
12. Добижа С.В., Осинцева О.В., Солдатов А.А., Каликин К.В. *Трубчатый электронагреватель с двойной спиралью*. Патент RU190400U1, МПК H05B. 2019.
13. Sleifu A. Electric heating device. Patent CN113365376A; 2021.
14. Ляховский С.Е., Ляховский Ю.Е. *Трубчатый электронагреватель*. Патент RU147180U1. 2014.

15. Schlipf A. Electrical tubular heating element with connecting pin and manufacturing method for electrical tubular heating element with connecting pin. Patent US11910496B2. 2024.
16. Herbert L. Lindroth, Carl E. Barker. Electrical cartridge-type heater. Patent US3881163A, 1975.
17. ГОСТ 13268-83. *Электронагреватели трубчатые (ТЭН). Общие технические условия*. Москва: Издательство стандартов. 1984.
18. Peng H.E., Yun-xin W.U., Tao ZHANG, Song-yi CHEN, Chen ZHANG. Residual stresses in linear friction welding of TC17 titanium alloy considering phase fraction. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2024;34:184–193. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(23\)66390-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66390-3)
19. McAndrew A., Colegrove P., Bühr C., Flipo B., Vairis A. A literature review of Ti-6Al-4V linear friction welding. *Progress in Materials Science*. 2018;92:225–257. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.003>
20. Zhenguo G., Tiejun M., Xiawei Y., Ju L., Wenya L., Achilles V. Multi-scale analyses of phase transformation mechanisms and hardness in linear friction welded Ti17($\alpha + \beta$)/Ti17(β) dissimilar titanium alloy joint. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024;37(1):312–324. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.08.018>
21. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: справочник. Перевод с немецкого. Под ред. И. Н. Фриндландер, Ф. И. Квасов. Москва: *Металлургия*. 1988
22. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: *Учебник для вузов*. Москва: Высш. Шк., 2007:535.
23. Mukundhan C., Sivaraj P., Balasubramanian V., Sonar T., Petley V., Verma S. Effect of friction pressure on microstructure and tensile properties of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy joints. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023;6(1):483–493. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.05.001>
24. McAndrew A.R., Colegrove P.A., Bühr C., Flipo B.C.D., Vairis A. A literature review of Ti-6Al-4V linear friction welding. *Progress in Materials Science*. 2018;92(1):225–257. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.003>
25. Rajan S., Wanjara P., Gholipour J., Kabir A.S. Fatigue Behavior of Linear Friction Welded Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si Dissimilar Welds. *Materials (Basel)*. 2021;14(11):31–36. <https://doi.org/10.3390/ma14113136>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Степаненко Николай Юрьевич – инженер-исследователь Центра интеллектуального машиностроения Уфимского нефтяного технического университета, Уфа, Россия; начальник сектора автоматизации процессов Технопарк АТ, Уфа, Россия, koly.stepanenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0843-480X>

Степаненко Алия Дамировна – инженер-исследователь Центра интеллектуального машиностроения Уфимского нефтяного технического университета, Уфа, Россия; специалист по управлению проектами Технопарк АТ, Уфа, Россия, galimovaad@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5032-9301>

Демченко Мария Вячеславовна – кандидат технических наук, доцент кафедры Технологические машины и оборудование Института нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета, Уфа, Россия, m.v.demchenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6950-5811>

Ким Карина Вадимовна – магистр кафедры Материаловедения и защиты от коррозии Института нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета, Уфа, Россия; лаборант Технопарк АТ, Уфа, Россия, vadimovnakk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-9434-0408>

ВКЛАД АВТОРОВ

Степаненко Н.Ю. – разработка концепции и методологии исследования; анализ результатов исследования; написание статьи; составление итоговых выводов.

Степаненко А.Д. – подготовка и написание текста раздела «Методы и материалы»; обработка данных.

Демченко М.В. – научное руководство, научное редактирование текста, научная дискуссия.

Ким К.В. – редактирование и обработка данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.09.2025; одобрена после рецензирования 06.10.2025; принята к публикации 10.10.2025.